

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea magistrale
Ingegneria Civile

Tesi di laurea

Attivazione energetica delle gallerie scavate con metodo convenzionale



Relatori:
Prof. Marco Barla
Ing. Fabrizio Zacco

Candidato:
Alessandro Steffan

Luglio 2018

Ringraziamenti

Ringrazio il professor Marco Barla e L'ingegner Fabrizio Zacco che mi hanno seguito in questo lavoro di tesi mettendo a mia disposizione esperienza e disponibilità.

I ringraziamenti più preziosi e sentiti vanno alla mia famiglia, sempre presente e in grado di fornirmi tutti gli strumenti necessari al conseguimento di questo traguardo.

A Stefania, fondamentale e capace di spronarmi anche nei momenti più difficili.

A Stevu, Marco, Busi, Giulio, Rampi, Corra e Mobi, coinquilini che hanno saputo trasformare questi anni di studio in un periodo della vita da ricordare.

Ai compagni di studio di sempre, Silvio, Maio, Ilmi e Sabi, loro più di tutti comprendono l'impegno e il sacrificio nascosto dietro al conseguimento di questo risultato.

Agli amici di Lu di sempre, il tempo dedicato allo svago con loro è stato il miglior sostegno possibile.

Indice dei contenuti

1	Introduzione.....	15
2	Geotermia	19
2.1	Origine e classificazione dell'energia geotermica.....	20
2.2	Risorse geotermiche a bassa entalpia	21
2.2.1	Circuito aperto.....	24
2.2.2	Circuito chiuso	25
2.3	Geostrutture energetiche.....	27
2.3.1	Casi studio di energy tunnel	29
2.4	Generalità sullo scambio termico	35
3	Scavo di gallerie sotterranee.....	39
3.1	Metodo convenzionale.....	40
3.1.1	Drill and Blast	42
3.1.2	Scavo meccanico mediante escavatori	43
3.1.3	Sequenza di scavo	44
3.1.4	Stabilità dello scavo.....	45
3.1.4.1	Supporto preliminare.....	47
3.1.4.2	Strato impermeabilizzante.....	51
3.1.4.3	Supporto definitivo	52
3.2	Metodo meccanizzato (TBM).....	53

3.2.1	Tipologie di TBM.....	54
4	Modello FE e modellazione termoidraulica	57
4.1	Modello agli elementi finiti	57
4.1.1	Formulazione matematica	59
4.2	Modellazione termoidraulica	60
4.2.1	Formulazione che regola l'analisi	60
4.2.2	Condizioni al contorno	62
5	Soluzioni per l'attivazione termica di gallerie scavate con metodo convenzionale.....	63
5.1	Reti energetiche	65
5.2	Bullonature energetiche	70
5.3	Sistema accoppiato	74
6	Modellazione numerica	75
6.1	Geometria del modello	76
6.2	Parametri dei materiali.....	82
6.3	Condizioni iniziali e condizioni al contorno.....	85
6.4	Analisi parametrica.....	90
6.4.1	Studio parametrico del sistema di bullonature energetiche.....	92
6.4.2	Studio parametrico del sistema di reti energetiche.....	102
6.4.3	Studio del sistema accoppiato di bullonature e reti energetiche	113
7	Conclusioni.....	117

Indice delle figure

Figura 1. Andamento della temperatura nel sottosuolo.....	22
Figura 2. A sinistra un esempio di impianto a circuito chiuso; a destra un esempio di impianto a circuito aperto.....	23
Figura 3. Circuito chiuso verticale (Dickson & Fanelli, 2004).....	26
Figura 4. Schema di pali di fondazione energetici (Brandl, 2006).....	28
Figura 5. Diaframma e pali energetici (Integrating Geothermal Loops Into The Diaphragm Walls Of The Bulgari Hotel Knightsbridge London).....	29
Figura 6. Temperatura del terreno durante la prova (Franzius & Pralle, 2011).....	30
Figura 7. Effetti termici ripresi da telecamera termica durante il pompaggio di acqua calda nelle tubazioni (Frodl & Jan Niklas Franzius, 2010).....	31
Figura 8. Modello di concio energetico e sua realizzazione (Frodl & Jan Niklas Franzius, 2010).....	32
Figura 9. Modello concio energetico e sua realizzazione (ENERTUN).....	33
Figura 10. Temperature di ingresso e uscita nella condizione invernale (a) e nella condizione estiva (b) (Barla & Di Donna, Gallerie energetiche in ambiente urbano, 2015)	34
Figura 11. Potenza scambiata dal sistema ENERTUN (Barla & Di Donna, Gallerie energetiche in ambiente urbano, 2015).....	35
Figura 12. Flusso di calore nella situazione invernale e nella situazione estiva. In marrone è indicato il terreno, in grigio la malta cementizia, in rosso la tubazione e in blu il fluido termovettore.....	37
Figura 13. Metodi di scavo in funzione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso	40
Figura 14. Esempio di Drill and Blast e scavo con escavatore (rispettivamente a sinistra e a destra) (Working Group 19, aprile 2009).....	41
Figura 15. Schema del ciclo di scavo con metodo Drill and blast	43
Figura 16. Alcune possibili sequenze di scavo (Working Group 19, aprile 2009).....	44

Figura 17. Alcune tipologie di centine utilizzabili	48
Figura 18. Schema di proiezione umida e a secco (rispettivamente sopra e sotto).....	49
Figura 19. Bullone ad ancoraggio localizzato e bullone ad ancoraggio ripartito (rispettivamente sopra e sotto)	50
Figura 20. Schema TBM (Zhao, 2012)	54
Figura 21. Tipologie di TBM (Zhao, 2012)	56
Figura 22. Flow chart per il metodo agli elementi finiti	58
Figura 23. Geometria del tunnel (quote in m) (AUTOCAD).....	64
Figura 24. Vista frontale (in alto a sinistra), vista laterale (in alto a destra) e dettaglio del modello 3D della rete energetica (AUTOCAD).....	66
Figura 25. Sistema di reti sostenute da chiodature (West Qinling Tunnel, Cina).....	68
Figura 26. Sistema di reti sostenute da centine metalliche (galleria di Fiè, Bolzano)	68
Figura 27. Configurazione geometrica delle tubazioni nei BHE (DHI-WASY, 2010)	70
Figura 28. Sezione di bullonatura energetica (AUTOCAD).....	71
Figura 29. Vista frontale (in alto) e dettaglio del modello 3D del sistema di bullonature energetiche (AUTOCAD)	73
Figura 30. Modello 3D del sistema accoppiato di reti energetiche e bullonature energetiche (AUTOCAD).....	74
Figura 31. Modello DXF importato su FEFLOW (quote in m) (AUTOCAD).....	76
Figura 32. Dettaglio del modello DXF importato su FEFLOW (quote in m) (AUTOCAD)	77
Figura 33. Modello 3D (FEFLOW)	79
Figura 34. Particolare layers (FEFLOW)	79
Figura 35. Dettaglio mesh, in rosso l'aria, in viola il calcestruzzo e in blu il terreno (FEFLOW)	80
Figura 36. Geometria tipo delle tubazioni applicate alle reti (FEFLOW).....	81
Figura 37. Geometria tipo delle tubazioni che vanno a creare le bullonature energetiche (FEFLOW)	81
Figura 38. Carico idraulico in condizioni di falda statica (FEFLOW).....	86
Figura 39. Carico idraulico in condizioni di falda in movimento (FEFLOW).....	87
Figura 40. Fluid-flux BC per il sistema di bullonature energetiche (FEFLOW)	88
Figura 41. Fluid-flux BC per il sistema di reti energetiche (FEFLOW)	88

Figura 42. Temperature BC (situazione estiva) per il sistema di bullonature energetiche (FEFLOW)	89
Figura 43. Temperature BC (situazione invernale) per il sistema di reti energetiche (FEFLOW)	89
Figura 44. Punto di ingresso e punto di uscita del fluido	92
Figura 45. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di bullonature energetiche, situazione estiva (analisi 1, 2, 3, 4, 5).....	93
Figura 46. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di bullonature energetiche, situazione invernale (analisi 6, 7, 8, 9, 10).....	94
Figura 47. Andamento della potenza scambiata dal sistema di chiodature energetiche in funzione della loro lunghezza.....	96
Figura 48. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di bullonature energetiche caratterizzato da una lunghezza di 2 metri e da falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione estiva (analisi 11).....	98
Figura 49. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di bullonature energetiche caratterizzato da una lunghezza di 2 metri e da falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione invernale (analisi 12)	98
Figura 50. Numerazione bullonature e andamento delle velocità di falda (FEFLOW)	100
Figura 51. Misurazione delle temperature alle estremità delle bullonature energetiche alla fine delle analisi 2 e 11 (situazione estiva con falda in condizione statica e con falda in movimento)	100
Figura 52. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di reti energetiche, situazione estiva (analisi 13, 14, 15, 16).....	102
Figura 53. Dettaglio della porzione finale del grafico in Figura 52	103
Figura 54. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di reti energetiche, situazione invernale (analisi 17, 18, 19, 20)	104
Figura 55. Dettaglio della porzione finale del grafico in Figura 54	104
Figura 56. Andamento della potenza scambiata dal sistema di reti energetiche in funzione della spaziatura dei tratti verticali	106
Figura 57. Andamento della potenza scambiata per metro lineare di tubazione.....	107
Figura 58. Confronto costi benefici per le diverse configurazioni geometriche delle reti energetiche.....	109

Figura 59. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di reti energetiche caratterizzato da una spaziatura dei tratti verticali di 30 cm e da falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione estiva (analisi 21)	110
Figura 60. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di reti energetiche caratterizzato da una spaziatura dei tratti verticali di 30 cm e da falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione invernale (analisi 22).....	111
Figura 61. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema accoppiato caratterizzato da bullonature energetiche di lunghezza di 2 metri e da tubazioni applicate alla rete con spaziatura dei tratti verticali di 30 cm, falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione estiva (analisi 23)	113
Figura 62. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema accoppiato caratterizzato da bullonature energetiche di lunghezza di 2 metri e da tubazioni applicate alla rete con spaziatura dei tratti verticali di 30 cm, falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione invernale (analisi 24).....	114

Indice delle tabelle

Tabella 1. Confronto superficie di malta cementizia nella sezione del foro, con o senza tubazioni	71
Tabella 2. Parametri per la caratterizzazione termoidraulica del terreno	83
Tabella 3. Parametri per la caratterizzazione termoidraulica dell'aria	84
Tabella 4. Parametri per la caratterizzazione termoidraulica della malta cementizia	84
Tabella 5. Parametri per la caratterizzazione termoidraulica e geometrica delle tubazioni.	84
Tabella 6. Elenco delle analisi effettuate con relative caratteristiche	91
Tabella 7. ΔT per il sistema di bullonature energetiche nella situazione estiva.....	94
Tabella 8. ΔT per il sistema di bullonature energetiche nella situazione invernale	95
Tabella 9. Valori utilizzati per il calcolo del calore estraibile dal sistema geotermico.....	95
Tabella 10. Potenza estraibile in situazione estiva dal sistema di bullonature energetiche .	96
Tabella 11. Potenza estraibile in situazione invernale dal sistema di bullonature energetiche	96
Tabella 12. Valori di ΔT e di potenza estraibile dal sistema di bullonature energetiche in presenza di falda in movimento con velocità 1.5 m/d.....	99
Tabella 13. ΔT per il sistema di bullonature energetiche nella situazione estiva.....	103
Tabella 14. ΔT per il sistema di reti energetiche nella situazione invernale	105
Tabella 15. Potenza estraibile in situazione estiva dal sistema di reti energetiche	106
Tabella 16. Potenza estraibile in situazione invernale dal sistema di reti energetiche.....	106
Tabella 17. Valori di potenza scambiata per metro lineare di tubazione in situazione estiva	107
Tabella 18. Valori di potenza scambiata per metro lineare di tubazione in situazione invernale	107
Tabella 19. Costi delle tubazioni per le varie configurazioni geometriche.....	108
Tabella 20. Ricavi annui in situazione estiva	108

Tabella 21. Ricavi annui in condizione invernale	109
Tabella 22. Ricavi annui totali	109
Tabella 23. Valori di ΔT e di potenza estraibile dal sistema di reti energetiche in presenza di falda in movimento con velocità 1.5 m/d	111
Tabella 24. Confronto ΔT del sistema di reti energetiche analizzato singolarmente o nel sistema accoppiato.....	115
Tabella 25. Confronto ΔT del sistema di bullonature energetiche analizzato singolarmente o nel sistema accoppiato.....	115
Tabella 26. Potenza totale estraibile dal sistema accoppiato.....	115
Tabella 27. Confronto fra potenze scambiate al metro lineare di tubazione fra il sistema ENERTUN e il sistema accoppiato	116

1 Introduzione

Uno degli argomenti più trattati, discussi e per certe ragioni controversi che è stato protagonista a partire dagli anni '90 fino ad oggi, a livello nazionale e mondiale, è quello legato alla gestione dell'energia e delle risorse e alle sue conseguenze, ovvero l'inquinamento atmosferico che è considerato il maggior protagonista nell'innalzamento delle temperature globali che stiamo osservando. Il primo importante passo a riguardo è stato fatto stipulando l'accordo di Kyoto con il quale, le nazioni che hanno aderito, si sono impegnate nel periodo che è andato dal 1997 al 2013 alla riduzione delle emissioni rispetto a quelle registrate nel 1990. Nonostante le nazioni aderenti al protocollo di Kyoto abbiano sostanzialmente atteso gli obiettivi, le misure non sono bastate a migliorare in maniera sensibile la situazione a livello globale. Proprio per questo, con l'accordo di Doha (2012) si è prolungato l'accordo con la stesura di nuovi obiettivi, riassumibili con i numeri "20-20-20" ovvero la riduzione del 20 % delle emissioni dei gas serra, portare al 20 % la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili e portare al 20 % il risparmio energetico. Inoltre, la UE non si ferma e pone già gli obiettivi per il 2030 andando sostanzialmente ad incrementare le percentuali da raggiungere sopracitate. In questo panorama di ricerca e sviluppo di fonti rinnovabili non può che assumere un ruolo sempre preponderante l'utilizzo della geotermia. Questo tipo di energia sfrutta il calore naturale della terra (gradiente geotermico) e può dunque ritenersi una fonte rinnovabile e pulita. Come vedremo nel capitolo primo stanno

prendendo sempre più piede le geostrutture energetiche, ovvero tutte quelle strutture che a contatto con le parti più profonde del terreno permettono uno scambio termico è quindi la possibilità di rendere utilizzabile questo calore convertendolo in energia. In più, altro punto a favore dell'attivazione termica delle geostrutture e più nello specifico delle gallerie, sta nella loro vita utile. I tunnel sono progettati per durare per più di 100 anni, e l'installazione di sistemi geotermici al loro interno aumenta il loro valore. Anche se i costi aggiuntivi potrebbero non offrire un ritorno sull'investimento entro il normale orizzonte di investimento di 7-10 anni, i grandi progetti infrastrutturali possono essere trattati in modo diverso in quanto le strutture serviranno per molti decenni. C'è un limite alla quantità di elettricità futura che può essere fornita da fonti rinnovabili come l'energia eolica o il fotovoltaico, quindi la lunga vita progettuale dei tunnel deve essere presa in considerazione nella pianificazione energetica di oggi. Il seguente studio si inserisce in questo contesto e si propone di valutare nuovi sistemi e riadattare soluzioni già esistenti in tunnel scavati con il metodo meccanizzato (TBM). Per le seguenti analisi verrà presa in considerazione la situazione in cui la galleria sia scavata con il metodo convenzionale; questo fa sì che il sistema di supporto utilizzato sia creato in loco e non preconfezionato e applicato durante le fasi di scavo come avviene nel caso delle gallerie scavate con metodo meccanizzato. Lo scavo di tunnel con il metodo tradizionale non prevede infatti l'utilizzo di conci prefabbricati come tipologia di opera di sostegno ma l'utilizzo di bullonature, nervature d'acciaio e reti metalliche. Queste tematiche riguardanti lo scavo di gallerie con il metodo tradizionale saranno trattate nel capitolo terzo. Nel quarto capitolo verrà descritto lo strumento che ci permetterà di stabilire da un punto di vista di efficienza energetica e di conseguenza economica, la fattibilità del progetto o meno. Questo sarà possibile andando a sviluppare un modello agli elementi finiti tridimensionale sul quale sarà effettuata una analisi che prenderà in considerazione due aspetti sui tre possibili, quello idraulico e quello termico, tralasciando quello meccanico. Poi si passa al vero e proprio cuore del seguente lavoro ovvero la descrizione dei sistemi che verranno analizzati. In particolare vengono analizzati tre sistemi, il primo rappresentato dalle "bullonature energetiche", il secondo dalle "reti energetiche" e il terzo che è formato unendo le due soluzioni appena nominate e che sarà chiamato successivamente "sistema accoppiato". Quindi è stato utilizzato il software agli elementi finiti FEFLOW per studiare da un punto di vista numerico le soluzioni prese in considerazione. Nel capitolo sesto i sistemi sono stati valutati seguendo

un'analisi parametrica che ha riguardato gli aspetti geometrici delle tubazioni e aspetti legati alle condizioni iniziali e in particolare alle condizioni della falda e alla temperatura del fluido in ingresso legata alla stagione dell'anno presa in considerazione. Per ognuna delle ventiquattro analisi l'output è stato la differenza di temperatura fra fluido entrante e fluido uscente dalle tubazioni grazie alla quale è stato possibile calcolare la potenza scambiabile da ogni sistema. Infine, all'interno del capitolo settimo sono presentate alcune conclusioni.

2 Geotermia

La geotermia è la disciplina che si occupa dello studio, della ricerca e dello sfruttamento del calore della terra avvalendosi di strumenti scientifici offerti dalla geologia, dalla chimica, dalla fisica e dall'ingegneria (Sommaruga & Verdiani, 1995). Per la sua estrema versatilità può trovare impiego nelle moltissime attività umane in cui sia richiesto l'uso del calore: dalle applicazioni civili a quelle agricole per arrivare a quelle industriali. Dal punto di vista dell'utilizzazione, la geotermia si può dividere in tre settori:

- a) Settore degli utilizzi ad alta entalpia, soprattutto per la produzione di energia elettrica e usi industriali;
- b) Settore degli utilizzi a bassa entalpia, caratterizzato dagli usi diretti come quello civile, agricolo o industriale;
- c) Settore degli usi termali, caratterizzato da scopi terapeutici e ricreativi.

Seppur i concetti di entalpia e di temperatura siano correlati in via teorica non possono essere confusi. Nella pratica però, i termini alta, media e bassa entalpia vengono indifferentemente sostituiti con alta, media e bassa temperatura. Ne risulta così una classificazione dell'energia geotermica legata alla temperatura:

- a) Geotermia a bassa entalpia, caratterizzata da fluidi con temperature minori di 100°C
- b) Geotermia a media entalpia, caratterizzata da fluidi con temperature comprese fra i 100 e i 150°C
- c) Geotermia ad alta entalpia, caratterizzata da fluidi con temperature maggiori di 150°C

2.1 Origine e classificazione dell'energia geotermica

L'energia geotermica è quella particolare forma di energia della Terra dovuta al calore immagazzinato all'interno della crosta. La differenza di temperatura tra le zone più profonde, più calde, e quelle superficiali, più fredde, da origine ad un flusso di calore dall'interno verso l'esterno della Terra, che tende a stabilire condizioni di uniformità che non saranno mai raggiunte. Le differenze di temperatura tra le diverse parti della Terra hanno prodotto moti convettivi dei materiali che la costituiscono. Più in particolare, attraverso le rocce del sottosuolo il calore si propaga per conduzione, quindi senza trasporto di materia, per convezione, con trasporto di materia, mentre la propagazione per irradiazione è praticamente trascurabile. Questi fenomeni fanno sì che procedendo verso l'interno della crosta terrestre la temperatura aumenta secondo un gradiente geotermico che mediamente è di 3°C ogni 100 m di profondità (Dickson & Fanelli, 2004). Bisogna comunque sottolineare il fatto che questo gradiente sarebbe costante in tutti i punti del globo solo se le sue caratteristiche fossero identiche ovunque, in realtà questo non avviene e infatti assistiamo ad anomalie termiche, positive o negative, a seconda che il gradiente sia più o meno basso della media. Per quanto riguarda la classificazione dell'energia geotermica, non vi è ancora una terminologia standard utilizzata in ambito internazionale. Una possibile suddivisione è figlia della fruibilità o meno della suddetta energia. Quindi, parlando di risorse geotermiche, di solito ci si riferisce a quelle che più precisamente dovrebbero essere chiamate risorse di base accessibili ovvero tutta l'energia termica

contenuta tra la superficie e una certa profondità. All'interno delle risorse di base accessibili troviamo le risorse di base accessibili utili, quella parte delle risorse che potrebbe essere estratta entro un periodo di tempo inferiore di 100 anni. Questa categoria comprende le risorse economiche individuate, quella parte di risorse che può essere estratta ad un costo competitivo con altre forme commerciali di energia.

Un altro comune criterio di classificazione, come già accennato nel paragrafo precedente, si basa sull'entalpia dei fluidi che con buona approssimazione può essere considerata proporzionale alla temperatura. In particolare, le risorse sono suddivise in bassa, media e alta entalpia (o temperatura).

Nella seguente trattazione verranno prese in considerazione risorse energetiche accessibili utili e a bassa entalpia.

2.2 Risorse geotermiche a bassa entalpia

Come detto nel paragrafo precedente, possiamo definire energia geotermica a bassa entalpia quella per cui le temperature dei fluidi sono al di sotto dei 100°C. Data la relativamente bassa temperatura, questo tipo di energia si presta molto bene ad utilizzi diretti ed in particolare faremo riferimento ad usi civili, agricoli e industriali e quindi lasceremo fuori dal discorso il settore della produzione di energia elettrica. Fra gli usi civili quello del riscaldamento è una delle forme più antiche e diffuse. Le temperature di esercizio dei fluidi richiesta varia in funzione degli impianti termici adottati. Occorrono valori di 50-80°C per impianti termosifone e 35-50°C per i pannelli radianti a parete, pavimento o soffitto. Quando i fluidi non raggiungono le temperature sopraindicate, queste si potranno raggiungere ricorrendo a sistemi noti come pompe di calore. Fra gli altri utilizzi dell'energia geotermica a bassa entalpia possiamo ricordare quelli legati all'agricoltura e zootecnia e quindi tutte quelle applicazioni che rientrano nei seguenti tre settori: produzione, lavorazione e conservazione di prodotti vegetali o animali.

Entriamo ora più nello specifico degli impianti geotermici a bassa entalpia. Alla base dei sistemi che vedremo in seguito vi è la pompa di calore. La pompa di calore permette di scambiare il calore tra una sorgente a temperatura inferiore rispetto al pozzo, ovvero il punto dove si immette il calore. In un impianto di riscaldamento, rappresenta il “pozzo caldo”; viceversa, in un impianto di condizionamento l'edificio è la “sorgente fredda” dalla quale viene estratto il calore. Il suolo rappresenta per la pompa di calore una sorgente (quando essa lavora in riscaldamento) o un pozzo (in modalità raffrescamento) di calore. Rispetto all'aria atmosferica la temperatura del suolo ad una certa profondità subisce variazioni annuali molto più contenute: a profondità di 5–10 m la temperatura del suolo è pressoché costante tutto l'anno ed è equivalente all'incirca alla temperatura media annuale dell'aria, ovvero circa 10-15 °C. Ciò significa che il suolo, rispetto all'aria, è più caldo d'inverno e più fresco d'estate, a vantaggio del rendimento della pompa di calore.

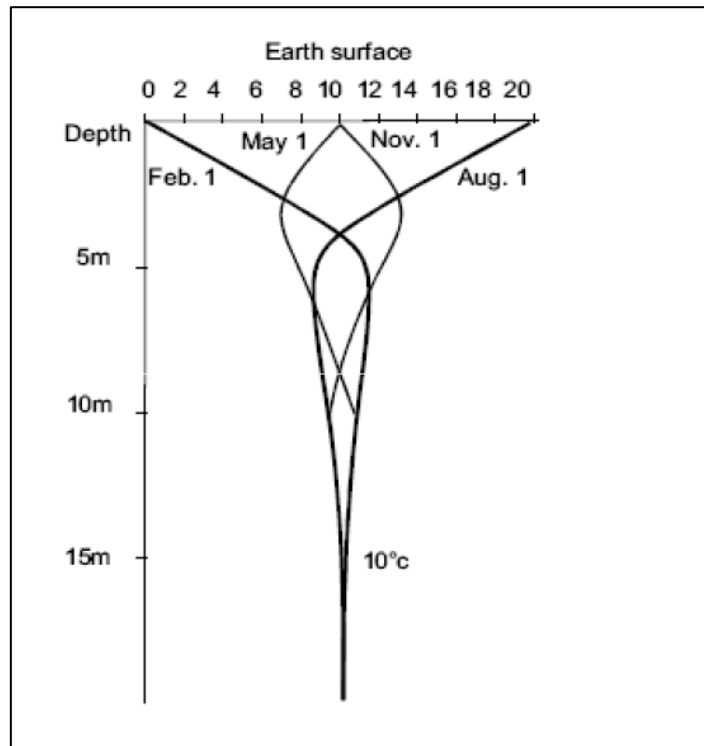


Figura 1. Andamento della temperatura nel sottosuolo

Lo scambio di calore con il sottosuolo può avvenire in tre modi:

- scambio diretto, dove il circuito dell'evaporatore/condensatore della pompa di calore è a diretto contatto con il sottosuolo;
- impianti a circuito chiuso, dove la pompa di calore effettua lo scambio termico col suolo indirettamente, a mezzo di un circuito idraulico nel quale scorre un fluido termovettore;
- impianti a circuito aperto, nei quali viene prelevata acqua di falda sulla quale viene effettuato lo scambio termico.

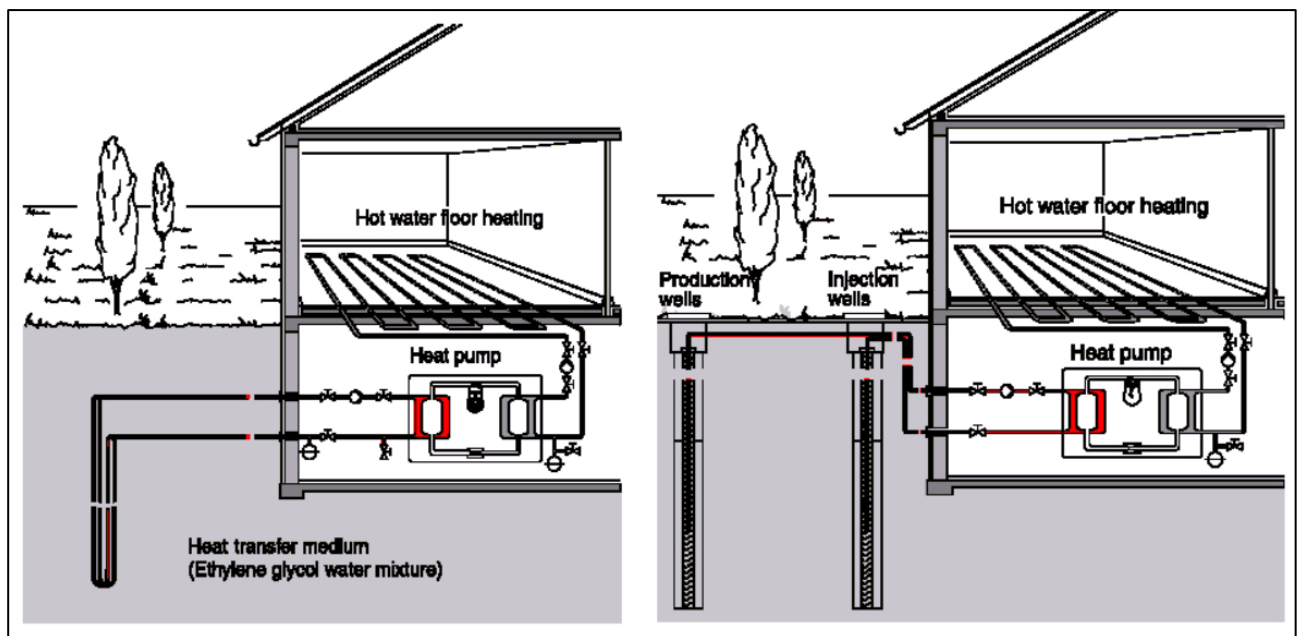


Figura 2. A sinistra un esempio di impianto a circuito chiuso; a destra un esempio di impianto a circuito aperto

2.2.1 Circuito aperto

In un circuito aperto, lo scambio termico avviene con l'acqua di falda. L'acqua prelevata può essere reimpressa in un corpo idrico superficiale, oppure nello stesso acquifero da cui è stata estratta, tramite trincee drenanti o pozzi. I due pozzi (prelievo e reimmissione) devono essere installati a una distanza sufficiente, in modo da evitare la cortocircuitazione termica, che si verifica quando l'acqua termicamente alterata dal pozzo di reimmissione raggiunge il pozzo di prelievo. Una delle problematiche maggiori è proprio quella della reimmissione dell'acqua dopo il suo utilizzo, sia che sia più calda (utilizzata per il riscaldamento) sia che sia più fredda (utilizzata per il raffreddamento). Le soluzioni sono molteplici. L'acqua può essere reimpressa in un corpo idrico superficiale, tenendo però conto di eventuali rischi legati ad aspetti ecologici dovuti alla temperatura dell'acqua immessa; tali rischi derivano dalla chimica dell'acqua prelevata in falda che potrebbe avere caratteristiche differenti a quelle del corpo idrico superficiale; altri rischi sono invece legati ad aspetti idrogeologici e quindi alla dimensione del flusso immesso. Una alternativa è quella di reimmettere il fluido nello stesso acquifero facendo attenzione a non generare una cortocircuitazione termica come già sopra citato. Se ci nella zona fossero presenti più acquiferi una possibilità è quella di prelevare da uno di questi e reimmettere nel secondo. Anche questa procedura non è priva di rischi poiché, oltre ad avere problematiche simili al caso in cui l'acqua venga reimpressa in un corpo idrico superficiale, bisogna aggiungere il fatto che l'acquifero di prelievo possa andare incontro ad esaurimento.

2.2.2 Circuito chiuso

Un metodo per evitare problematiche legate alla reimmissione dei fluidi dopo l'utilizzo e per creare un impianto geotermico anche in assenza di acquiferi o acque superficiali è quello di progettare un impianto a circuito chiuso. In questo tipo di soluzione non avviene scambio di fluidi ma il calore viene prelevato o immesso nel sottosuolo attraverso un sistema di tubazioni all'interno delle quali il fluido circola in un loop continuo. Da un punto di vista tecnologico le soluzioni di impianto possono essere di due tipi, schemi orizzontali o schemi verticali.

Il circuito chiuso orizzontale può essere posato orizzontalmente in una trincea, posta a profondità maggiori di quelle alla quale si può verificare il congelamento del terreno. Il tubo può essere lineare o a spirale. I tubi sono installati a 1–3 m di profondità: maggiore è la profondità di installazione, maggiore sarà l'inerzia termica e migliore il rendimento della pompa di calore. Rispetto alle sonde geotermiche verticali, il rendimento della pompa di calore è più basso, tuttavia i minori costi di installazione rendono comunque competitiva questa soluzione (Dickson & Fanelli, 2004). Una variante del circuito chiuso orizzontale sono gli impianti installati in piccoli stagni, che sfruttano l'inerzia termica dell'acqua.

Un circuito verticale è composto da due o più tubi installati verticalmente nel terreno, che formano un circuito chiuso nel quale scorre il fluido termovettore. La lunghezza della perforazione può essere compresa tra 20 e 200m. Tra le geometrie che possono essere utilizzate per quanto riguarda i tubi all'interno dei quali scorre il fluido, ricordiamo la classica forma a "U" creata usualmente con tubazioni di polietilene ad alta densità (HDPE) dello spessore compreso fra i 32-40 mm. Utilizzando questa geometria bisogna far sì che i tubi di mandata e quelli di ritorno non vengano a contatto così da evitare il raffreddamento del fluido ascendente dovuto al fluido discendente. Per fare ciò vengono utilizzati dei separatori. Infine, i tubi vengono annegati in un grouting geotermico ovvero calcestruzzo preparato con inerti silicei e additivi ad elevata conducibilità termica. Alternativa alla

geometria a “U” è quella che prevede tubazioni a spirale coassiali o meno. Il principio è lo stesso già indicato per le tubazioni a “U”.

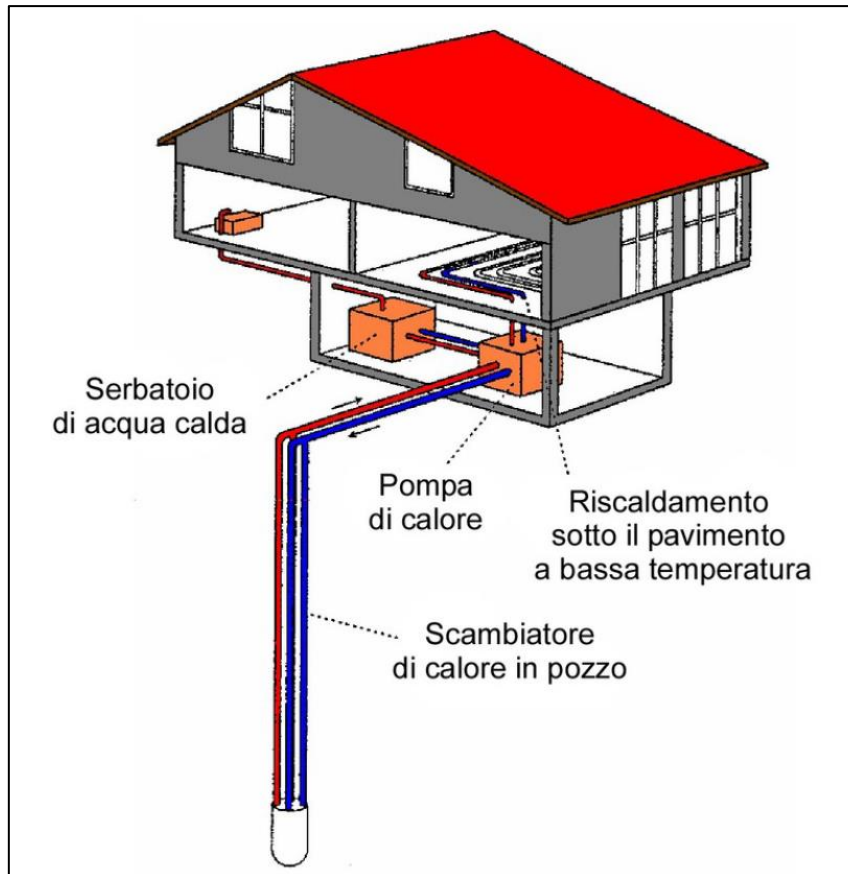


Figura 3. Circuito chiuso verticale (Dickson & Fanelli, 2004)

2.3 Geostrutture energetiche

In questo panorama si collocano perfettamente le geostrutture energetiche. L'utilizzo delle strutture sotterranee come fonti di energia geotermica è iniziato circa trenta anni fa in Austria e si è poi esteso ad altri paesi europei: Svizzera, Germania, Gran Bretagna, Francia, Russia. L'idea è quella di sfruttare strutture esistenti o comunque create per un'altra finalità e utilizzare la loro posizione (ovvero il contatto con il terreno e con l'acqua di falda ad una certa profondità) per ricavare energia geotermica, sotto forma di calore, tenendo a mente che questo è solo un fine secondario. In linea teorica tutte le geostrutture (pali e platee di fondazione, diaframmi, rivestimenti delle gallerie, tiranti) a contatto con il suolo possono essere utilizzate per scambiare calore, nella pratica ci sono strutture più adatte e più performanti di altre.

Le prime ad essere studiate e sfruttate sono state i pali energetici. Il principio è del tutto simile a quello utilizzato nella creazione di circuiti verticali ad hoc. All'interno del palo di fondazione, che presenta una lunghezza variabile in funzione del suo scopo primario, vengono annegate le tubazioni necessarie allo scambio termico. La geometria di queste ultime può essere varia, dalla semplice forma a "U" a più complesse forme elicoidali, nella figura 4 sono riportati due esempi. Rispetto ai circuiti verticali classici, i pali di fondazione hanno un'unica differenza: la loro funzione primaria è quella di sostegno della sovrastruttura e quindi, nella posa e nella scelta delle dimensioni dei tubi, non si può trascurare questo aspetto, in modo da non intaccare le caratteristiche meccaniche della fondazione.

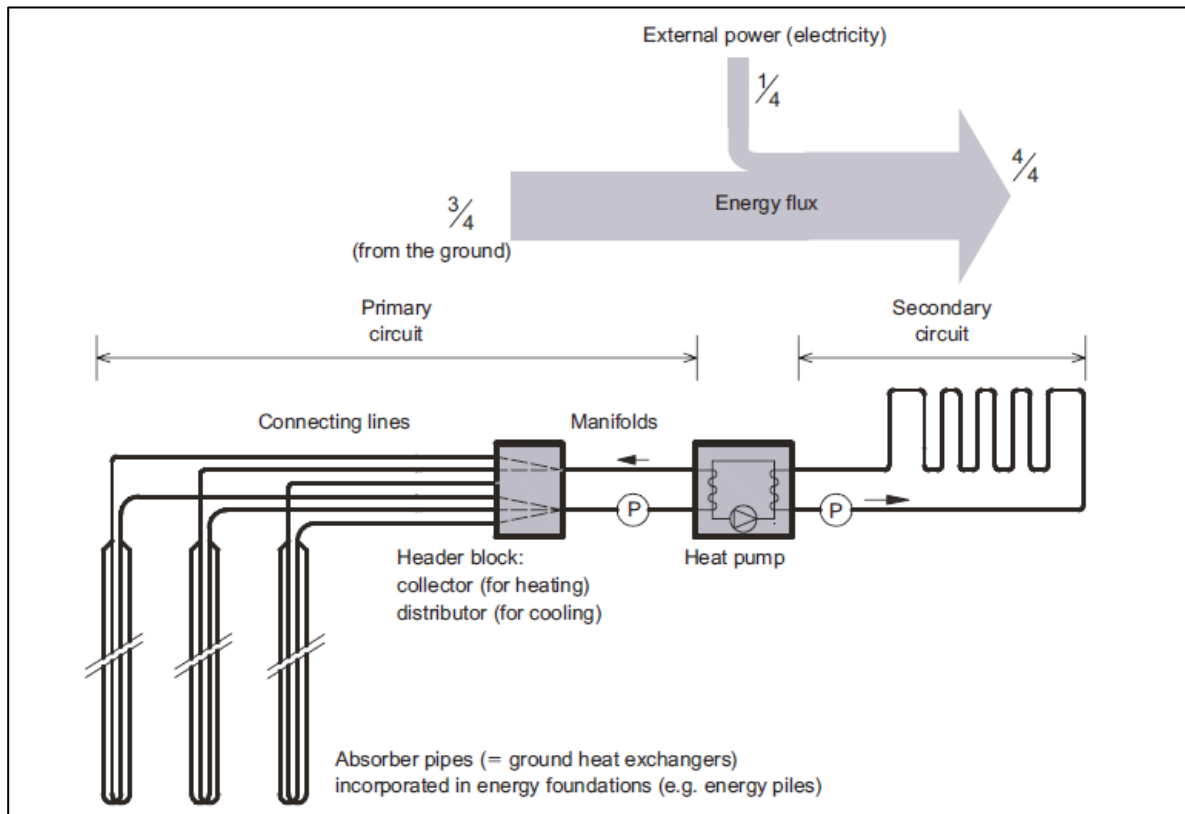


Figura 4. Schema di pali di fondazione energetici (Brandl, 2006)

Un ulteriore aspetto da verificare e tenere sotto controllo è legato alla relativa vicinanza dei pali di fondazione fra loro. Infatti, ponendoci in una ipotetica situazione di falda in movimento (ragionamento simile deve essere fatto anche nel caso di falda in condizione stazionaria), l'efficienza dei pali di fondazione a valle è minore poiché la falda risentirebbe del riscaldamento/raffreddamento dovuto allo scambio termico dei pali a monte.

Un'altra geostruttura impiegata per lo scambio termico è il diaframma. Questa struttura viene utilizzata spesso quando siamo in situazioni in cui viene utilizzato il metodo di scavo chiamato cut and cover dove i diaframmi vengono utilizzati per il sostegno del terreno laterale. Il principio di funzionamento è identico a quello descritto per i pali di fondazione energetici

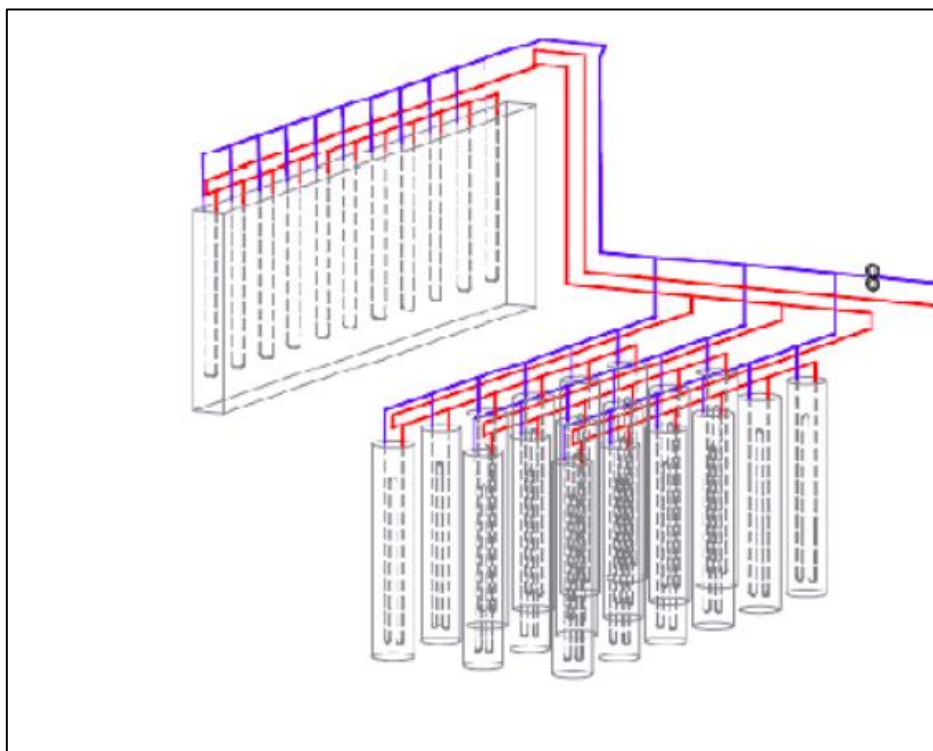


Figura 5. Diaframma e pali energetici (Integrating Geothermal Loops Into The Diaphragm Walls Of The Bulgari Hotel Knightsbridge London)

Infine, di più recente studio, sono nati sistemi per lo scambio termico legati ai supporti in galleria. L'attivazione termica del rivestimento può avvenire principalmente in due modi: per i rivestimenti gettati in opera mediante tubi in polietilene reticolato ad alta densità fissati alle reti poste tra il rivestimento di prima fase e quello definitivo (si tratterà ampiamente più avanti); per i rivestimenti in conci, mediante la prefabbricazione in stabilimento con tubi annegati all'interno del calcestruzzo.

2.3.1 Casi studio di energy tunnel

Come già detto negli ultimi anni gli studi sul problema dell'attivazione energetica dei tunnel stanno crescendo sempre di più. Gli esempi più recenti riguardano applicazioni in Germania (2007) ed in Austria (2009). Ulteriori risultati sono stati ottenuti dallo Studio di fattibilità ENERTUN.

Nel novembre 2007, la galleria per l'alta velocità Katzenbergtunnel in Germania è stata equipaggiata con cinque conci energetici temporanei per il rivestimento. I conci sono stati

temporaneamente connessi realizzando una superficie di scambio termico di circa 60 m² e sono stati attivati per una prova sul campo tra Maggio e Settembre 2009 prima dell'apertura del tunnel. Trascurando la perdita di calore in corrispondenza delle connessioni dei tubi, il flusso di calore determinato è pari a 17-25 W/m². Prendendole invece in conto, il flusso di calore stimato risulta pari a 10 - 20 W/m² (Franzius & Pralle, 2011). I dati ottenuti indicano che l'estrazione del calore influenza una fascia di terreno non superiore a 5 m. Il test è stato effettuato seguendo diverse fasi:

- Fase 0: lettura della temperatura a sistema disattivato (per circa 3 mesi);
- Fase 1: avviene il test di risposta termica (per 4 giorni) in cui il mezzo viene caricato mediante un flusso di calore costante pari a 1 kW incrementato a 1,5 kW dopo 72 h;
- Fase 2: vi è assenza di flusso di calore imposto e valutazione del rilassamento termico del mezzo;
- Fase 3: consiste nella attivazione della pompa di calore (per circa 2,5 mesi) con conseguente estrazione del calore dal messo.

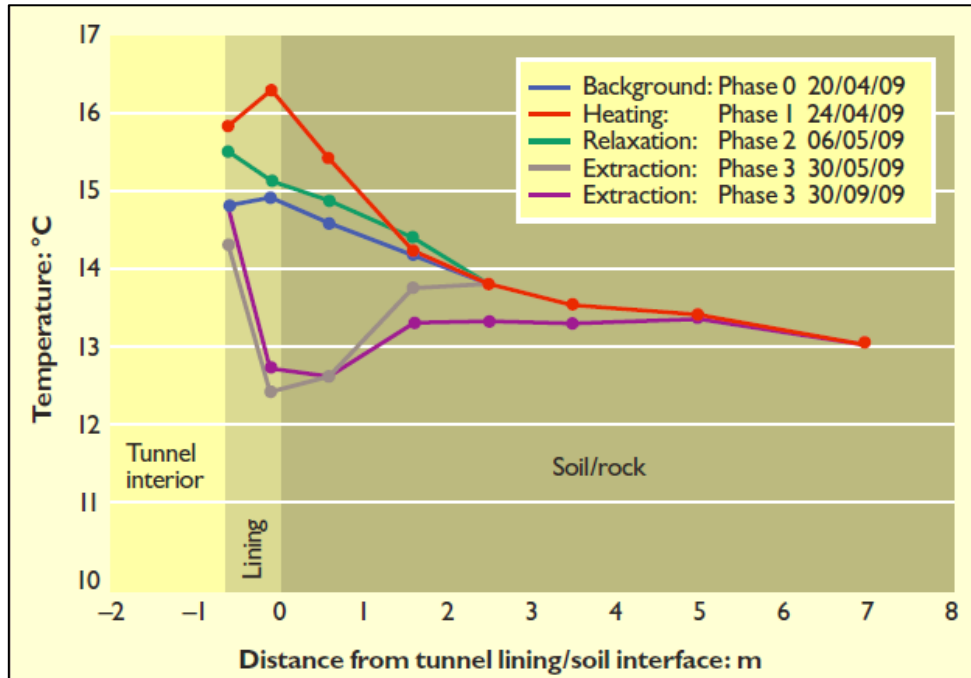


Figura 6. Temperatura del terreno durante la prova (Franzius & Pralle, 2011)

Un altro importante esempio di concio energetico installato in un tunnel scavato meccanicamente attraverso l'uso di TBM è quello presente all'interno del tunnel ferroviario ad alta velocità di Jenbach, in Austria. Una sezione lunga 54 km del tunnel di avvicinamento al tunnel del Brennero è stata equipaggiata con un sistema geotermico che fornisce 40 kW di calore ad un edificio pubblico. Nella Figura 6 si può vedere un modello del concio e la sua effettiva realizzazione. I conci scambiatori di calore sono stati installati con successo nel novembre 2008. L'accoppiamento dei conci adiacenti è stato effettuato dalla TBM e, a scavo completato, il circuito di tubazioni è stato collegato al cunicolo di fuga lungo il piedritto della galleria. In più durante il test di pressione, è stata inserita acqua calda nelle tubazioni per definire gli effetti termici sul rivestimento della galleria, visibili nella seguente figura.

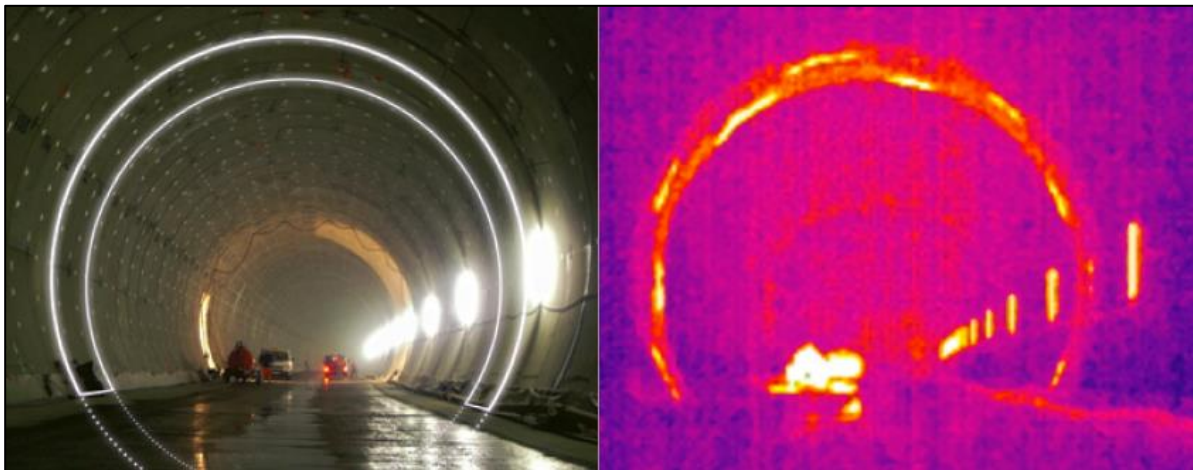


Figura 7. Effetti termici ripresi da telecamera termica durante il pompaggio di acqua calda nelle tubazioni (Frodl & Jan Niklas Franzius, 2010)

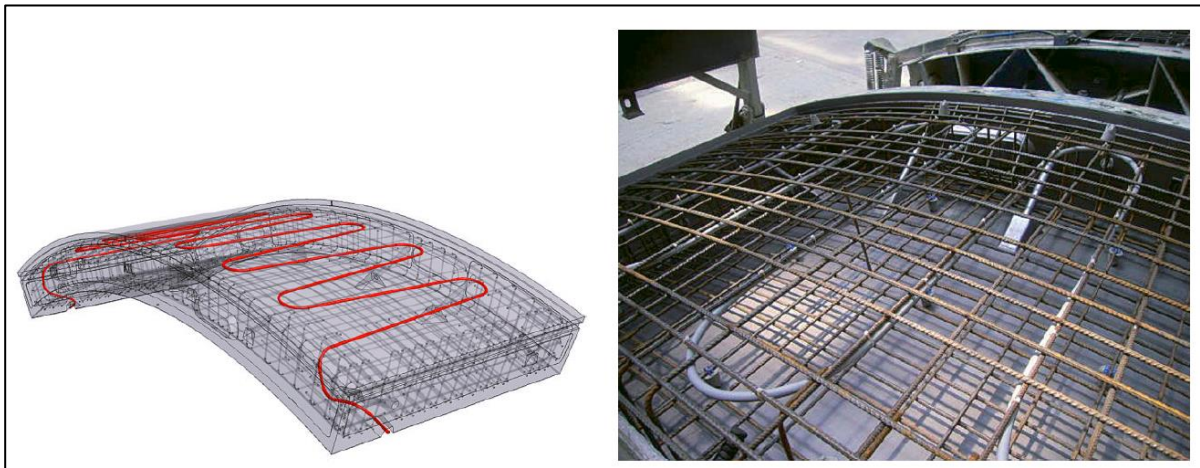


Figura 8. Modello di concio energetico e sua realizzazione (Frodl & Jan Niklas Franzius, 2010)

In questo contesto si è inserito il progetto Enertun che è stato finanziato dalla Regione Piemonte, nell'ambito del Polo di Innovazione Regionale Enermhy e condotto dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino in collaborazione con la Desa Srl. Questo progetto si è interessato dello sfruttamento dell'inerzia termica del terreno in gallerie in ambito urbano, creando un sistema con efficienza maggiore rispetto ai precedenti conci utilizzati. Il nuovo concio energetico modulare prefabbricato (Enertun), per cui è stata depositata domanda di brevetto italiano dal Politecnico di Torino, può essere utilizzato per realizzare rivestimenti ad anelli di gallerie energetiche scavate con TBM. Come accennato, grazie a una disposizione innovativa delle sonde geotermiche è possibile ridurre le perdite di carico e aumentare l'efficienza di scambio termico. Nel sistema Enertun, ogni anello di rivestimento presenta al proprio interno una rete di tubi. L'anello di rivestimento ha uno spessore di 30 cm e i tubi in polietilene in grado di trasportare il fluido termovettore possono essere inseriti sull'estradosso esterno, a 10 cm dal bordo, con spaziatura di 30 cm, diametro esterno di 25 mm e spessore di 2,3 mm. I tubi per queste applicazioni sono realizzati in polietilene reticolato ad alta densità. Le pareti del tubo sono costituite da tre strati concentrici: uno strato più interno è costituito da polietilene ad alta densità, uno strato intermedio in materiale polimerico ed uno strato esterno impermeabile all'ossigeno e costituito da

copolimeri in etil vinil alcol (EVOH). I tubi sono in grado di resistere ad alte pressioni, temperature ed alla corrosione. La connessione dei tubi tra un concio e l'altro e con la condotta di mandata e ritorno avviene, dopo la posa, tramite appositi manicotti che rimangono facilmente ispezionabili.

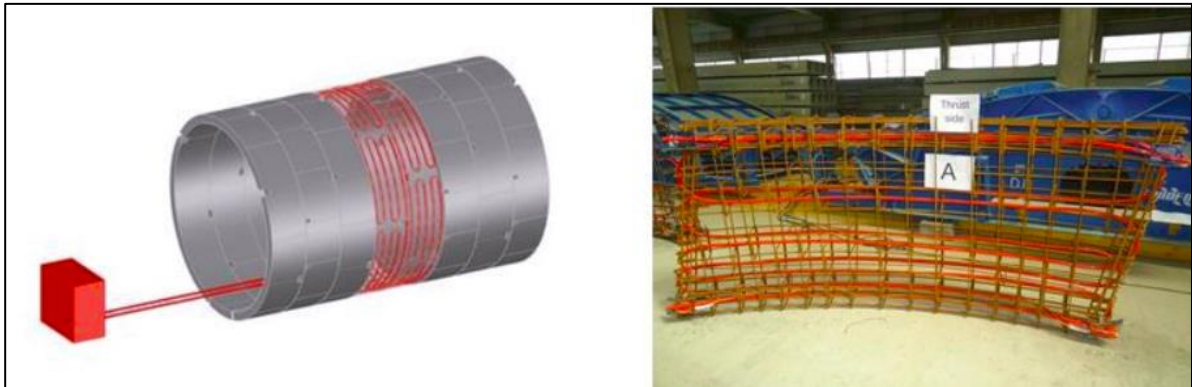


Figura 9. Modello concio energetico e sua realizzazione (ENERTUN)

Le condizioni operative del sistema geotermico sono state simulate facendo circolare il fluido termovettore nei tubi ad una temperatura e velocità iniziale assegnate e frutto di uno studio di ottimizzazione (temperatura compresa tra 4 e 28°C rispettivamente in inverno e in estate e velocità di 0,4 m/s), ottenendo i seguenti risultati.

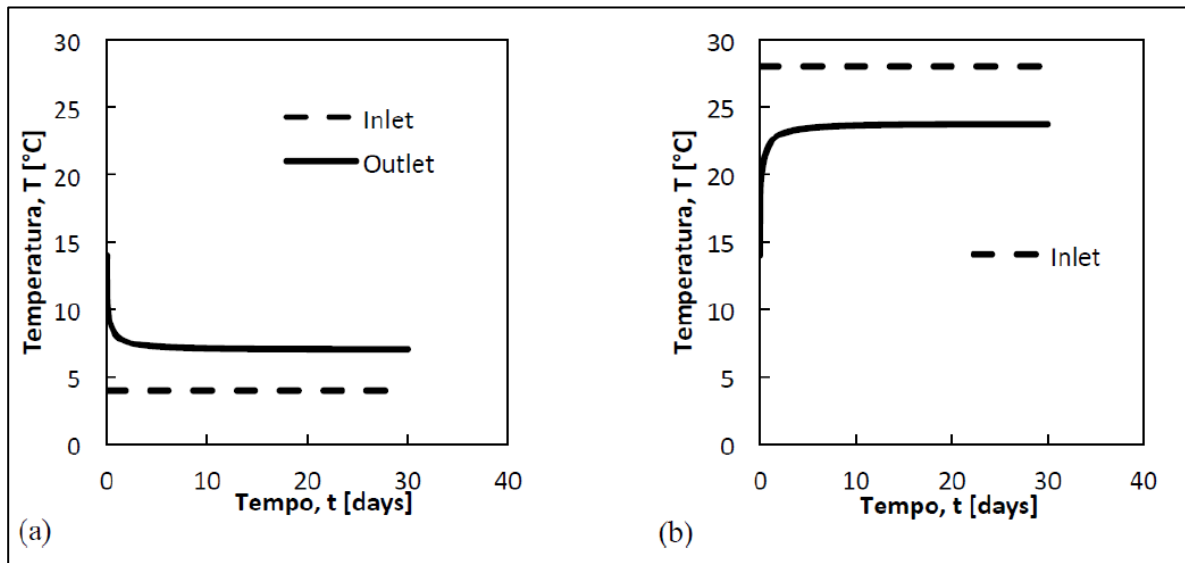


Figura 10. Temperature di ingresso e uscita nella condizione invernale (a) e nella condizione estiva (b) (Barla & Di Donna, Gallerie energetiche in ambiente urbano, 2015)

La quantità di calore (espressa in W) che si può scambiare può essere calcolata dalla differenza tra la temperatura di ingresso e quella di uscita (risultato della modellazione numerica) del fluido termovettore dal circuito mediante la seguente relazione:

$$Q = mc_w |T_{wo} - T_{wi}|$$

Dove:

- m è la velocità di flusso massica $[kg/s]$;
- T_{wo} indica la temperatura del flusso uscente (calcolata);
- T_{wi} indica la temperatura del flusso entrante (imposta);
- c_w indica il calore specifico dell'acqua $(4.186 \frac{kJ}{kg K})$.

Sulla base de risultati ottenuti, dopo trenta giorni di simulazione la differenza di temperatura calcolata è compresa tra 3 e 4 °C. Questo delta termico corrisponde ad un calore scambiabile pari a 1.7 kW in inverno e 2.3 kW in estate. In definitiva il calore scambiabile per unità di superficie e lunghezza e riportato in figura.

Stagione	Potenza totale scambiata, Q [kW]	Potenza scambiata al metro quadro, Q [W/m ²]	Potenza scambiata per metro lineare di galleria, Q [W/m]
Inverno	1.67	52.76	1193.42
Estate	2.34	73.87	1670.81

Figura 11. Potenza scambiata dal sistema ENERTUN (Barla & Di Donna, Gallerie energetiche in ambiente urbano, 2015)

2.4 Generalità sullo scambio termico

Alla base dei sistemi di scambio termico che son stati presentati precedentemente a titolo di esempio e che verranno presentati successivamente come vero e proprio oggetto di studio di questo lavoro di tesi, vi è un processo fisico relativamente complesso che è quello dello scambio termico. Per trasmissione del calore (o scambio termico) si intende il trasferimento di calore e quindi di energia termica tra due sistemi, che è causato da una differenza di temperatura tra i due. Generalmente nei processi fisici questo scambio può avvenire secondo tre modalità:

1. Conduzione: si intende la trasmissione di calore che avviene in un mezzo solido, liquido o aeriforme (all'interno di un corpo solo o due corpi tra loro in contatto) dalle zone a temperatura maggiore verso quelle con temperatura minore. Questo fenomeno avviene senza che ci sia trasporto macroscopico di materia;
2. Convezione: è un tipo di trasporto di materia ed energia assente nei solidi e trascurabile per i fluidi molto viscosi, causato da un gradiente di pressione e dalla forza di gravità e caratterizzato da moti di circolazione interni al fluido;
3. Irraggiamento: si intende il trasferimento di energia tra due corpi per mezzo di onde elettromagnetiche e quindi può manifestarsi anche in assenza di materia, ovvero nel vuoto.

Per quanto riguarda un sistema a circuito chiuso, che rappresenta la tipologia di tecnologia che sarà usata nelle soluzioni proposte, il trasferimento di calore può avvenire in due modi diversi, conduzione e convezione, tralasciando dunque il contributo dell'irraggiamento che

risulta essere nullo. Queste due modalità base di trasferimento si manifestano principalmente nei modi seguenti:

- Conduzione attraverso la fase solida;
- Convezione attraverso la fase fluida;
- Dispersione nella fase fluida.

Il trasporto di calore dovuto alla conduzione è regolato dalla legge di Fourier. In più la formulazione può essere semplificata poiché ci troviamo nel caso di simmetria rispetto all'asse della tubazione. Quindi la legge di Fourier in coordinate cilindriche risulta essere:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dove:

- r indica il raggio [m];
- z indica l'altezza [m];
- λ indica la conducibilità termica [W/mK];
- ρc indica la capacità termica volumetrica [J/m^3K]

Nel caso di tubazioni immerse nella malta cementizia che a sua volta è a contatto con il terreno, la conduzione avviene per tre volte e partendo dall'esterno (lato terreno) si avrà:

1. conduzione nel terreno;
2. conduzione attraverso la malta cementizia;
3. conduzione attraverso le pareti delle tubazioni.

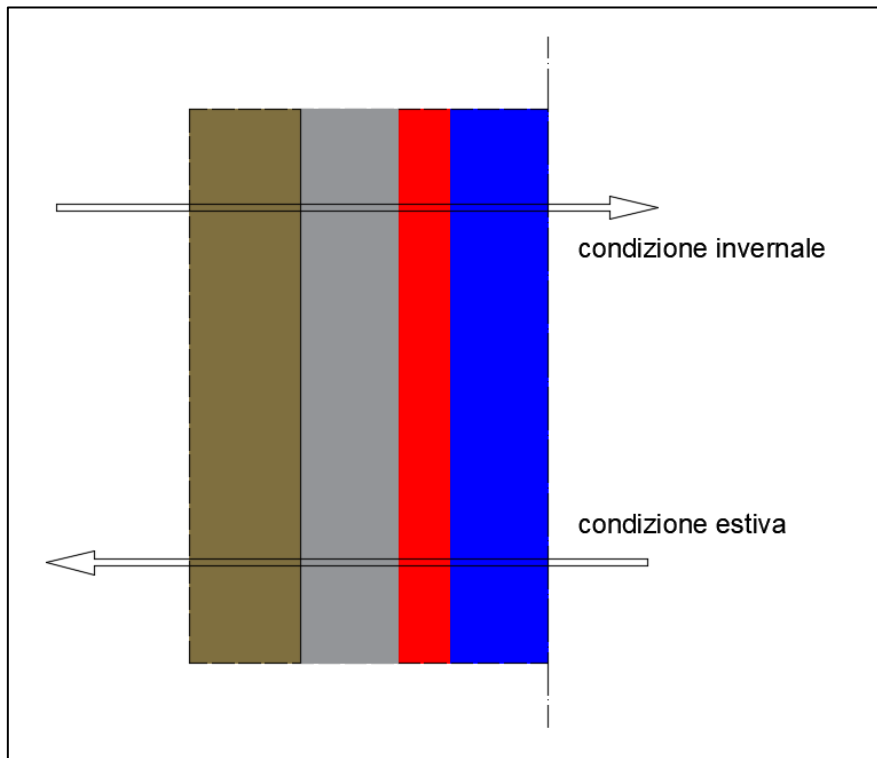


Figura 12. Flusso di calore nella situazione invernale e nella situazione estiva. In marrone è indicato il terreno, in grigio la malta cementizia, in rosso la tubazione e in blu il fluido termovettore.

Il fenomeno della convezione regola invece lo scambio termico nell'anulus tra il fluido freddo ed il tubo caldo (o viceversa se la situazione è quella estiva), dove però avvengono anche fenomeni di dispersione termica. Questo è il principale motivo della limitata dimensione di detti tubi, il cui diametro può variare da 20 a 40 mm.

Nel caso in cui il mezzo poroso all'interno del quale i tubi sono inseriti (il terreno) fosse saturo, ovvero in presenza di falda, il flusso di energia è la somma dei flussi di calore attraverso la fase fluida e solida; la conduttività termica λ , in prima approssimazione, assumendo il mezzo omogeneo ed isotropo, può essere scritta come:

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

Dove:

- n indica la porosità [-];
- λ_s e λ_f indicano rispettivamente la conduttività termica del solido e del fluido [W/mK]

Il fenomeno risulta essere ancora più complesso nel momento in cui la falda sia in movimento. In questo caso il flusso trasla il campo di temperatura nella direzione del movimento della falda e quindi il problema per essere risolto deve essere diviso in due sotto modelli; il problema globale che riguarda l'influenza a lungo termine della falda e che è funzione della geometria del problema, delle temperature in gioco e della velocità apparente della falda; il problema locale che riguarda l'influenza a corto periodo del flusso del fluido del sottosuolo. Tale problema può essere risolto con l'aiuto del numero di Nusselt associato ad un cilindro immerso in un mezzo poroso e sottoposto a una falda che si muove. In ogni caso, come vedremo nei risultati successivi, la presenza della falda in movimento è un fattore che contribuisce in modo positivo allo scambio di calore fra terreno e fluido vettore.

Come si può notare dalle formulazioni uno degli aspetti che rientra nel calcolo è il tempo. Facendo scorrere un fluido a temperatura più alta o più bassa del terreno in funzione della stagione, si sviluppa una differenza di temperatura tra il fluido ed il suolo. Questa ΔT (nel caso che studieremo sarà 12°C nella stagione invernale e 16°C nella stagione estiva) diminuisce fino a che non si arriva ad un regime di flusso stazionario, per cui la differenza di temperatura rimane stabile e costante fino a quando continua il flusso nella tubazione. Per quanto riguarda il modello che sarà studiato successivamente il tempo necessario a raggiungere la condizione stazionaria di flusso è circa di 30 giorni, passati i quali la temperatura del fluido in uscita rimane costante nel tempo.

3 Scavo di gallerie sotterranee

Per una adeguata progettazione e scelta della tipologia di sistema geotermico da applicare al tunnel preso in considerazione non si può prescindere da aspetti tecnici e tecnologici legati alla metodologia di scavo del tunnel stesso. A sua volta il metodo di scavo utilizzato è determinato dalle condizioni geologiche del sito. Una prima suddivisione può essere fatta valutando le caratteristiche tecniche del terreno all'interno del quale avverrà lo scavo. Distinguiamo fra:

- Tunnel in terreno morbido (roccia debole)
- Tunnel in terreno duro (roccia resistente)

Come si può facilmente capire, un attento ed esaustivo lavoro di investigazione preliminare è assolutamente necessario per distinguere fra le due situazioni.

Una volta stabilito la natura del terreno le due principali strade percorribili per lo scavo sono:

- Metodo convenzionale
- Metodo meccanizzato (TBM)

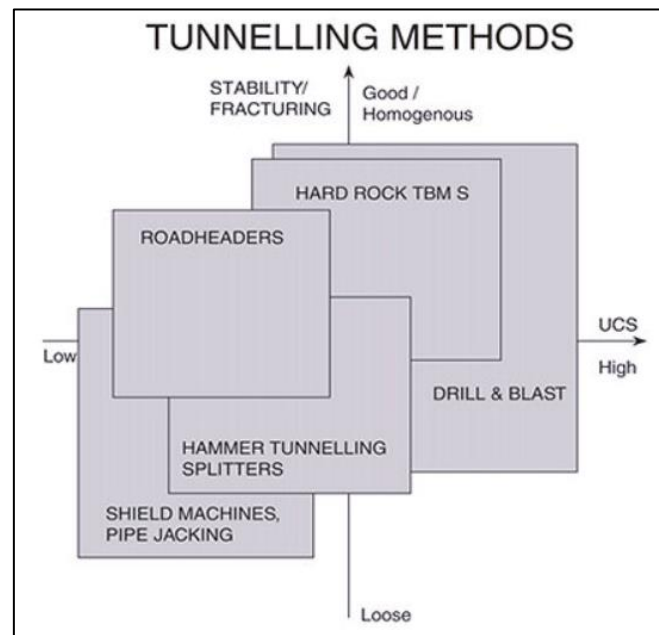


Figura 13. Metodi di scavo in funzione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso

3.1 Metodo convenzionale

La definizione di metodo convenzionale è alquanto arbitraria, prenderemo in considerazione come “convenzionale” il caso in cui il processo costruttivo sia ciclico e seguirà le seguenti fasi:

1. Scavo utilizzando il metodo drill and blast o con escavatore meccanico (scavo puntuale);
2. Rimozione dei detriti;
3. Posizionamento del sistema di supporto preliminare.

Queste operazioni vengono eseguite in modo ciclico facendo seguire allo scavo il posizionamento del supporto preliminare. Il sistema ciclico conferisce un grosso vantaggio in situazioni in cui le caratteristiche del terreno non sono omogenee e quindi richiedono l'utilizzo di macchine con caratteristiche diverse. Quindi il metodo convenzionale rappresenta in siti dove la variabilità delle caratteristiche è ampia la soluzione più vantaggiosa dal punto di vista operativo e probabilmente la più economica. In più è un metodo conveniente nel caso di tunnel brevi, con sezioni di geometrie particolari (non

circolari) o in tunnel di difficile accesso. Altri aspetti vantaggiosi di uno scavo di questo tipo sono: la possibilità di continua indagine durante i lavori in tutte le direzioni; la possibilità di variare le geometrie della sezione, aspetto che risulta importante quando la natura del servizio che sarà posizionato all'interno del tunnel o quando le condizioni geotecniche lo richiedono; come già accennato, la flessibilità nelle operazioni che possono variare a seconda delle modificazioni dei parametri del terreno durante l'avanzamento. I metodi di scavo per il metodo convenzionale sono fondamentalmente due:

1. Drill and blast, usato principalmente in rocce dure e con buone caratteristiche meccaniche;
2. Scavo meccanico mediante escavatori con fresa ed escavatori con pala, usato principalmente in terreni meno duri e rocce deboli.

Utilizzando il metodo convenzionale bisogna tener presente che entrambi i metodi possono essere utilizzati durante lo sviluppo di un progetto in funzione della variazione delle caratteristiche del terreno.



Figura 14. Esempio di Drill and Blast e scavo con escavatore (rispettivamente a sinistra e a destra) (Working Group 19, aprile 2009)

3.1.1 Drill and Blast

Dopo aver scelto il metodo drill and blast come il più consono per il progetto da sviluppare, uno dei primi aspetti progettuali da affrontare è quello di andare a creare uno schema adeguato di posizionamento delle cariche esplosive, il cosiddetto “blasting scheme”. Gli schemi adottabili sono molteplici e sono funzioni di molti parametri tra cui, la forma della sezione, la dimensione della sezione, proprietà della roccia, esplosivo disponibile e relative caratteristiche, presenza di acqua, equipaggiamento per i fori e possibili restrizioni legate alle vibrazioni sviluppate conseguentemente alla esplosione. Dopo aver delineato questo aspetto avviene la perforazione vera e propria. La perforazione avviene in modo meccanizzato e l’equipaggiamento è funzione della dimensione e dalla posizione dei buchi richiesti dallo schema definito in precedenza. A questo punto avviene la vera e propria carica della volata. Durante e subito dopo questa operazione è di fondamentale importanza un adeguato impianto di ventilazione per permettere ai fumi della esplosione e alle polveri derivanti dalla frammentazione del materiale di essere allontanati. Quindi si passa alla rimozione di parte del materiale che blocca l’avanzata. Ora, in funzione della accuratezza della posizione dei fori creati nella fase precedente vi sarà l’operazione di riprofilatura della sezione ed eventuali aggiustamenti dovuti alla non aderenza con la geometria richiesta dal progetto. Un altro scopo della riprofilatura è quello di eliminare eventuali blocchi instabili e di regolarizzare le superfici per permettere un migliore posizionamento dei supporti interni. Infine, prima del posizionamento di eventuali supporti, vi sarà la completa rimozione del materiale frantumato per permettere l’avvicinamento alla faccia e l’inizio di un nuovo ciclo.

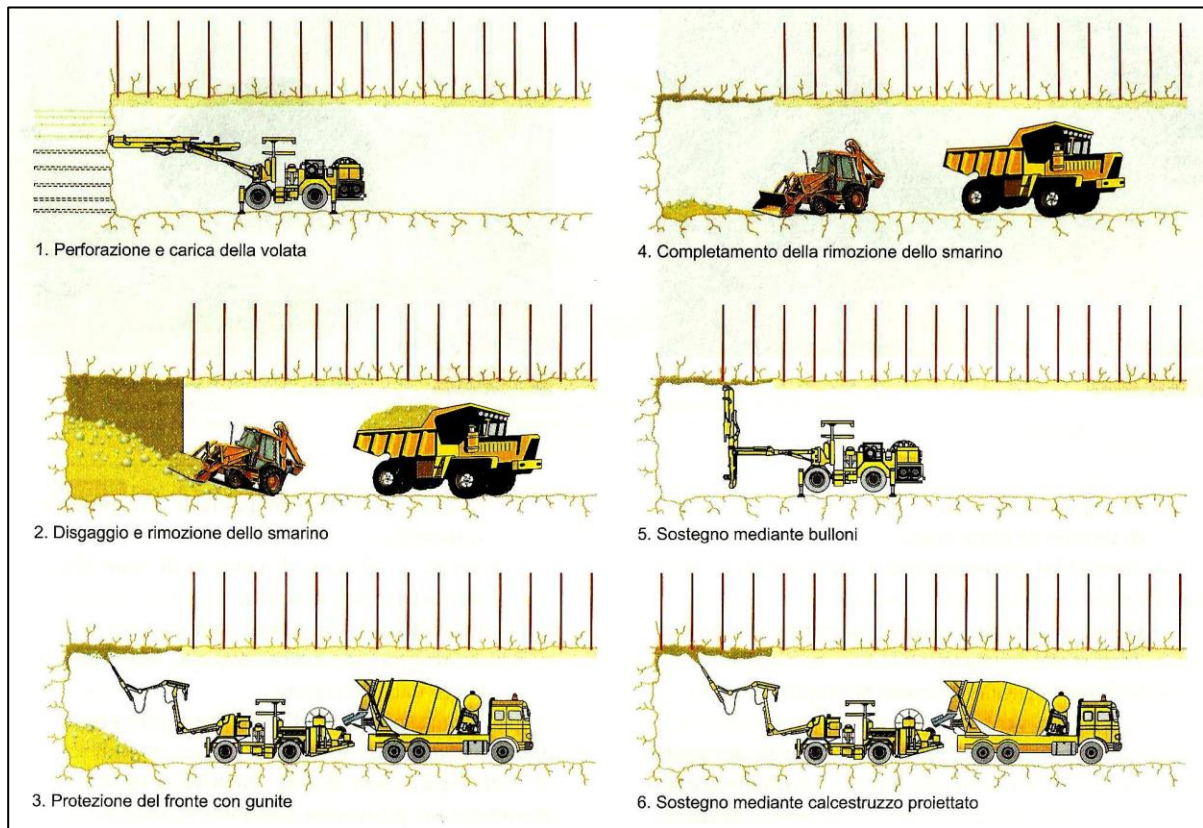


Figura 15. Schema del ciclo di scavo con metodo Drill and blast

3.1.2 Scavo meccanico mediante escavatori

Le operazioni per questa tipologia di procedura sono molto simili a quelle viste nel paragrafo precedente relativamente a drill and blast. La differenza sostanziale risiede nel fatto che la facciata non viene frantumata tramite esplosivo ma attraverso escavatori con fresa che permettono lo scavo in terreni relativamente morbidi. Un aspetto positivo di questa metodologia di scavo è la più semplice gestione delle polveri, ovviamente i fumi derivanti dalla esplosione in questo caso sono assenti; non è necessario un impianto di ventilazione ma le polveri dovute alla frammentazione del materiale vengono semplicemente trattate attraverso acqua che legandosi alle particelle volatili permette una depurazione dell'ambiente di lavoro. Infine, aspetto che soprattutto in ambiente urbano può ricoprire un ruolo molto importante, il non utilizzo di esplosivi evita problematiche legate alle vibrazioni.

3.1.3 Sequenza di scavo

Come è possibile vedere in figura 11, lo scavo è possibile sia full-face sia parziale ovvero scavando tutta la sezione contemporaneamente oppure utilizzando svariate tecniche di divisione per garantirne la stabilità e la sicurezza durante le operazioni di scavo.

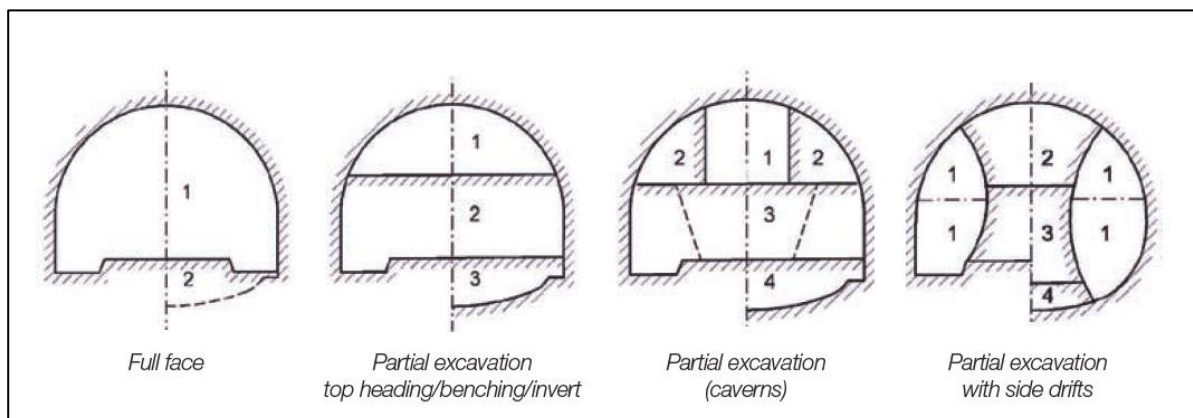


Figura 16. Alcune possibili sequenze di scavo (Working Group 19, aprile 2009)

Lo scavo integrale è utilizzato per sezioni di dimensioni più piccole e in presenza di terreno in buone condizioni anche se con il progredire della tecnologia applicata ai macchinari è possibile approcciarsi a sezioni anche più grandi. Un aspetto molto vantaggioso di questa tipologia sta nel fatto che il supporto può essere immediatamente posto a ridosso della faccia dello scavo che a sua volta deve essere messa in sicurezza se necessario con bullonature. Se invece la sezione è relativamente grande o in presenza di un materiale con scadenti caratteristiche tecniche lo scavo deve essere effettuato suddividendo la sezione in diverse parti da scavare in tempi diversi. Le tecniche di suddivisione sono molteplici e dipendono da aspetti geotecnici e da aspetti legati alla geometria della sezione.

3.1.4 Stabilità dello scavo

Parlando di scavi in convenzionale possiamo distinguere fra due situazioni:

1. Ammassi rocciosi autoportanti
2. Ammassi rocciosi non autoportanti

Nel primo caso le problematiche si riducono al supporto di eventuali blocchi che possono staccarsi durante o successivamente le opere di scavo e che non prevedono importanti opere di sostegno.

Nel secondo caso la situazione risulta essere più complicata e richiede delle azioni per garantire stabilità dello scavo. Le operazioni di preconsolidamento permettono di procedere allo scavo in condizioni di sufficiente sicurezza. Tali operazioni riguardano il contenimento del livello d'acqua mediante drenaggi, l'eliminazione o la deviazione di corsi d'acqua sotterranei che interferiscono con lo scavo, il controllo di infiltrazioni e la stabilizzazione del terreno. Possiamo suddividere le opere di preconsolidamento in quattro gruppi:

- Opere di miglioramento della qualità del terreno: azioni che hanno come obiettivo quello di migliorare l'ammasso roccioso sotto un punto di vista meccanico. Rientrano in questa categoria le iniezioni di fluidi cementanti che vanno a riempire gli spazi intergranulari, il Grouting (l'iniezione di una miscela liquida sotto pressione negli spazi vuoti del suolo, tra le fessurazioni delle rocce, in cavità artificiali, dietro i rivestimenti di una galleria, ecc... Il liquido col passare del tempo si solidifica per effetto di reazioni chimico-fisiche. Lo scopo è duplice: da un lato rendere impermeabile il terreno all'acqua e dall'altro di incrementare la resistenza del terreno trattato) il jet grouting (con il termine "Jet grouting" si intende la realizzazione di colonne che, a partire dal perimetro dello scavo, si sviluppano oltre il suo fronte d'avanzamento e permettono di preconsolidare la zona di scavo, in presenza di terreni incoerenti o debolmente coesivi. Tali colonne sono ottenute iniettando una miscela cementizia, attraverso piccoli ugelli, con pressioni molto elevate. Le tecniche prevedono di disgregare il terreno miscelandolo con una sospensione cementizia o, in aggiunta, anche di rimuoverne la frazione più fine con effetto di parziale sostituzione) e il congelamento, ovvero si porta l'acqua presente

all'interno dell'ammasso roccioso a congelamento per sfruttare le migliori caratteristiche tecniche del ghiaccio (risulta comunque essere un'operazione molto costosa e da utilizzare in casi estremi);

- **Rinforzi:** il rinforzo del terreno prevede l'applicazione di metodi che utilizzano l'inserimento di elementi strutturali con una dimensione predominante. I metodi principali sono le chiodature ad ombrello o infilaggi (questa tecnica consiste nello scavare una serie di fori di 10-12 cm di diametro e distanziati tra loro di 20 cm lungo il perimetro della galleria in cui vengono infilati dei tubi in acciaio di circa 140 mm con un'inclinazione di 5-6 ° rispetto l'asse della galleria. In tal modo da creare un ombrello protettivo sotto il quale si possono svolgere le normali operazioni di scavo e consolidamento per una lunghezza di 6-10 m.), le bullonature frontali e le bullonature radiali;
- **Presostegni:** a differenza delle precedenti operazioni, i presostegni non vanno a modificare le caratteristiche del terreno ma vanno fisicamente a sostenere la sezione più a ridosso del fronte di scavo. I sistemi possono essere di tipo metallico o di calcestruzzo;
- **Drenaggi:** questa azione ha come scopo quello di drenare l'acqua, fonte di instabilità, dallo scavo, diminuendone la pressione e l'azione spingente. Quindi in presenza di acque, per limitarne l'influenza il drenaggio delle stesse è un metodo che può essere considerato economico. La tecnica di base prevede la perforazione di un serie di pozzi su entrambi i lati della galleria con lo scopo di abbassare il livello idrico e quindi diminuire la pressione dell'acqua lungo il tracciato, utilizzando pompe sommergibili o in aspirazione.

3.1.4.1 Supporto preliminare

Dopo le operazioni di consolidamento, scavo, riprofilatura e rimozione del materiale il terreno potrebbe aver bisogno di un supporto preliminare e poi successivamente di un supporto definitivo. Le scelte in questa fase sono strettamente correlate alla condizione geologica del sito e dalle caratteristiche del materiale. Più in particolare le caratteristiche dell'ammasso roccioso che intervengono nella scelta sono:

1. La resistenza a compressione uniassiale;
2. Il numero e l'orientazione delle famiglie di discontinuità;
3. La frequenza delle medesime.

Altri aspetti che sono da tenere in conto in questa fase decisionale sono l'alterazione della roccia, il possibile rigonfiamento, l'idrologia (battente d'acqua e permeabilità dell'ammasso) e la geometria della galleria.

Lo scopo del supporto preliminare è di stabilizzare lo scavo fino alla eventuale installazione del supporto definitivo, senza dimenticare che uno degli scopi principali è quello della sicurezza della zona di lavoro e degli operai. Gli elementi più comuni utilizzati per il supporto preliminare sono:

- Bullonature;
- Rivestimento pellicolare (che può essere rinforzato attraverso fibre o reti metalliche);
- Nervature d'acciaio;
- Reti metalliche;

Queste soluzioni possono essere utilizzate singolarmente oppure in combinazione fra di loro.

Le nervature in acciaio (centine) sono strutture costituite da spezzoni di profilati metallici curvi che cercano di seguire l'andamento della galleria. Il montaggio procede dal basso verso l'alto a partire dal piedritto della centina. Il piedritto poggia generalmente su un cordolo di calcestruzzo o su un altro profilato in acciaio. I profilati usati sono di vario tipo e geometria: a doppia T, a U, a V o scatolato. Una ulteriore soluzione è rappresentata dalle centine reticolari che sono formate da tondini collegati fra loro a creare una struttura

reticolare, leggera ma allo stesso tempo relativamente resistente. Più in generale questo tipo di supporto si può suddividere in due famiglie, le centine rigide (molto resistenti e che non permettono la deformazione della struttura stessa) e le centine deformabili (la deformabilità può derivare dal materiale o possono essere disposti elementi plasticizzanti lungo la sezione; questa soluzione può essere utilizzata quando un restringimento della sezione del tunnel può essere accettabile).

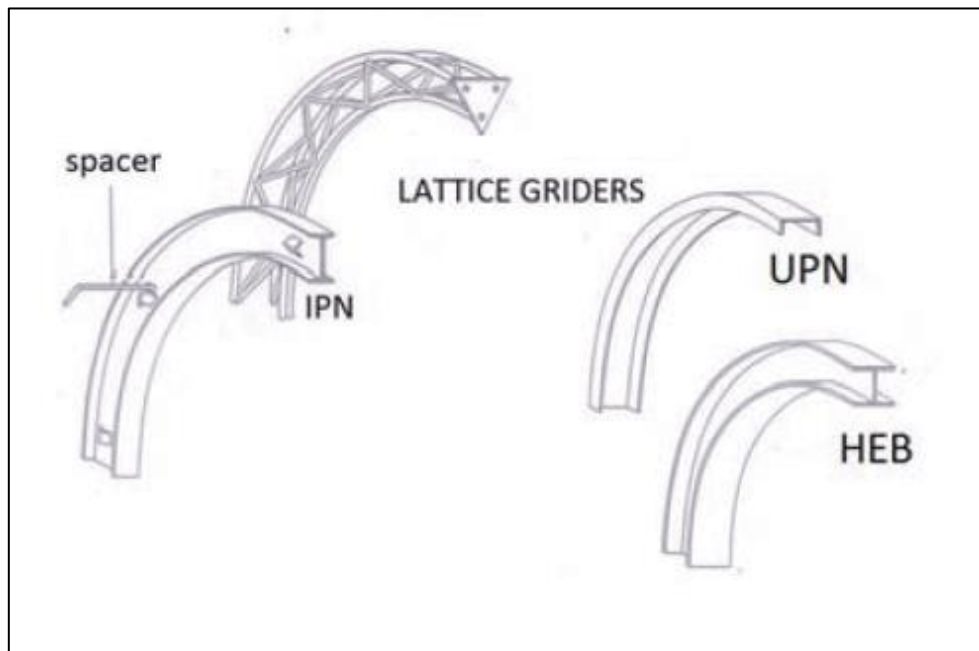


Figura 17. Alcune tipologie di centine utilizzabili

I rivestimenti pellicolari si distinguono principalmente in calcestruzzo proiettato e gunite. Quest'ultima è una malta di cemento contenente un acceleratore di presa ed è costituita da elementi fini ($< 5\text{mm}$). Il calcestruzzo proiettato è un vero e proprio conglomerato cementizio con dimensioni anche maggiori, fino a 30 mm. Il suo scopo fondamentale è quello di impedire forti scorrimenti sulla superficie di discontinuità quando la roccia sia molto fratturata e per evitare la caduta di piccoli frammenti di roccia. Il calcestruzzo proiettato viene molto spesso utilizzato in combinazione con un'armatura a maglie di acciaio o con bullonature. Oltre al miglioramento delle caratteristiche meccaniche questo rivestimento rappresenta anche una protezione dagli agenti atmosferici e quindi prevengono l'alterazione dell'ammasso roccioso. Le miscele vengono messe in opera con apposite lance sulle pareti e sulla volta della galleria. Il fluido motore è spesso costituito da aria compressa. Si distinguono due tecniche di proiezione, quella a secco (nella quale l'acqua è

aggiunta all'eiettore) e quella a umido (nella quale l'acqua viene miscelata a monte della pressurizzazione). L'incertezza è maggiore sul primo metodo in quanto la quantità d'acqua è modificabile direttamente dall'operatore e quindi si ha meno controllo sulle effettive proporzioni. Più recentemente è stato introdotto il calcestruzzo fibrorinforzato; fra le fibre che possono essere utilizzate ricordiamo il vetro, il polipropilene, acciaio, leghe metalliche e fibre di nylon. Le fibre vengono direttamente introdotte nella miscelatrice e un aspetto molto importante è la dosatura per garantire le adeguate proprietà meccaniche e lavorabilità.

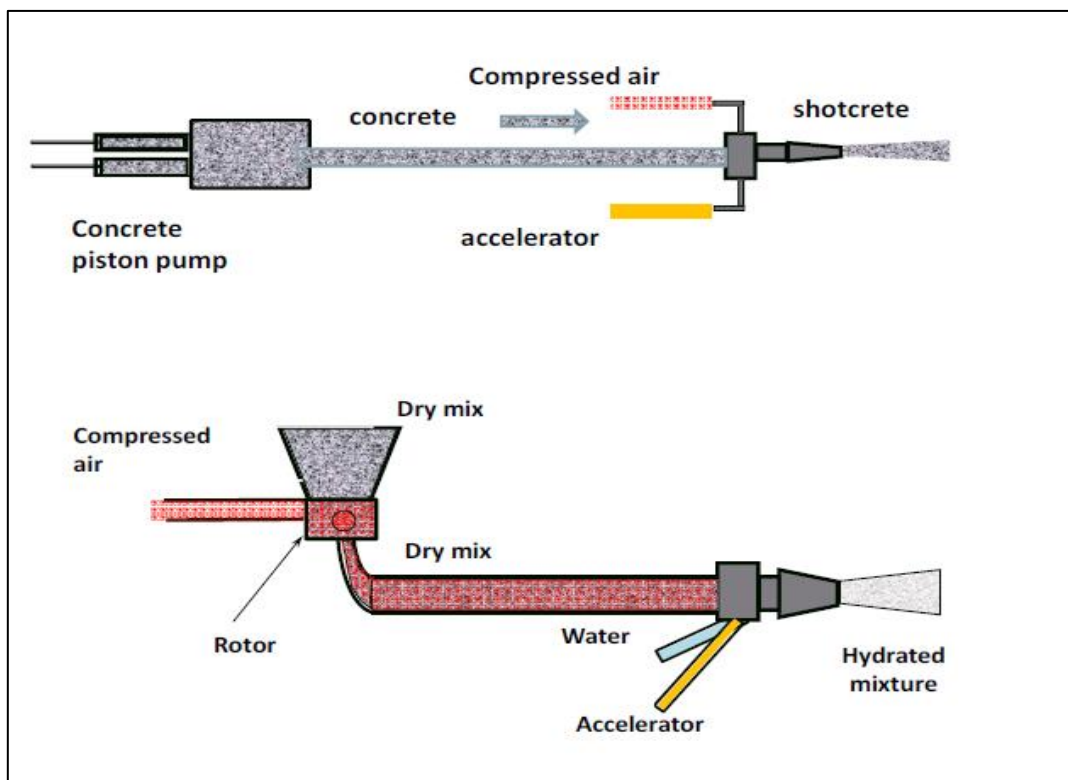


Figura 18. Schema di proiezione umida e a secco (rispettivamente sopra e sotto)

Le bullonature costituiscono un mezzo molto adoperato sia da solo che in unione con altri sistemi. Il bullone costituisce un'armatura che serve a mantenere il contatto tra la superficie scavata e l'interno della roccia. Da un punto di vista tecnologico il bullone si divide in testa, asta e un sistema di ancoraggio. È proprio facendo riferimento a quest'ultima parte che possiamo distinguere tre famiglie di bulloni:

1. Bulloni ad ancoraggio localizzato: è un sistema di tipo meccanico che è generalmente realizzato attraverso l'espansione di un guscio d'acciaio. La messa in opera è rapida e l'efficacia è immediata ma d'altro canto subisce il fenomeno di deformazione a carico costante e l'asta è da proteggere in ambienti corrosivi;
2. Bulloni ad ancoraggio ripartito: in questo caso il collegamento fra bullone e roccia avviene lungo tutta l'asta attraverso l'utilizzo di resine o cemento. Un ruolo importante sarà ricoperto dal gioco fra roccia e asta, esso deve rimanere intorno ai 2-4 mm. Per questa tipologia di bullonatura la messa in opera e il tempo di entrata in funzione è più lungo rispetto all'alternativa meccanica;
3. Ancoraggi di tipo speciale: in questa categoria ricordiamo due tipologie di bullonature, i bulloni tipo Split-set e i tipo Swellex. Il primo è costituito da un tubo metallico di dimensione maggiore del foro che viene forzato all'interno mediante un martello picconatore e quindi aderendo perfettamente alla parete andrà a lavorare per attrito. Il secondo è costituito da un tubo di acciaio ripiegato trasversalmente su sé stesso; il tubo viene inserito nel foro e gonfiato con acqua in pressione fino ad aderire alle pareti del foro.

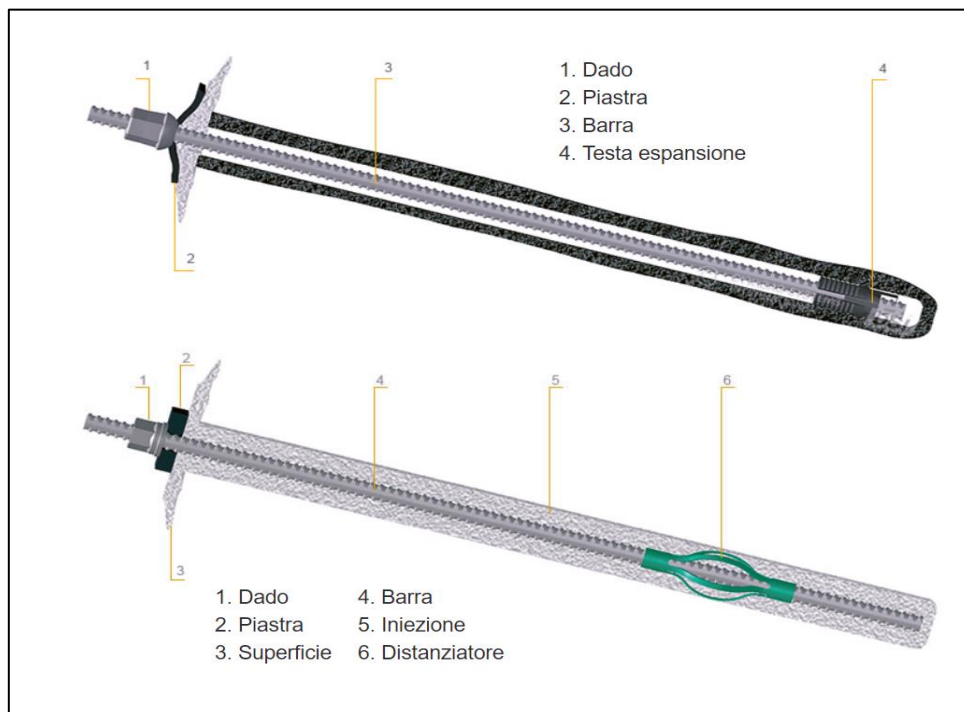


Figura 19. Bullone ad ancoraggio localizzato e bullone ad ancoraggio ripartito (rispettivamente sopra e sotto)

3.1.4.2 Strato impermeabilizzante

La presenza dell'acqua può indubbiamente rappresentare un problema sia riguardante l'infrastruttura stessa e quindi alla sua durabilità, sia un problema ai servizi posti all'interno della galleria, come ad esempio il transito veicolare. Durante le opere di scavo l'acqua può provocare disagi per il lavoro, allagamenti e inondazioni, carico idraulico sul rivestimento di prima fase e quindi portare anche alla instabilità dell'opera. In questa fase un intervento adeguato potrebbe essere rappresentato dai dreni che permettono di mantenere ad esempio un livello di falda inferiore a quello dello scavo. Inoltre, l'acqua può apportare danni al rivestimento finale sia da un punto di vista meccanico (carico idraulico) sia da un punto di vista chimico (degradazione del calcestruzzo). Infine, una problematica legata alla mancata impermeabilizzazione sta nel fatto che il tunnel possa fungere da passaggio fra due falde separate oppure porti all'inquinamento della falda. Quindi, come già accennato, in fase preliminare e di costruzione una buona soluzione può essere quella di mantenere il livello di falda basso attraverso dreni o captazioni, mentre a lungo termine le soluzioni si differenziano in funzione della tipologia di scavo che viene utilizzata. Nel caso di rivestimenti gettati in opera l'impermeabilizzazione avviene attraverso l'utilizzo di calcestruzzi speciali oppure attraverso membrane sintetiche. Nel caso di rivestimenti in calcestruzzo proiettato si può utilizzare una miscela impermeabile oppure si possono usare membrane sintetiche proiettate. Se lo scavo è meccanizzato e il rivestimento è rappresentato da conci, questi ultimi nascono impermeabili. In questo caso bisognerà porre attenzione nell'unione corretta fra uno e l'altro per evitare punti di debolezza ovvero di permeabilità.

3.1.4.3 Supporto definitivo

Il rivestimento definitivo ha la finalità di andare eventualmente a completare le funzioni strutturali già assegnate ad eventuali sostegni preliminari. Generalmente, in funzione dei requisiti in esercizio di progetto e ovviamente delle condizioni tensionali e geologiche dell'ammasso roccioso, le strade percorribili sono tre:

1. Archi di rivestimento di calcestruzzo che può essere armato o non armato, gettato in opera;
2. Archi costituiti da segmenti prefabbricati di calcestruzzo, calcestruzzo precompresso o leghe metalliche;
3. Nel caso in cui il sostegno preliminare soddisfi le richieste di sostegno dell'ammasso roccioso, esso stesso funzionerà da supporto definitivo.

3.2 Metodo meccanizzato (TBM)

Con metodo meccanizzato si intende quando il tunnel viene scavato con TBM (Tunnel Boring Machines) o con macchine dotate di scudi. Questa metodologia di scavo permette di scavare tunnel con dimensioni molto variabili, si va dai 400 mm di diametro nel caso di microtunneling (con TBM guidate in remoto) a diametri oltre i 17 m. in funzione della tipologia di TBM utilizzata, questo metodo permette di mantenere un continuo supporto al fronte dello scavo e al tunnel stesso. In più l'ambiente di scavo può essere totalmente isolato rispetto al resto del tunnel. Questo aspetto ha come prima conseguenza la possibilità di mantenere la falda alla propria altezza naturale senza la necessità di drenaggi o captazioni, purché la pressione non superi un certo valore che può arrivare fino ai 10 bar. Le fasi che abbiamo già visto per lo scavo convenzionale (scavo, supporto e rimozione del materiale scavato) vengono ora effettuate tutte contemporaneamente e in continuo.

Una volta eseguite le adeguate analisi geologiche preliminari, che sono assolutamente fondamentali per la scelta della strumentazione adeguata, e dopo aver optato per uno scavo meccanizzato in continuo, sono diversi i vantaggi di cui si può beneficiare rispetto allo scavo in convenzionale:

- Migliori condizioni di salubrità e sicurezza sul luogo di lavoro per gli operai;
- Industrializzazione del processo di scavo con conseguente diminuzione di costi e tempi;
- Possibilità di superare sezioni in cui le condizioni di scavo sono difficili, aspetto che può essere legato alla geologia o alle condizioni idrauliche del sito;
- La qualità del prodotto finale è meno variabile perché la maggior parte dei casi prevede come supporto l'utilizzo di conci prefabbricati sui quali il controllo risulta essere maggiore di supporti gettati in opera.

Gli svantaggi di questo metodo risiedono nella scarsa flessibilità. Questo significa che una volta scelta la strumentazione e iniziato lo scavo esse deve essere in grado di portarlo a termine senza la necessità di modifiche che risulterebbero difficili, onerose o a volte impossibili. Per questa ragione una analisi preliminare conoscitiva del sito assume un'importanza fondamentale.

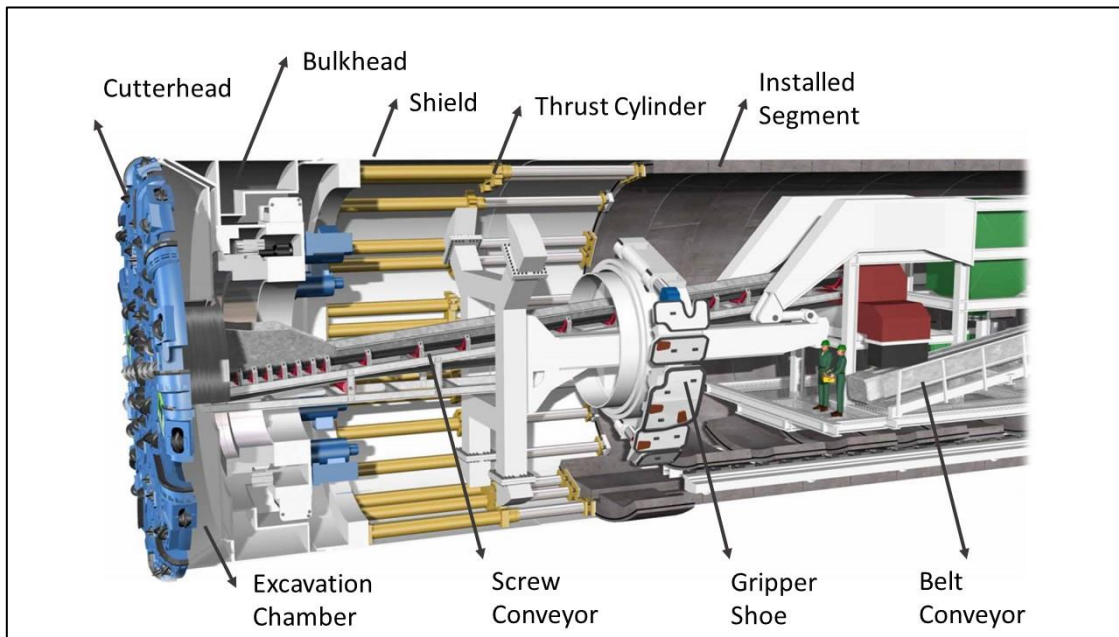


Figura 20. Schema TBM (Zhao, 2012)

3.2.1 Tipologie di TBM

Possiamo dividere le macchine in due grandi famiglie in funzione delle proprietà meccaniche della roccia che stanno scavando. Esistono quindi le TBM adatte alla roccia più compatta e resistente e quelle adatte a terreni più soffici e con caratteristiche meccaniche peggiori.

I macchinari che fanno parte del primo gruppo possono essere aperti o avere uno scudo frontale. Le frese a disco montate nella parte anteriore scavano il materiale creando fratture da stress compressivo nella roccia, rimuovendola a scaglie dalla parete frontale del tunnel. La roccia scavata viene trasferita attraverso le aperture nella testa della fresa a un nastro trasportatore, dove scorre attraverso la macchina fino a un sistema di trasportatori o autocarri per la rimozione dal tunnel. Le TBM di tipo aperto non hanno scudo e lasciano l'area dietro la testa della fresa aperta per il supporto della roccia. Per avanzare la macchina utilizza un sistema di presa che spinge contro le pareti del tunnel. La TBM open-type non installa segmenti di cemento dietro con altre macchine e la roccia viene sostenuta usando metodi di supporto a terra come nervature in acciaio, bullonature, calcestruzzo proiettato e reti metalliche.

Nella roccia fratturata possono essere utilizzate TBM dotate di scudo. Sono previste due modalità di avanzamento in funzione della qualità dell'ammasso roccioso; in terreno stabile vengono utilizzate direttamente le pareti del tunnel per avanzare. In terreni instabili e fratturati, la spinta applicata da martinetti contro i conci di calcestruzzo precedentemente installati dietro la macchina. Ciò impedisce alle forze di spinta di compromettere le pareti del tunnel.

Parlando di scavo in terreno con caratteristiche tecniche inferiori ci sono tre tipi principali di TBM che possono essere usate: Earth Pressure Balance Machines (EPB), Slurry Shield (SS) e tipo open-face. Tutti i tipi di macchine chiuse funzionano come le TBM a singolo scudo ovvero utilizzano martinetti di spinta per avanzare spingendo contro i conci di cemento. Le Earth Pressure Balance Machines sono utilizzate su terreni morbidi che sviluppano meno di 7 bar di pressione. La testina di taglio non utilizza solo frese a disco, ma una combinazione di punte da taglio in carburo di tungsteno, frese a disco in metallo duro e frese a trascinamento. L'EPB prende questo nome perché utilizza il materiale scavato per bilanciare la pressione sulla faccia del tunnel. La pressione viene mantenuta nella testa della fresa controllando la velocità di rimozione del materiale scavato attraverso una vite di Archimede e la velocità di avanzamento. Inoltre, possono essere iniettati additivi come bentonite, polimeri e schiuma per aumentare la stabilità del terreno. Gli additivi possono anche essere iniettati nella testa della vite di estrazione per garantire che il materiale scavato rimanga sufficientemente coesivo per formare un tappo e sia quindi in grado di mantenere la pressione nella testa della fresa e limitare il passaggio dell'acqua. In terreni soffici con pressione dell'acqua molto elevata o in cui le condizioni del terreno siano granulari (sabbie e ghiaie) a tal punto che non è possibile formare una sorta di tappo nella vite di Archimede, sono necessarie le TBM Slurry Shield. La testa fresante è riempita con fanghi pressurizzati che applicano pressione idrostatica al fronte scavo. Questo fluido ha una ulteriore funzione, agisce come mezzo di trasporto che si mescola con il materiale di scavo prima di essere pompato fuori dalla testa. Successivamente viene trasportato in un impianto di separazione dei fanghi, di solito al di fuori del tunnel, dove viene filtrato a più stadi per rimuovere le particelle del materiale scavato dal fango in modo che possa essere riutilizzato. Esiste un limite al quale la sospensione può essere "pulita" che dipende dalla dimensione delle particelle del materiale di scavo.

Le TBM tipo open-face, quando operano su terreno morbido, contano sul fatto che la superficie del terreno scavato si manterrà stabile senza supporto per un breve periodo di tempo. Questo rende adatto il loro utilizzo in tipi di roccia con una resistenza fino a circa 10 MPa e con bassi flussi d'acqua. Con questa tecnica si possono scavare tunnel anche superiori ai 10 metri.

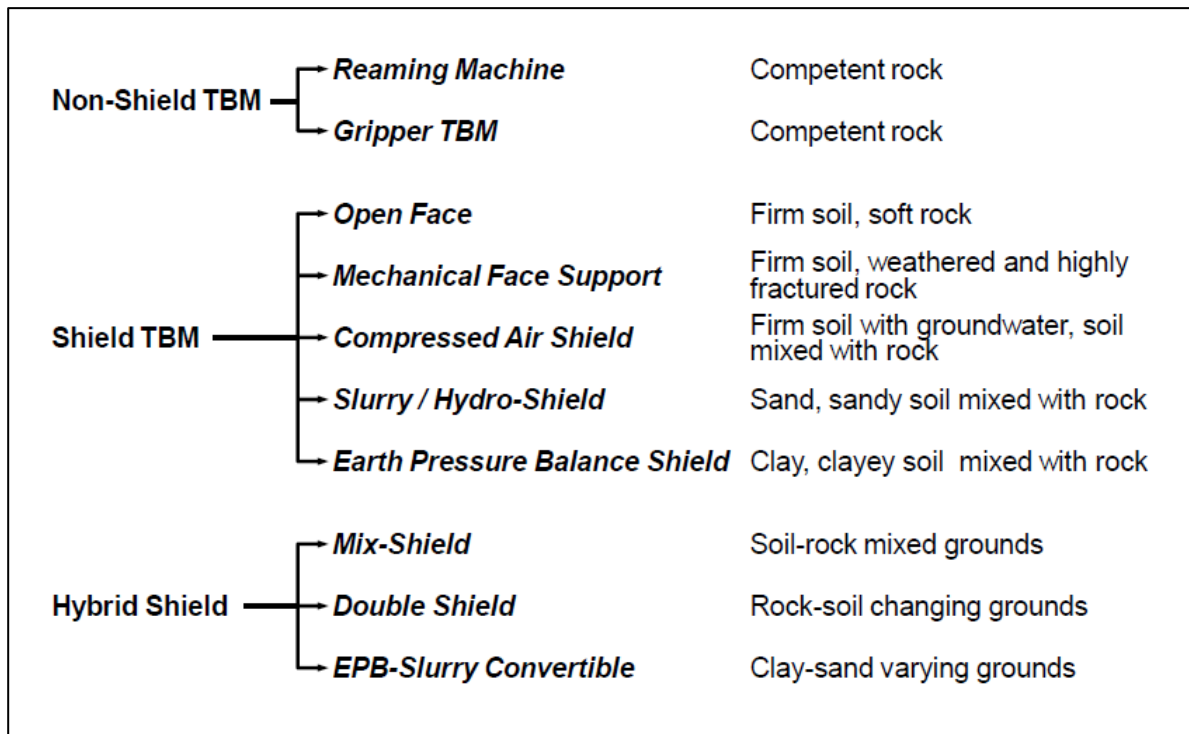


Figura 21. Tipologie di TBM (Zhao, 2012)

4 Modello FE e modellazione termoidraulica

Finora abbiamo parlato dei sistemi geotermici e degli ambienti all'interno dei quali possono essere collocati per sfruttare il calore fornitoci dalla Terra. In particolare, si è parlato delle geostrutture energetiche e delle gallerie, ponendo maggiore attenzione a quelle scavate con il metodo convenzionale. Quindi sono stati presentati gli aspetti che rendono possibile da un punto di vista tecnologico il progetto che verrà ampiamente discusso di seguito. A questo punto passiamo a descrivere quale sarà lo strumento che ci permetterà di stabilire da un punto di vista di efficienza energetica e di conseguenza economica, la fattibilità del progetto o meno. Questo sarà possibile andando a sviluppare un modello agli elementi finiti tridimensionale sul quale sarà effettuata una analisi che prenderà in considerazione due aspetti sui tre possibili, quello idraulico e quello termico tralasciando quello meccanico.

4.1 Modello agli elementi finiti

Il metodo degli elementi finiti (FEM) è un metodo numerico per risolvere problemi di ingegneria e fisica matematica le cui aree di competenza e di interesse includono analisi strutturale, trasferimento di calore, flusso di fluidi, trasporto di massa e potenziale elettromagnetico. La soluzione analitica di questi problemi richiede in genere la soluzione di problemi al contorno per equazioni alle derivate parziali. La formulazione del metodo degli elementi finiti del problema si traduce in un sistema di equazioni algebriche che risolto fornisce valori approssimati delle incognite per un numero discreto di punti sul dominio. Per rendere il problema risolubile si suddivide il problema in parti più piccole e

più semplici che vengono chiamate appunto elementi finiti. Le semplici equazioni che possono essere scritte e che modellano questi elementi finiti vengono quindi assemblate in un sistema di equazioni più ampio che modella l'intero problema. Infine, FEM utilizza metodi numerici per risolvere il sistema riducendo al minimo una funzione di errore associata.

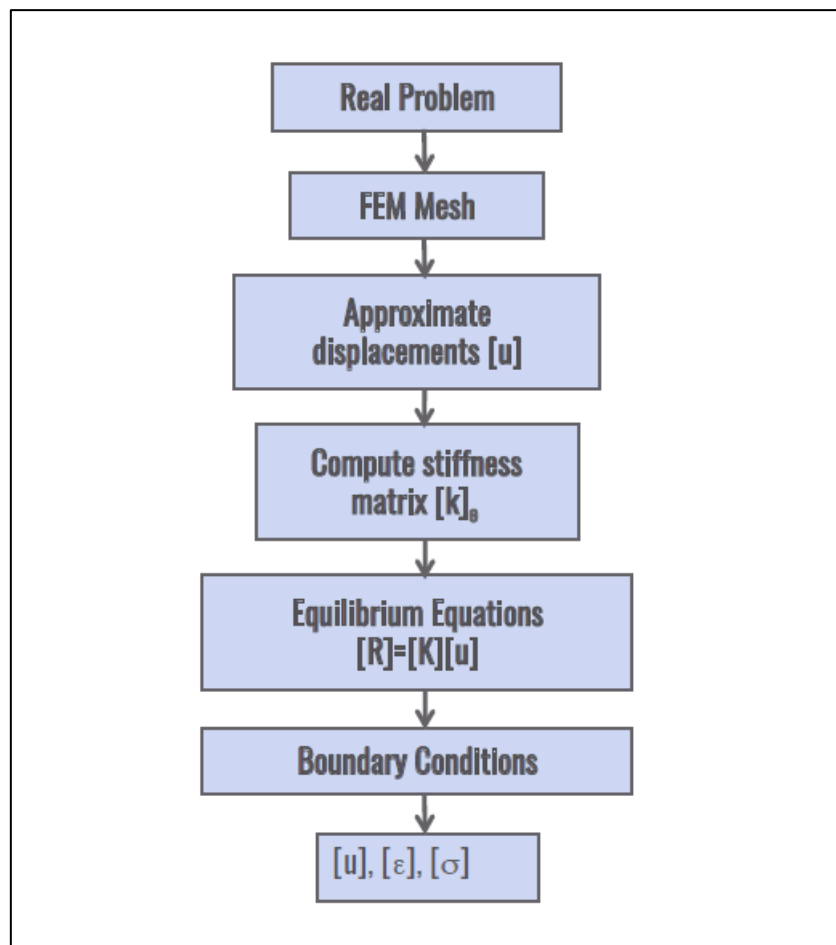


Figura 22. Flow chart per il metodo agli elementi finiti

4.1.1 Formulazione matematica

Dopo aver diviso il problema in elementi finiti e quindi aver creato una mesh, il passaggio successivo consiste nel definire e approssimare matematicamente la variabile primaria. In ingegneria geotecnica solitamente si utilizzano gli spostamenti. Possiamo quindi scrivere gli spostamenti in una formulazione tridimensionale (dipendente dalle coordinate spaziali x , y , z):

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

Dove $H(x,y,z)$ rappresenta la “shape function”, ovvero la funzione che è la funzione che interpola la soluzione tra i valori discreti ottenuti nei nodi mesh. Ora, attraverso la derivazione degli spostamenti e prendendo in considerazione le equazioni costitutive, si possono scrivere le equazioni dell'elemento, ovvero le espressioni di deformazioni e tensioni:

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

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

Dove $[B]$ e $[C]$ sono rispettivamente la matrice delle deformazioni derivante dalla derivazione della shape function e matrice elastica.

Attraverso il principio dei lavori virtuali si può calcolare la matrice di rigidezza dell'elemento e poi attraverso una semplice sommatoria la matrice di rigidezza globale necessaria per la soluzione del problema. Di seguito sono riportate l'equazione dell'elemento e l'equazione globale.

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

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

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

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

$[R]$ è il vettore di tutte le forze al nodo

Infine, applicando le condizioni al contorno si può risolvere il problema ricavando gli spostamenti e conseguentemente deformazioni e tensioni.

4.2 Modellazione termoidraulica

Una volta creato il modello tridimensionale agli elementi finiti, esso può essere analizzato sotto un punto di vista meccanico, idraulico o termico. In questa trattazione prenderemo in considerazione l'analisi accoppiata termoidraulica che appunto permette di associare lo studio dei flussi idraulici con lo studio dei flussi di calore.

4.2.1 Formulazione che regola l'analisi

Nella seguente formulazione il terreno è preso in considerazione come un mezzo saturo composto da uno scheletro solido e da una fase liquida, nella fattispecie rappresentata da acqua.

Equazione di conservazione della massa:

$$S \partial_t p - n \beta_w \partial_t T + \nabla \cdot (n v_{w,i}) - n v_{w,i} \beta_w \nabla T = 0$$

Dove:

- $\partial_t, \nabla \cdot, \nabla$ sono operatori matematici che indicano rispettivamente la derivata rispetto al tempo, la divergenza e il gradiente;
- $S = [n Y_w + (1 - n) Y_s]$ rappresenta il coefficiente di accumulo specifico;
- Y_w, Y_s sono rispettivamente la compressibilità di acqua e di solido;
- n indica la porosità del mezzo;
- p indica la pressione;

- β_w indica il coefficiente di espansione termica dell'acqua;
- T indica la temperatura;
- $v_{w,i}$ indica il vettore velocità dell'acqua rispetto allo scheletro solido.

Legge di Darcy:

$$v_{f,i} = n v_{w,i} = -\frac{K_{ij} \rho_w g_i}{\mu} \nabla h = -K_{ij} \nabla h$$

Dove:

- K_{ij} indica il tensore di conducibilità idraulica;
- ρ_w indica la densità dell'acqua;
- g_i indica il vettore che descrive la gravità;
- $h = \frac{p}{\rho_w g_i} + z$ indica il carico idraulico (con z che rappresenta la coordinata verticale);

Equazione di conservazione dell'energia:

$$[n \rho_w c_w + (1 - n) \rho_s c_s] \partial_f T + n \rho_w c_w v_{w,i} \nabla T - \nabla \cdot (\lambda_{ij} \nabla T) = 0$$

Dove:

- c_w, c_s indicano la capacità termica dell'acqua e del solido;
- ρ_s indica la densità della fase solida;
- $\lambda_{ij} = [n \lambda_w + (1 - n) \lambda_s] \delta_{ij} + \rho_w c_w \left[\alpha_T \sqrt{q_{f,i} q_{f,j}} \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{q_{f,i} q_{f,j}}{\sqrt{q_{f,i} q_{f,j}}} \right]$ è un termine che prende in conto lo scambio di calore e la sua dispersione. All'interno di questo fattore troviamo: λ_w e λ_s che sono i coefficienti di conducibilità di acqua e fase solida; δ_{ij} il delta di Kronecker; α_L e α_T sono i coefficienti di dispersione longitudinale e trasversale; $q_{f,i}$ e $q_{f,j}$ rappresentano i flussi del fluido lungo la direzione i e lungo la direzione j .

Per quanto riguarda la modellazione dei tubi che verranno utilizzati per lo scambio termico, saranno utilizzati elementi monodimensionali all'interno dei quali il fluido si muove con un moto di pura traslazione e con velocità costante che deriva analiticamente dalla formulazione di Hagen-Poiseuille, valida per un fluido newtoniano in regime laminare.

La velocità risulta dunque:

$$v_{p,z} = -\frac{r_{idraulico}^2}{2\mu} \left(\frac{dp}{dz} - \rho g \right)$$

Il raggio idraulico è definito come il rapporto fra area e perimetro bagnato. Nel caso di tubo circolare, come sarà nel nostro caso, la sua espressione risulta

$$r_{idraulico} = \frac{R}{2}$$

4.2.2 Condizioni al contorno

Analizzando i flussi durante le analisi termodinamiche possiamo distinguere fra porzioni di contorno in cui non ne conosciamo l'andamento e in questo caso l'informazione sarà un output dell'analisi. Nel caso in cui conoscessimo le caratteristiche del contorno del nostro modello, prenderemo in considerazione due tipologie di condizioni:

1. Condizioni al contorno di Dirichlet;
2. Condizioni al contorno di Cauchy.

La prima è dettata dalla conoscenza della soluzione su un particolare tratto del contorno del problema e quindi specifica il valore che deve assumere sulla superficie; nel caso di analisi termoidrauliche questa condizione descrive zone a temperatura o carico idraulico costante ed è uguale ad un certo valore. Per quanto riguarda la seconda, sono dati il valore della funzione incognita sui bordi del dominio di definizione del problema differenziale, e il valore della sua derivata direzionale normale a tale superficie. Ciò corrisponde a imporre sia una condizione al contorno di Neumann che una condizione al contorno di Dirichlet. Nel caso di analisi termoidrauliche corrisponde a imporre condizioni sul flusso termico o idrico.

5 Soluzioni per l'attivazione termica di gallerie scavate con metodo convenzionale

Il problema che verrà affrontato sarà quello di ideare nuovi sistemi che permettano di estrarre energia termica sotto forma di calore da gallerie scavate con metodo convenzionale. Come già trattato nel capitolo 3, in particolare nel paragrafo 3.1, quando lo scavo non è meccanizzato full-face e non si utilizza quindi la TBM, il rivestimento non è rappresentato da conci prefabbricati ma deve essere confezionato o posizionato manualmente durante l'avanzamento. Seguendo il procedimento di scavo in convenzionale non si ha la possibilità di sfruttare conci energetici prefabbricati all'interno dei quali i sistemi di tubazioni utilizzati per lo scambio termico vengono posizionati durante la produzione del concio stesso. L'impianto energetico deve dunque essere posto in opera in cantiere subito dopo le operazioni di scavo e prima del posizionamento di un eventuale supporto definitivo. Questo aspetto rende la realizzazione del sistema di scambio più complessa da un punto di vista logistico, per quanto riguarda le tempistiche e di conseguenza da un punto di vista economico. Nel prossimo paragrafo vedremo alcune delle possibili soluzioni.

Per le possibili soluzioni tecnologiche e per la successiva creazione del modello mediante il quale sarà valutata la capacità termica dei sistemi, è stato preso come riferimento una sezione di tunnel fittizio che ha misure che sono presentate nella immagine seguente. La geometria è stata scelta in modo tale che la superficie della sezione sia simile a quella della sezione della galleria metropolitana all'interno della quale è stato applicato il sistema

ENERTUN. In questo modo sarà possibile effettuare un confronto con risultati ricavati applicando i sistemi che verranno presentati in seguito.

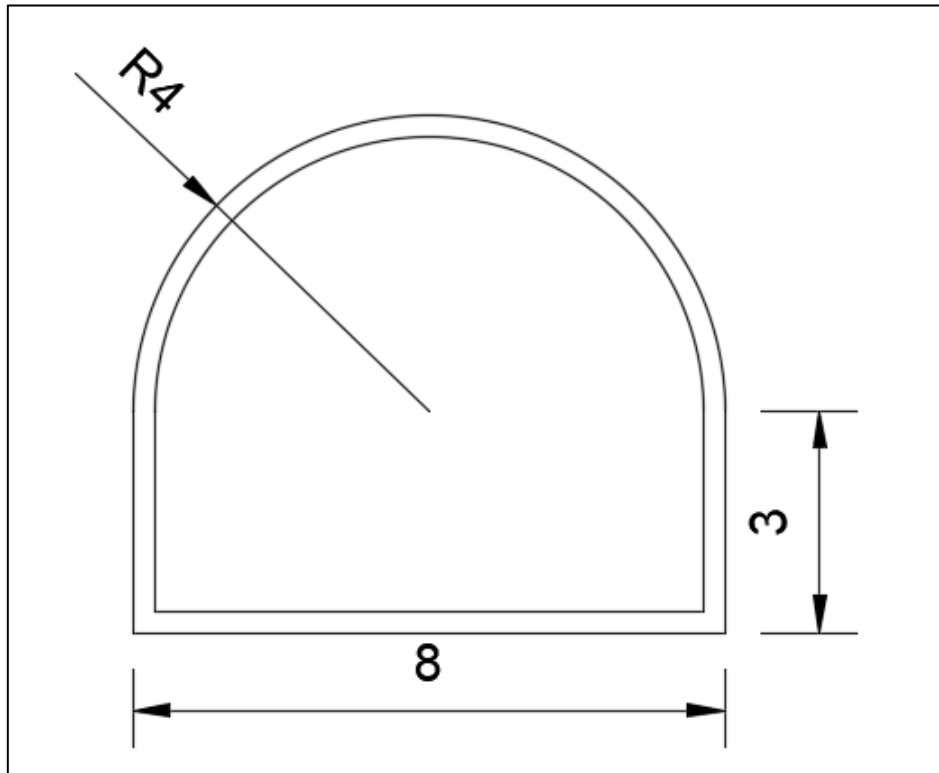


Figura 23. Geometria del tunnel (quote in m) (AUTOCAD)

In questo scenario le possibili soluzioni che verranno prese in considerazione sono tre:

1. Reti energetiche;
2. Bullonature energetiche;
3. Sistema accoppiato.

In seguito, ogni soluzione sarà descritta da un punto di vista della realizzazione e della messa in opera. Successivamente saranno valutate sotto un punto di vista numerico per valutarne l'eventuale efficienza energetica.

5.1 Reti energetiche

Questa prima soluzione riprende in sostanza l'idea che vi è alla base del concio energetico, ovvero utilizzare delle serpentine di tubi all'interno delle quali far scorrere un fluido che permetta lo scambio di calore. Nel sistema sviluppato per essere utilizzato quando lo scavo del tunnel avviene attraverso TBM le tubazioni vengono annegate nel concio prefabbricato durante la produzione di quest'ultimo non andando ad incidere nel processo e nelle tempistiche di cantiere; se lo scavo è convenzionale, sia drill and blast sia meccanico puntuale, non vengono utilizzati conci prefabbricati come sostegno e quindi le tubazioni devono essere posizionate in un altro modo. È proprio in questa situazione che nasce l'idea di utilizzare reti metalliche, che nella maggior parte delle situazioni verrebbero posizionate in ogni caso come armatura del calcestruzzo proiettato, come sostegno delle tubazioni.

Da un punto di vista realizzativo il sistema di reti energetiche risulta relativamente semplice. Le parti principali sono due:

1. Reti metalliche elettrosaldate;
2. Sistema di tubazioni.

Le reti metalliche elettrosaldate sono elementi bidimensionali (la terza dimensione è rappresentata dal diametro delle barre e quindi è trascurabile rispetto alle altre due) formate da barre di diverso diametro sovrapposte e saldate fra di loro a formare maglie quadrate. Da un punto di vista geometrico le soluzioni sono molteplici e quindi si avranno diverse possibilità. Prendendo in considerazione prodotti standard, ovvero non realizzati su misura ma derivanti da produzioni su larga scala, i diametri più comuni per le barre che vanno a formare la rete sono 5, 6, 8, 10 e 12 mm in funzione delle caratteristiche tecniche richieste. Le barre possono creare maglie più o meno piccole che prevedono dimensioni di 10, 15 e 20 cm di lato.

La rete di tubi è preferibilmente realizzata in polietilene reticolato ad alta densità (Pe-Xa); tuttavia, è possibile utilizzare qualsiasi altro materiale in grado di svolgere la stessa funzione e avente caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche adatte allo scopo. La rete di tubi è in grado di resistere ad alte pressioni e temperature nonché alla corrosione. Il diametro esterno dei tubi è variabile tra 15 e 35 mm e lo spessore tra 1,5 e 3 mm. I tratti

lineari della rete di tubi sono mutuamente spaziate di un intervallo variabile tra 20 e 40 cm o comunque in accordo con la geometria della rete metallica alla quale le tubazioni vengono fissate.

Il fissaggio avviene in modo molto semplice attraverso delle legature effettuate con filo metallico ad una distanza opportuna che garantisca aderenza fra il sistema di tubazioni e la rete metallica. L'orditura delle tubazioni è volutamente scelta verticale visti i risultati positivi e migliorativi ottenuti dallo studio sulla geometria delle tubazioni effettuati all'interno del progetto ENERTUN. Nel seguente modello è stata utilizzata una rete con maglia 20x20 cm formata da barre di diametro 10 mm, una tubazione di polietilene reticolato ad alta densità di diametro 20 mm e un intervallo fra i tratti lineari di 40 cm.

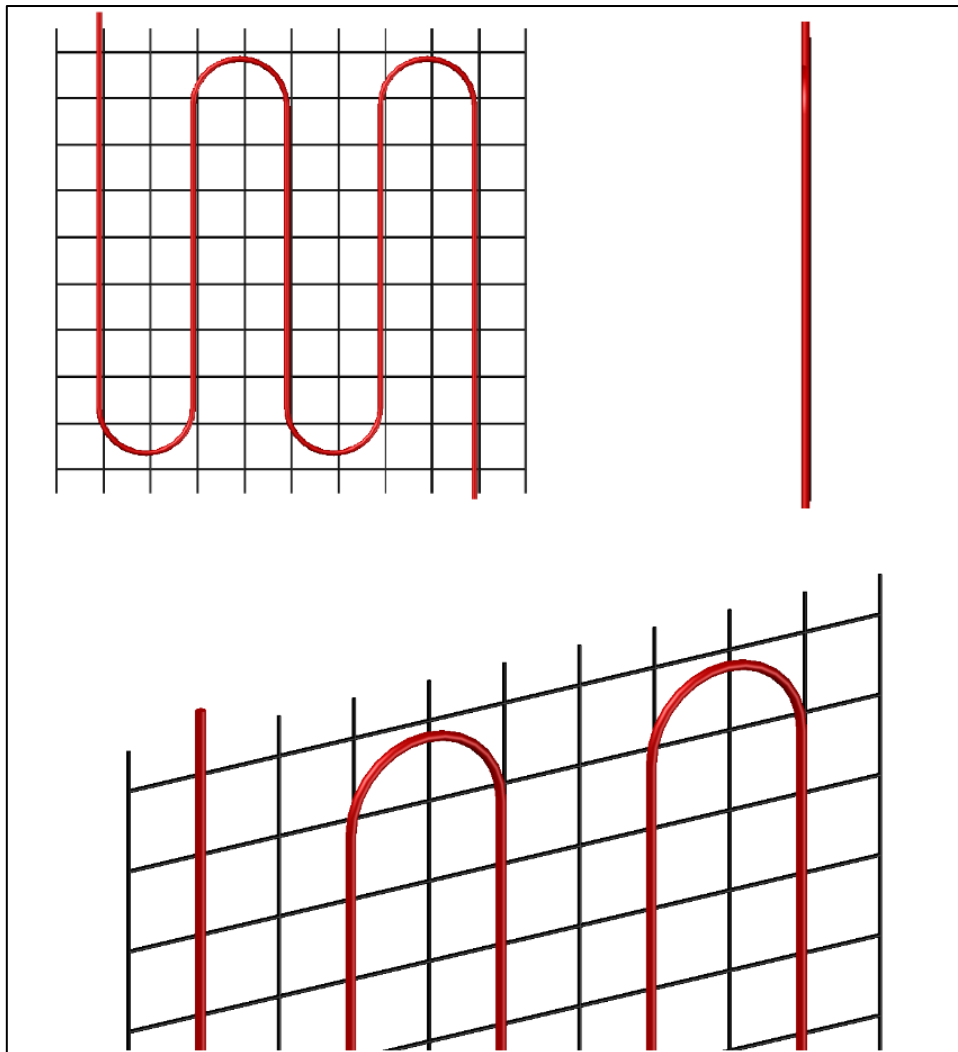


Figura 24. Vista frontale (in alto a sinistra), vista laterale (in alto a destra) e dettaglio del modello 3D della rete energetica (AUTOCAD)

Una volta creato il sistema formato dall'unione di rete metallica e tubazioni, esso deve essere posizionato in maniera stabile all'interno della galleria. Inoltre, questa operazione non deve interferire con il normale avanzamento del tunnel che deve rimanere l'obiettivo primario del cantiere. Come nei conci energetici prefabbricati, anche con questo sistema lo scambio termico può avvenire fra liquido refrigerante all'interno dei tubi e terreno o aria all'interno della galleria. Questo dipende dal posizionamento delle tubazioni che può essere in prossimità dell'intradosso interno o dell'estradosso esterno. Con la configurazione geometrica che è stata scelta lo scambio termico avviene sfruttando l'inerzia termica del terreno circostante e non quello dell'aria proprio perché le reti vengono fissate alla roccia e successivamente vengono ricoperte utilizzando il calcestruzzo proiettato.

Il posizionamento del sistema di scambio di calore avviene subito dopo le operazioni di scavo, sia che siano effettuate con il metodo drill and blast sia con metodo meccanizzato puntuale. In questo modo si inserisce la fase di posizionamento prima della proiezione del calcestruzzo e della creazione del sostegno finale e si ha la possibilità di collocare le tubazioni a contatto con il terreno.

L'installazione delle reti è dipendente dal supporto che prevede la galleria. In presenza di centine con una spaziatura minore di due metri, saranno queste ultime a fornire il sostegno alle reti prima che venga proiettato il calcestruzzo. Il supporto consiste nel semplice posizionamento delle reti fra la centina e il terreno. Nel caso in cui le centine siano troppo distanti fra di loro oppure l'ammasso roccioso sia autosostenuto, le reti devono essere fissate al terreno in un modo alternativo. Il fissaggio può avvenire attraverso delle piastre di ripartizione che vengono applicate alle bullonature presenti e che sostengono la rete dalla zona centrale. Dopo il fissaggio delle reti avviene la proiezione del calcestruzzo e successivamente, secondo le caratteristiche richieste da progetto (spessore e tipologia), la creazione del rivestimento definitivo. Nelle seguenti immagini si vede chiaramente come i sistemi di fissaggio delle reti appena proposti siano assolutamente realizzabili senza problemi tecnologici.



Figura 25. Sistema di reti sostenute da chiodature (West Qinling Tunnel, Cina)

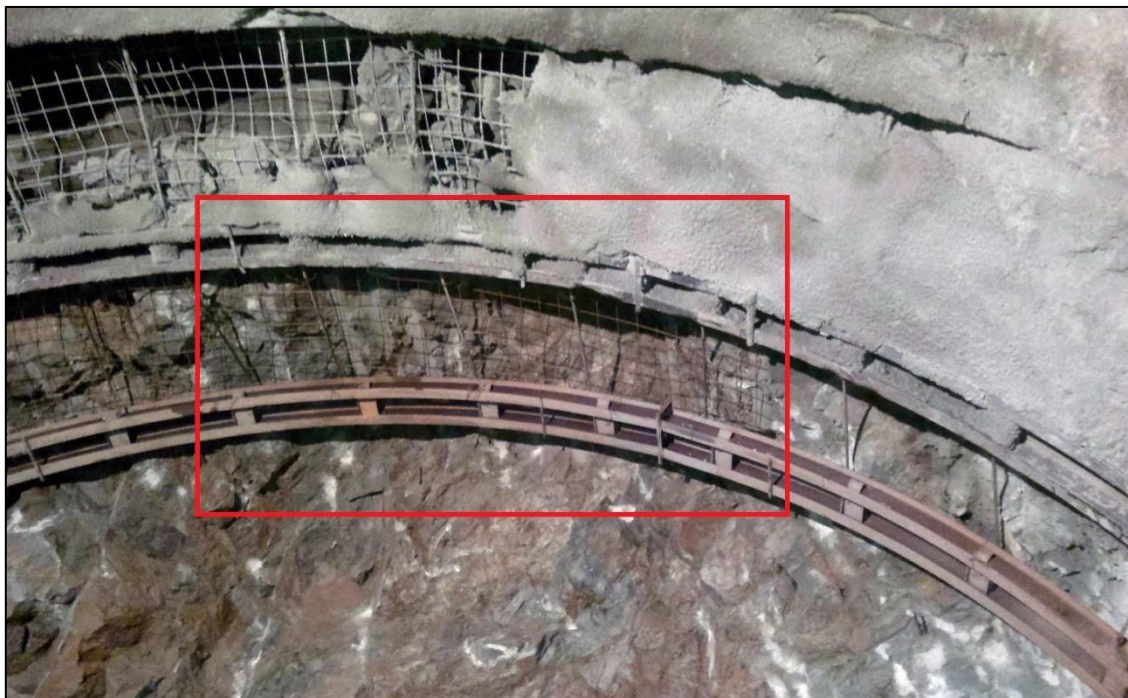


Figura 26. Sistema di reti sostenute da centine metalliche (galleria di Fiè, Bolzano)

Tralasciando per ora aspetti legati alla capacità di scambio termico del sistema (saranno trattati nel prossimo capitolo), dal punto di vista dell'efficienza legata al processo costruttivo questo sistema risulta essere valido. Infatti, non devono essere aggiunte fasi al processo di scavo e sostegno della galleria poiché il posizionamento delle reti avverrebbe comunque l'operazione di fissaggio dei tubi alle reti stesse può essere effettuato precedentemente all'esterno del cantiere, non andando così ad aumentare le tempistiche comprese fra lo scavo vero e proprio e il posizionamento del rivestimento definitivo.

5.2 Bullonature energetiche

Un sistema alternativo o aggiuntivo a quello appena descritto è rappresentato dall'utilizzo di Borehole Heat Exchanger (BHE) posizionati radialmente lungo il perimetro della galleria che sfruttano i fori effettuati per posizionare le chiodature che rappresentano il sistema di sostegno dell'ammasso roccioso. L'utilizzo di tubazioni inserite parallelamente alle chiodature verrà successivamente chiamata "bullonatura energetica". Le configurazioni geometriche più utilizzate per le tubazioni sono sostanzialmente tre:

1. Singolo tubo a "U";
2. Doppio tubo a "U";
3. Tubi coassiali.

Pur cambiando la disposizione delle tubazioni il principio di funzionamento è lo stesso per tutti e tre i sistemi. Avremo uno o più tubi di mandata e uno o più tubi di uscita all'interno dei quali scorre il fluido termovettore che non verrà mai a contatto diretto con il terreno; questo perché il sistema che stiamo prendendo in considerazione, come anche quello descritto precedentemente, è un sistema chiuso.

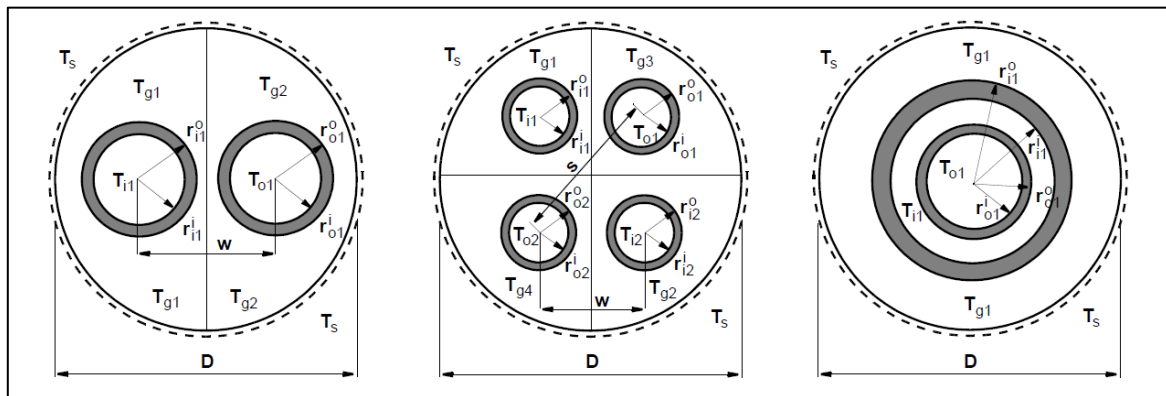


Figura 27. Configurazione geometrica delle tubazioni nei BHE (DHI-WASY, 2010)

Queste tubazioni devono coesistere all'interno del foro nel quale è posizionato il bullone. Non bisogna infatti dimenticare che l'azione primaria dei fori è quella di contenere la malta che trasmette le tensioni fra la roccia circostante e il bullone stesso. Proprio per questa motivazione verrà preso in considerazione una soluzione che prevede il chiodo centrale affiancato da soli due tubi (uno di ingresso e uno di uscita) per evitare che la sezione collaborante venga ridotta eccessivamente. Le dimensioni più comuni dei bulloni in

commercio variano dai 15 ai 60 mm e vengono scelti in funzione delle caratteristiche meccaniche richieste dal problema specifico. Per le prossime analisi sarà preso in considerazione un bullone con diametro pari a 30 mm affiancato da due tubi di diametro 20 mm ciascuno e il foro sarà di 10 cm di diametro; con queste dimensioni la riduzione della sezione sarà del 8,8 %.

	Superficie [mm ²]
Malta senza tubazioni	7143.5
Malta con tubazioni	6515.5

Tabella 1. Confronto superficie di malta cementizia nella sezione del foro, con o senza tubazioni

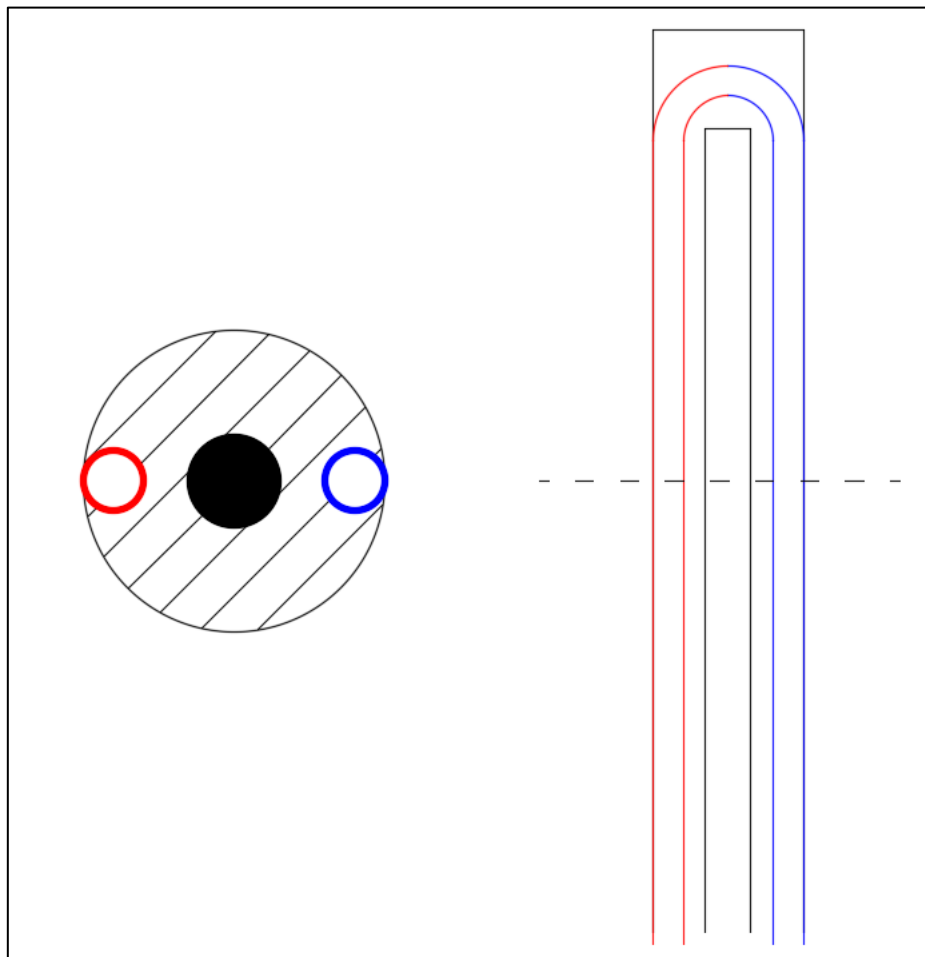


Figura 28. Sezione di bullonatura energetica (AUTOCAD)

Per quanto riguarda i materiali, le componenti principali del sistema sono due:

1. Sistema di tubazioni;
2. Malta cementizia.

La rete di tubi è, come nel caso delle reti metalliche equipaggiate con tubazioni, realizzata in polietilene reticolato ad alta densità (Pe-Xa); il diametro esterno dei tubi è variabile tra 15 e 35 mm e lo spessore tra 1,5 e 3 mm.

La malta cementizia deve garantire un buon funzionamento dal punto di vista meccanico e quindi di “collante” fra il chiodo e il terreno circostante e deve contemporaneamente permettere al flusso termico di attraversarla senza creare eccessivi ostacoli che diminuirebbero l'efficienza del sistema. In più il pompaggio della miscela deve essere agevole visto il diametro del foro e il tempo di presa deve essere consono sia tenendo conto delle opere di scavo sia delle tempistiche relative al raggiungimento delle caratteristiche meccaniche. Per ottenere questo risultato alla malta cementizia possono essere aggiunte sabbie di quarzo e agenti fluidificanti.

Da un punto di vista realizzativo, la messa in opera avviene contemporaneamente alla posa delle bullonature. In questo scenario l'aggiunta del sistema per lo scambio termico non risulta essere particolarmente impattante da un punto di vista logistico; infatti, non si andrà ad aggiungere un'ulteriore fase costruttiva.

Vengono quindi effettuati i fori di 10 cm di diametro e di lunghezza variabile fra i due e i quattro metri. Questa lunghezza (che risulta essere funzione della qualità della roccia, questioni legate all'efficienza energetica e questioni economiche) verrà valutata successivamente da un punto di vista parametrico analizzando i risultati ottenuti. All'interno dei fori viene posizionato il bullone e le tubazioni che vengono mantenute ad una certa distanza dal bullone attraverso dei separatori polimerici in modo tale che i tubi non diventino un elemento di debolezza della bullonatura. Infine, il foro viene riempito della malta cementizia di cui si è precedentemente parlato.

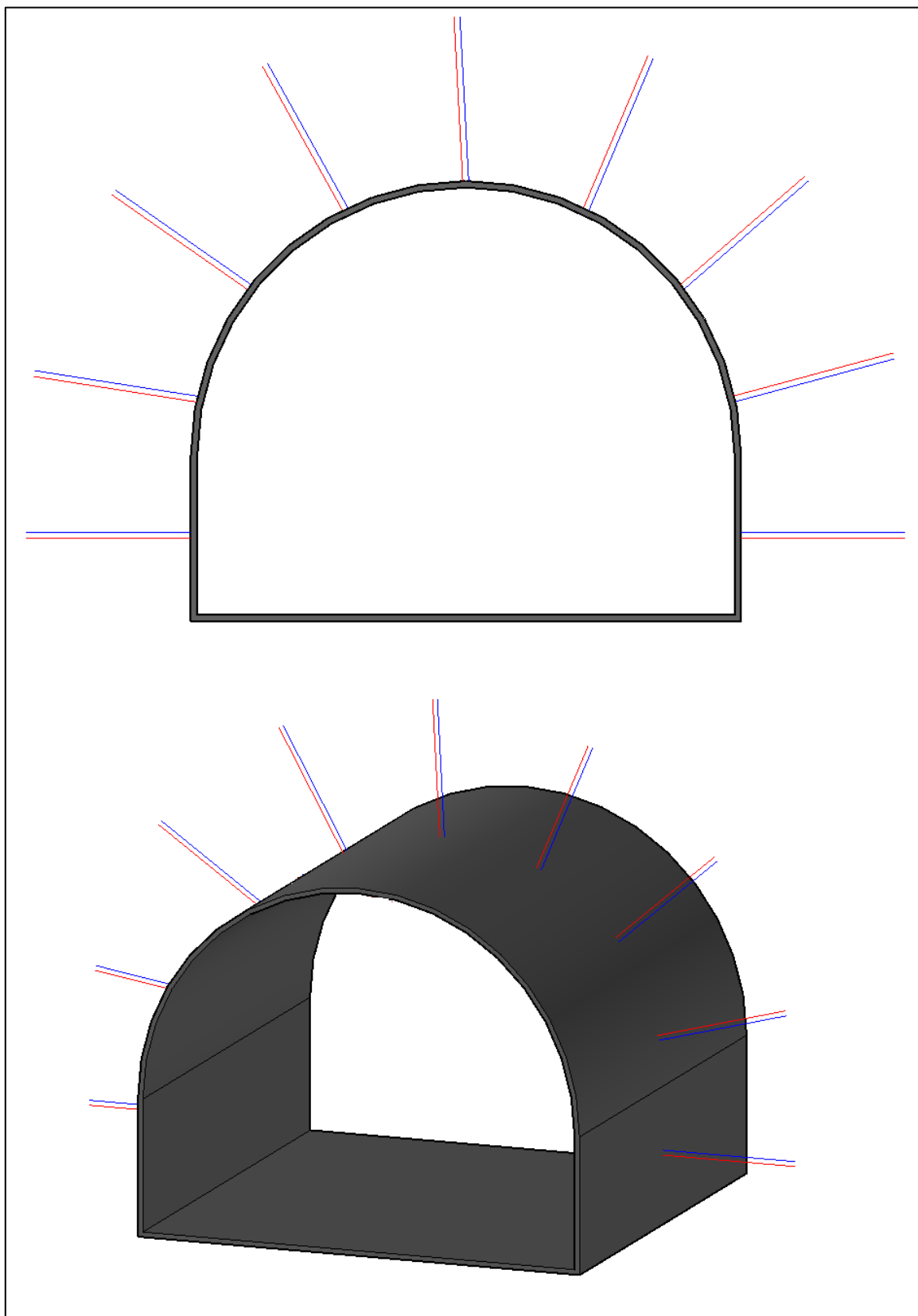


Figura 29. Vista frontale (in alto) e dettaglio del modello 3D del sistema di bullonature energetiche (AUTOCAD)

5.3 Sistema accoppiato

L'utilizzo del sistema con reti energetiche non esclude l'utilizzo del sistema di bullonature energetiche e viceversa. Infatti, una terza opzione è rappresentata dalla creazione di un sistema accoppiato dei primi due descritti nei paragrafi precedenti.

Per quanto riguarda i materiali non cambierà nulla rispetto a quelli utilizzati nei sistemi singolarmente sia per le reti metalliche sia per le tubazioni. L'unico cambiamento riguarda la messa in opera; nel sistema accoppiato bisogna tenere in conto anche l'interazione costruttiva che riguarda i singoli sistemi. Quindi verranno prima posizionate le bullonature e le tubazioni all'interno del foro e successivamente le reti metalliche con i relativi tubi. I sistemi saranno due circuiti chiusi indipendenti che però mostrano una certa interazione termica che sarà valutabile numericamente dopo le analisi numeriche affrontate nel prossimo capitolo.

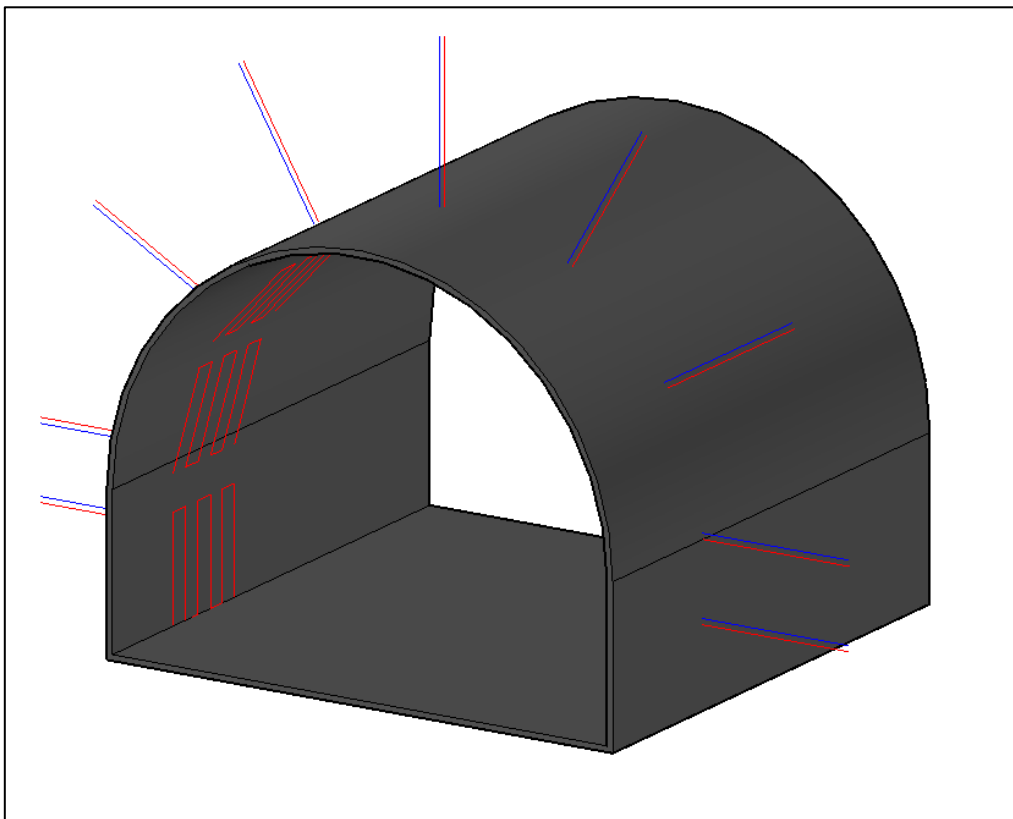


Figura 30. Modello 3D del sistema accoppiato di reti energetiche e bullonature energetiche (AUTOCAD)

6 Modellazione numerica

Per implementare il problema descritto precedentemente e per stabilirne l'efficacia e l'efficienza da un punto di vista termico è stato utilizzato il software FEFLOW. Quest'ultimo, il cui acronimo significa Finite Element subsurface FLOW system, è estremamente performante quando si tratta di simulare il flusso di acque sotterranee, il trasferimento di massa e il trasferimento di calore in mezzi porosi e in mezzi fratturati. Il software utilizza l'analisi agli elementi finiti per risolvere l'equazione del flusso di acque sotterranee sia di condizioni sature che insature, oltre che il trasporto di massa e di calore.

Il modello è stato ideato e impostato per essere analizzato seguendo un approccio parametrico. Le variabili che sono state prese in considerazioni inizialmente sono state quelle riguardanti la geometria dei sistemi di attivazione termica presi in considerazione. Successivamente è stato preso in conto un parametro riguardante la falda e più in particolare riguardante la velocità del suo moto. Così facendo si potrà valutare quale soluzione sia più efficiente da un punto di vista termico.

6.1 Geometria del modello

La geometria del modello è stata creata attraverso il software di disegno AutoCAD e successivamente importata attraverso il file DXF sul software FEFLOW convertendo gli elementi in punti, linee e poligoni. Questi tre sono gli elementi supportati da software numerico che hanno permesso la creazione della geometria della galleria e dei sistemi di scambio termico.

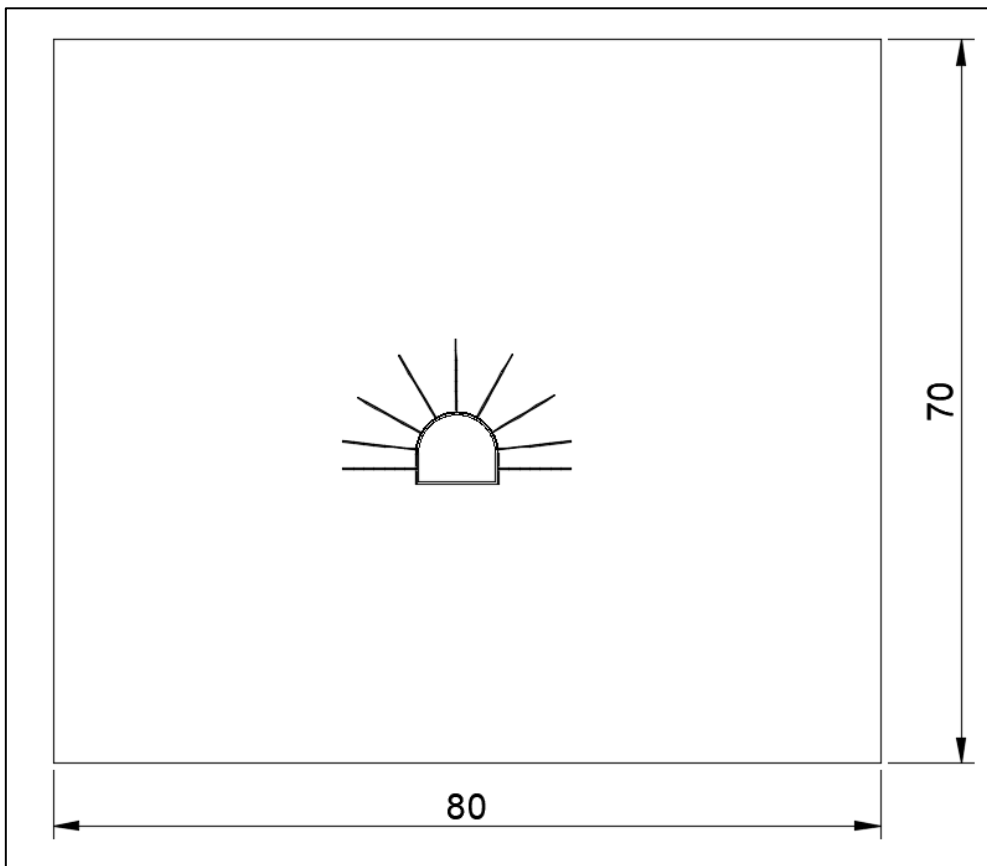


Figura 31. Modello DXF importato su FEFLOW (quote in m) (AUTOCAD)

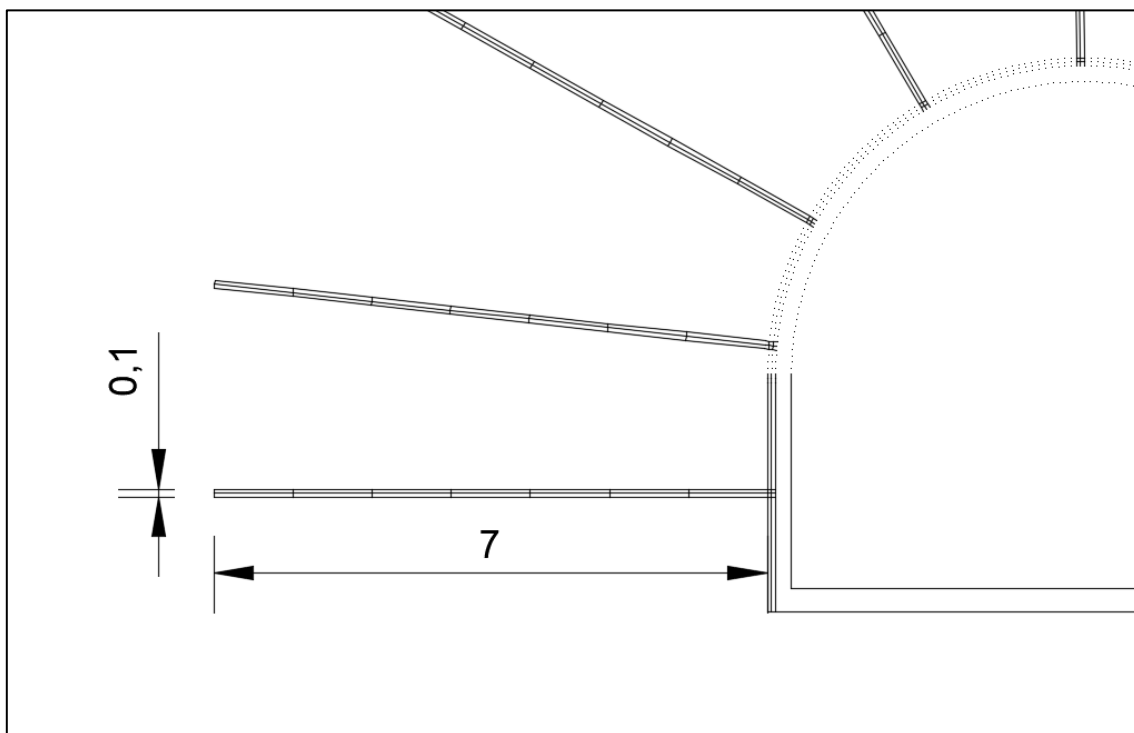


Figura 32. Dettaglio del modello DXF importato su FEFLOW (quote in m) (AUTOCAD)

Le componenti presenti nel modello sono state create tutti utilizzando l'elemento "linea" fatta eccezione per la copertura semicircolare del tunnel che è stata realizzata con 150 punti in modo tale da riprodurre il più fedelmente possibile la sua geometria. Per quanto riguarda le dimensioni del modello, sono state scelte abbastanza grandi in modo tale da non avere interferenze con i bordi esterni durante il calcolo e per non incappare in errori numerici. Come si può vedere in figura 26 la larghezza è di 80 metri e l'altezza è di 70 metri, ponendo attenzione al fatto che la galleria è centrata rispetto all'asse orizzontale ma risulta essere leggermente spostata verso il basso (circa 5 metri) poiché le chiodature non saranno presenti alla base della galleria quindi il semispazio inferiore risentirà meno marcatamente dello scambio termico dovuto dalle tubazioni. Per agevolare lo studio parametrico del problema, la lunghezza delle chiodature, quindi delle relative tubazioni, e i riferimenti geometrici per il posizionamento delle Reti energetiche sono state disegnate lasciando aperte diverse possibilità sfruttabili in sede di modellazione. Per questa ragione le chiodature potranno essere di lunghezza 2, 3, 4, 5 e 6 metri e le reti potranno essere

posizionate a 5 o 10 centimetri di distanza dal terreno, ovvero considerando uno strato di calcestruzzo proiettato di spessori diversi.

Il modello è poi stato discretizzato attraverso il generatore automatico di mesh disponibile all'interno del software; fra le possibili geometrie presenti sono stati scelti elementi triangolari a tre nodi poiché i più adeguati ad una analisi di flussi. La maglia creata automaticamente è stata infittita nelle vicinanze degli elementi che andranno a perturbare il sistema, ovvero le bullonature energetiche e le reti all'interno della galleria; mentre ai bordi gli elementi risultano essere più grandi poiché risentiranno molto poco dei flussi termici presenti nell'intorno della galleria. Per quanto riguarda lo sviluppo del modello nella terza dimensione, è stato considerato un tratto di galleria pari a 3 metri ottenendo così il modello tridimensionale mostrato nella seguente figura. Lungo la profondità la discretizzazione è stata effettuata in modo tale da ottimizzare il modello. Ciò significa che i layers sono più fitti in prossimità dei due sistemi di scambio termico e meno fitti in prossimità dei bordi del modello. Ne derivano 28 layers e 29 slices con la distribuzione raffigurata in figura 33. In particolare, il modello sarà costituito da quattro layers centrali di spessore 5 cm, si sviluppa poi alla sinistra e alla destra di questo nucleo più fitto con dieci layers per parte di spessore 10 cm e infine si chiude da entrambe le parti con due layers di spessore 20 cm. La dimensione degli elementi tridimensionali lungo l'asse z è dettata dalla scelta dello spessore del singolo layer, quindi variabile fra 5, 10 e 20 cm.

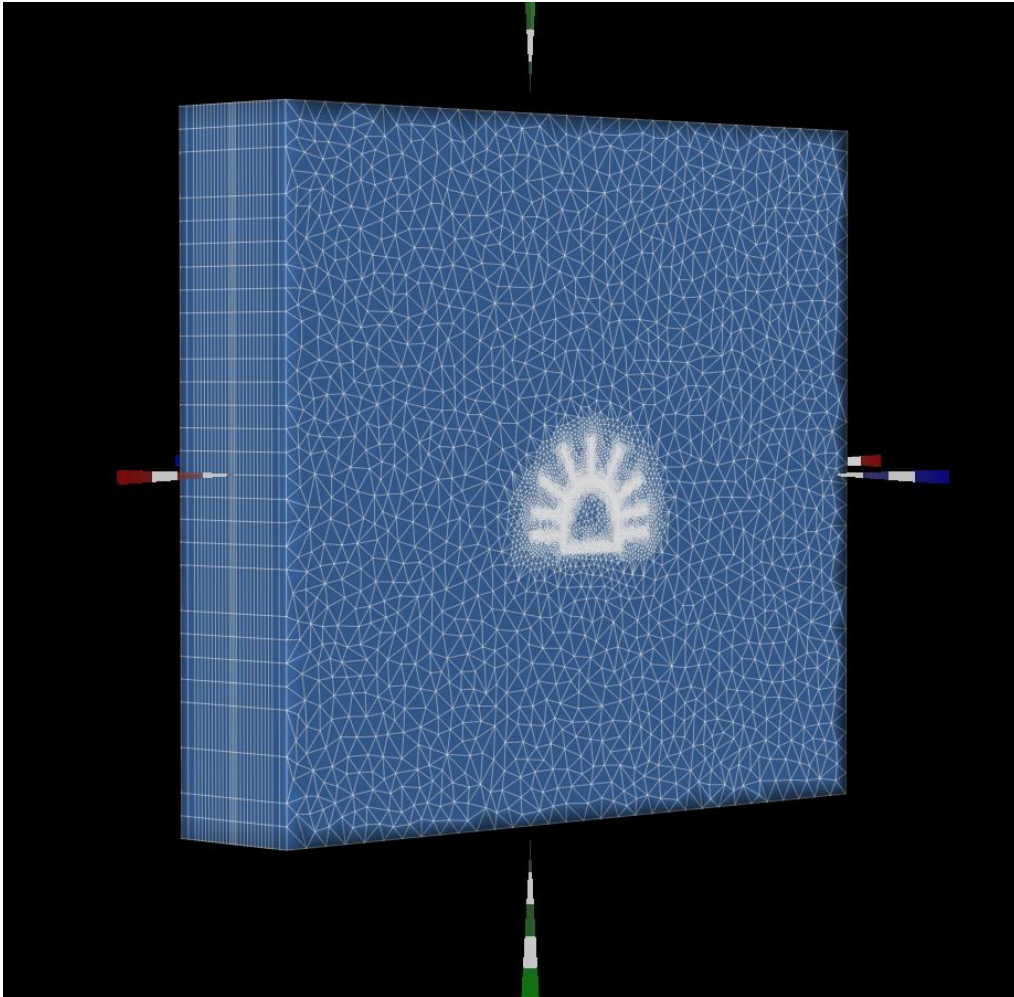


Figura 33. Modello 3D (FEFLOW)

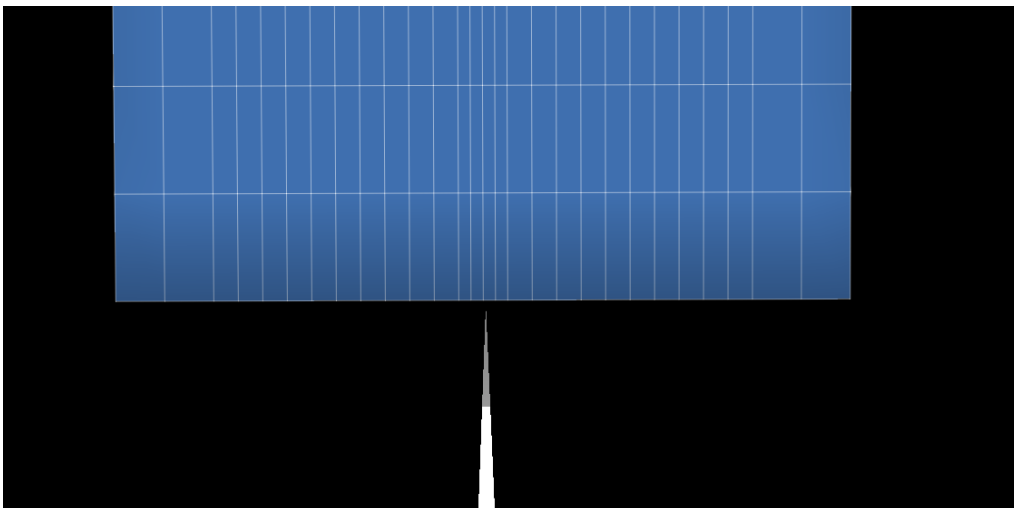


Figura 34. Particolare layers (FEFLOW)

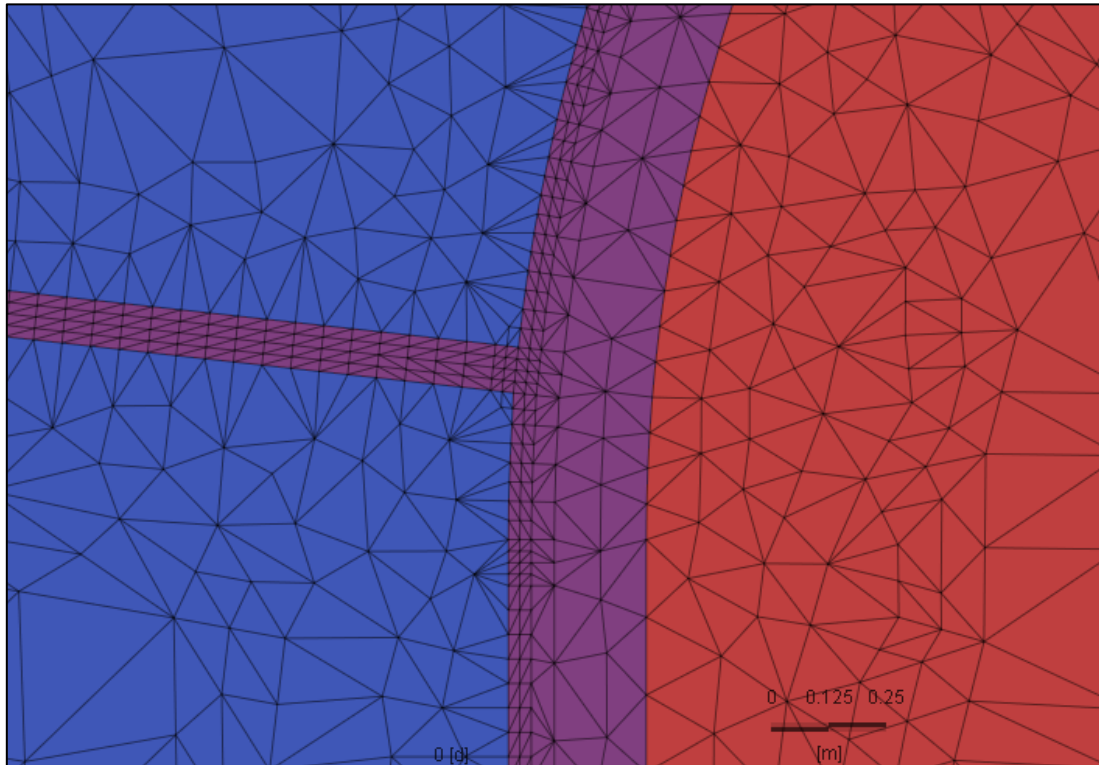


Figura 35. Dettaglio mesh, in rosso l'aria, in viola il calcestruzzo e in blu il terreno (FEFLOW)

Le tubazioni di entrambi i sistemi sono state modellate attraverso l'elemento presente all'interno del software "discrete features". Questi elementi possono essere modellati seguendo tre leggi differenti:

- Darcy;
- Hagen-Poiseuille;
- Manning-Strickler;

Nel caso di tubazioni di piccolo diametro la più adatta è quella di Hagen-Poiseuille che però trascura le proprietà termiche del materiale che costituisce il tubo; tuttavia l'errore che si produce è relativamente piccolo per problemi con dimensioni come quello studiato. Quindi questi elementi hanno permesso di creare una geometria relativamente complessa e di modificarla, per effettuare lo studio parametrico, con una certa flessibilità.

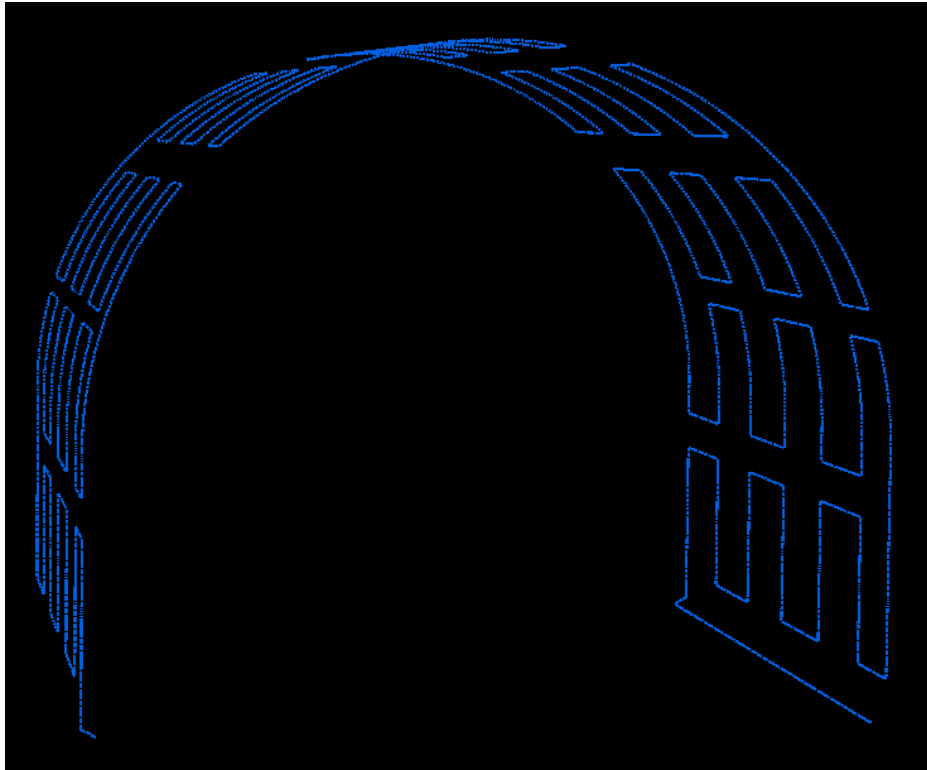


Figura 36. Geometria tipo delle tubazioni applicate alle reti (FEFLOW)

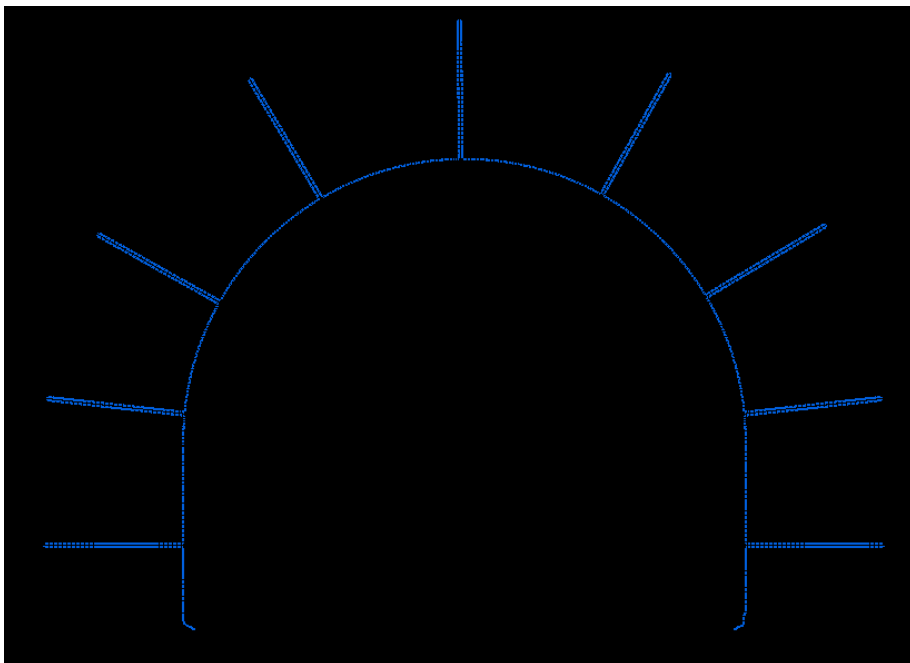


Figura 37. Geometria tipo delle tubazioni che vanno a creare le bullonature energetiche (FEFLOW)

6.2 Parametri dei materiali

Riporto ora la descrizione dei parametri principali che sono stati utilizzati per descrivere al meglio il modello da un punto di vista termoidraulico:

- Porosità indicata con la lettera “n”, è definita come volume dei vuoti (V_v) diviso volume totale (V)

$$n = \frac{V_v}{V}$$

indica con un valore adimensionale la frazione di vuoti presenti nel terreno che stiamo prendendo in considerazione;

- Conducibilità idraulica indicata con la lettera “K”, è un parametro che definisce la capacità di un materiale (nel caso del seguente studio, terreno e malta cementizia) di farsi attraversare da un fluido; ha la dimensione di una velocità (m/s) ed è definita come:

$$K = k \frac{\rho g}{\mu}$$

con “ ρ ” e “ μ ” rispettivamente densità e viscosità del fluido, “g” l’accelerazione di gravità e “k” la permeabilità del mezzo poroso.

- Coefficiente di immagazzinamento indicato con la lettera “S”, rappresenta la quantità di acqua per unità di volume di una formazione satura che viene immagazzinata o espulsa dall’immagazzinamento a causa della comprimibilità dello scheletro minerale.
- Capacità termica indicata con la lettera “C”, il rapporto fra il calore scambiato tra il corpo e l’ambiente e la variazione di temperatura che ne consegue; esponendo il concetto in formula si ha:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Essa dipende sia dalla natura del materiale che dalla sua massa; è espressa in J/K .

- Conducibilità termica indicata con la lettera “ λ ”, è il rapporto fra il flusso di calore e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore nel caso della conduzione termica (ovvero quando i contributi al trasferimento di calore per convezione e per irraggiamento termico siano trascurabili). In altri termini, la conducibilità termica è una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore.
- Dispersione termica indicata con la lettera “ α ”, importante per quantificare il trasporto di massa durante i processi di filtrazione.

La galleria viene ipoteticamente situata a Torino e quindi sono stati utilizzati i corrispondenti parametri termici e idraulici del terreno.

Conducibilità idraulica orizzontale ($k_x = k_z$)	$4.15 \cdot 10^{-3}$	m/s
Conducibilità idraulica verticale (k_y)	$2.075 \cdot 10^{-4}$	m/s
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	m^{-1}
Porosità (n)	0.25	-
Capacità termica del fluido ($\rho_w c_w$)	4.2	$MJ/m^3/K$
Capacità termica del solido ($\rho_s c_s$)	2.0	$MJ/m^3/K$
Conducibilità termica del fluido (λ_w)	0.65	$W/m/K$
Conducibilità termica del solido (λ_s)	2.8	$W/m/K$
Dispersione termica longitudinale (α_L)	3.1	m
Dispersione termica trasversale (α_T)	0.3	m

Tabella 2. Parametri per la caratterizzazione termoidraulica del terreno

All'interno della galleria viene simulata l'aria utilizzando i relativi parametri riportati nella seguente tabella.

6 Modellazione numerica

Conducibilità idraulica ($k_x = k_z=k_y$)	10^{-2}	m/s
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	m^{-1}
Porosità (n)	1	-
Capacità termica del fluido ($\rho_w c_w$)	10^{-3}	$MJ/m^3/K$
Conducibilità termica del fluido (λ_w)	0.53	$W/m/K$
Dispersione termica longitudinale (α_L)	5	m
Dispersione termica trasversale (α_T)	0.5	m

Tabella 3. Parametri per la caratterizzazione termoidraulica dell'aria

Il rivestimento della galleria è costituito da calcestruzzo e nello stesso modo può essere modellata la malta cementizia che viene iniettata per le chiodature. I parametri che vengono utilizzati derivano da prove di laboratorio effettuate al Politecnico di Torino.

Conducibilità idraulica ($k_x = k_z=k_y$)	10^{-16}	m/s
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	m^{-1}
Porosità (n)	0	-
Capacità termica del solido ($\rho_s c_s$)	1.05	$MJ/m^3/K$
Conducibilità termica del solido (λ_s)	1.12	$W/m/K$

Tabella 4. Parametri per la caratterizzazione termoidraulica della malta cementizia

Per quanto riguarda le tubazioni e il fluido che passa al loro interno, di seguito sono riportati i parametri, geometrici e termici, che vengono attribuiti alle discrete features che vengono modellate attraverso la legge di Hagen-Poiseuille.

Area trasversale	3.14	cm^2
Raggio idraulico	0.5	cm
Coefficiente di immagazzinamento (S)	10^{-4}	m^{-1}
Capacità termica del fluido ($\rho_w c_w$)	4.2	$MJ/m^3/K$
Conducibilità termica del fluido (λ_w)	0.65	$W/m/K$

Tabella 5. Parametri per la caratterizzazione termoidraulica e geometrica delle tubazioni

6.3 Condizioni iniziali e condizioni al contorno

La temperatura del modello è l'unica fra le condizioni iniziali che rimane fissa per tutte le analisi che vengono effettuate facendo variare i parametri. Il modello è completamente saturo poiché totalmente immerso nella falda. Quest'ultima sotto Torino presenta una temperatura media annuale di 14°C. Per questa ragione la temperatura iniziale del modello è stata impostata pari a quella della falda. Per impostare questa condizione iniziale è stata applicata una temperatura pari a 14°C a tutti i punti del modello; essa non rappresenta un vincolo ma solo un punto di partenza per l'analisi. Infatti, proprio grazie alla variazione di temperatura nei suddetti punti si potrà valutare il calore scambiato fra sistema e terreno.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno legate alla falda, verranno condotte analisi di due tipologie:

1. Con falda in condizione statica;
2. Con falda in movimento.

In particolare, per simulare la condizione di terreno saturo e falda ferma è stato imposto un carico idraulico a sinistra e a destra del modello pari a 70 m (altezza totale del modello) in modo tale che l'assenza di gradiente idraulico generi una condizione statica per quanto riguarda i flussi idrici nel terreno.

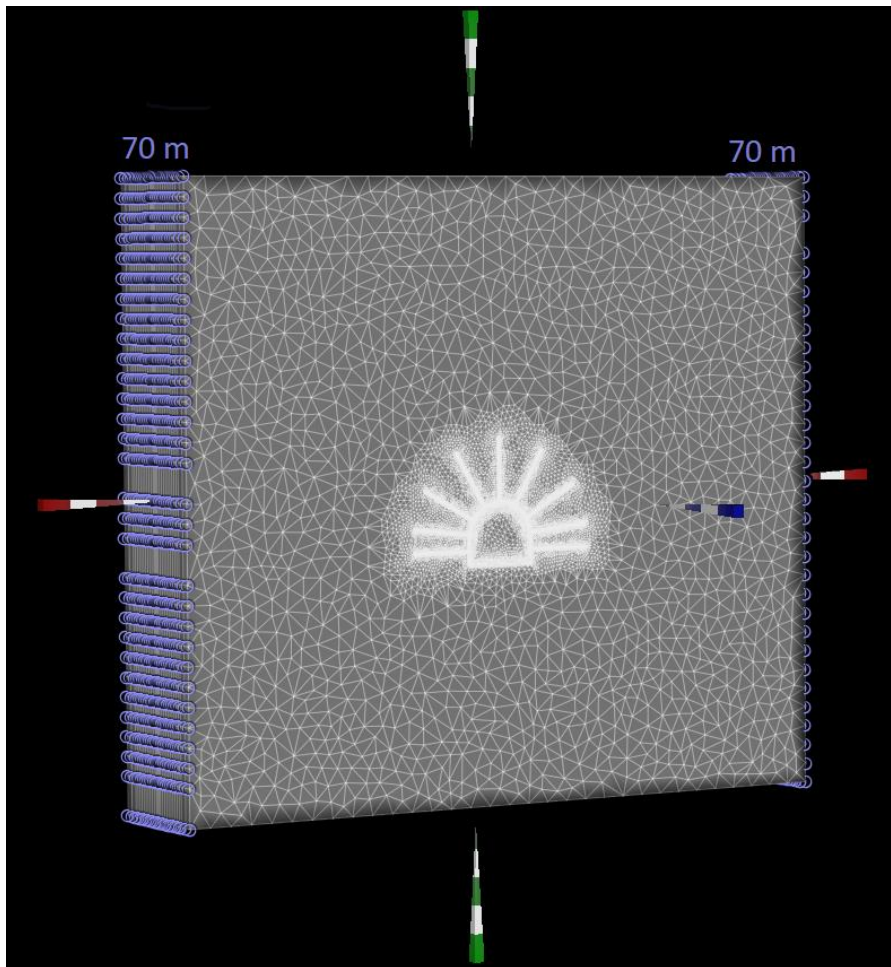


Figura 38. Carico idraulico in condizioni di falda statica (FEFLOW)

Per simulare la falda in movimento è stato imposto un gradiente idraulico tale per cui la velocità di falda fosse di 1.5 m/d che rappresenta la velocità caratteristica della falda a Torino. Il fluido all'interno del mezzo poroso è regolato dalla legge di Darcy riportata di seguito:

$$V = ki$$

Dove:

- V rappresenta la velocità apparente di filtrazione della falda che viene inserita nel modello come un dato di input (1.5 m/d);
- k indica la permeabilità del terreno ($4.15 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$);

- i indica il gradiente idraulico, ovvero la perdita di carico per unità di lunghezza del percorso, è definito come $\frac{\Delta h}{L}$.

In questo caso specifico la lunghezza L è rappresentata dalla larghezza del modello e quindi pari ad 80 m. Per questa ragione, per ottenere la velocità sopraindicata è stato imposto un Δh pari a 0.3267 m.

Un ulteriore dato da sottolineare è che la falda in movimento incide sul tunnel, e quindi sui sistemi di scambio termico, con un angolo di 90° ; in casi differenti, ovvero con angoli variabili di incidenza, la capacità termica del sistema potrebbe subire delle variazioni.

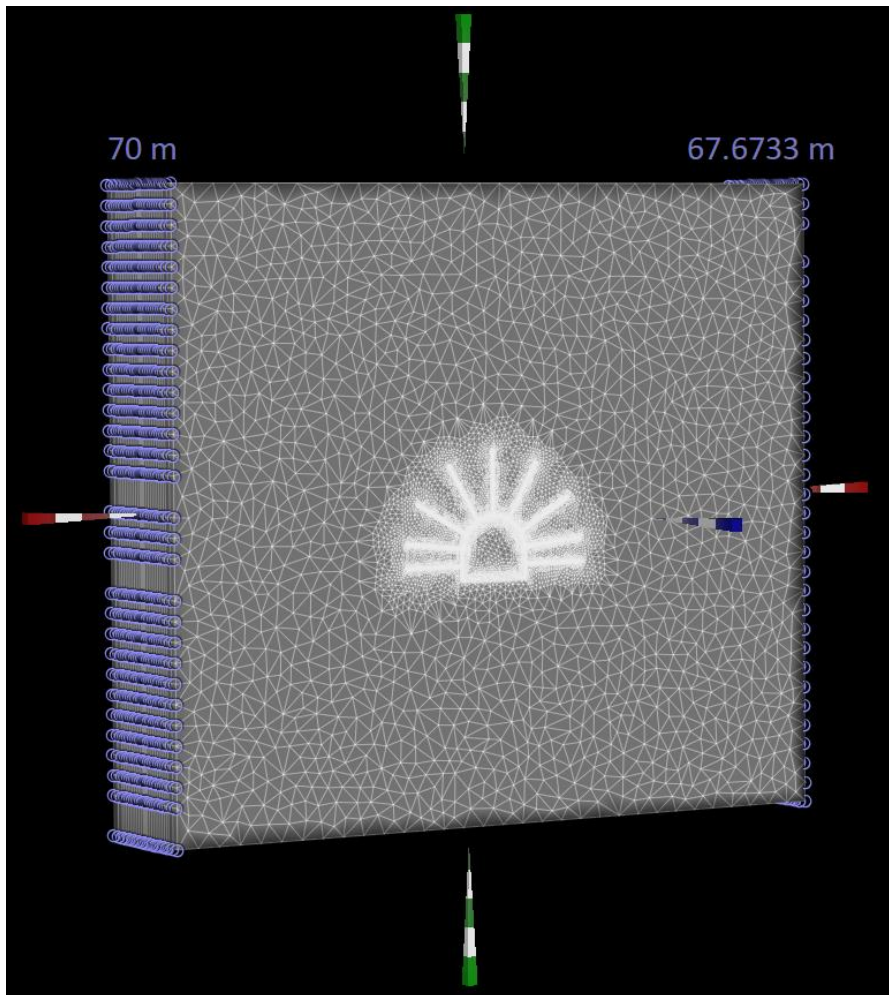


Figura 39. Carico idraulico in condizioni di falda in movimento (FEFLOW)

Ulteriori condizioni al contorno sono inserite nei punti di ingresso e di uscita del fluido. In particolare, attraverso la condizione “Fluid-flux BC” del software FEFLOW è stata impostata la velocità del fluido all’interno dei tubi di 0.4 m/s . Convenzionalmente il segno negativo indica il fluido entrante e quello positivo il flusso uscente.

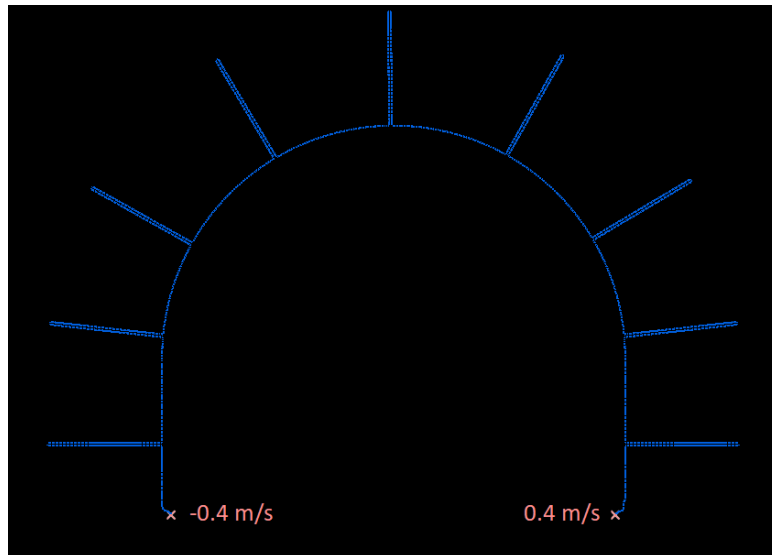


Figura 40. Fluid-flux BC per il sistema di bullonature energetiche (FEFLOW)

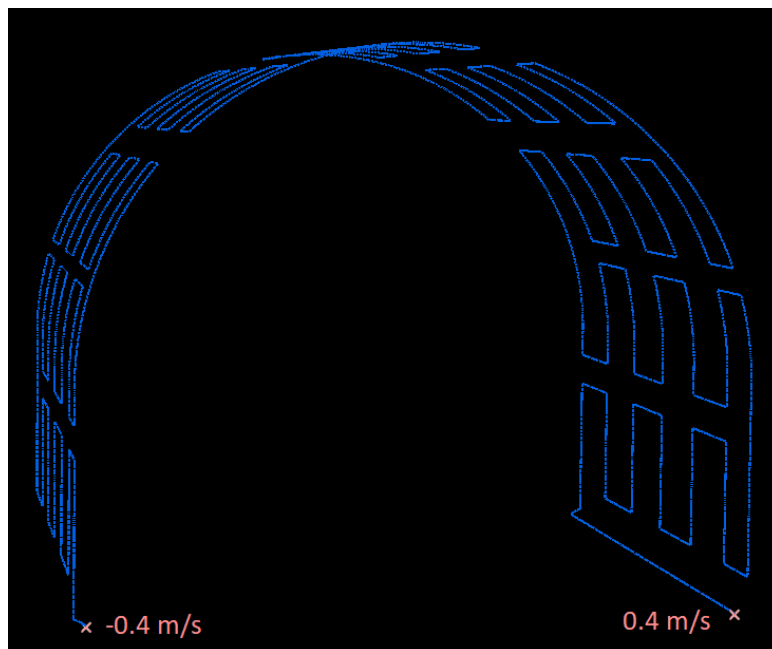


Figura 41. Fluid-flux BC per il sistema di reti energetiche (FEFLOW)

Infine, per impostare la temperatura del fluido entrante nel sistema viene utilizzata la “Temperature BC” presente nel software. Questa condizione, a differenza di quella relativa al flusso che rimane sempre la stessa per tutte le analisi, varia in funzione della stagione che stiamo prendendo in considerazione. Quindi sarà uguale a 2°C nella stagione invernale e a 30°C nella stagione estiva. Di seguito sono riportate le due condizioni rispettivamente per il sistema di chiodature energetiche e per le Reti energetiche.

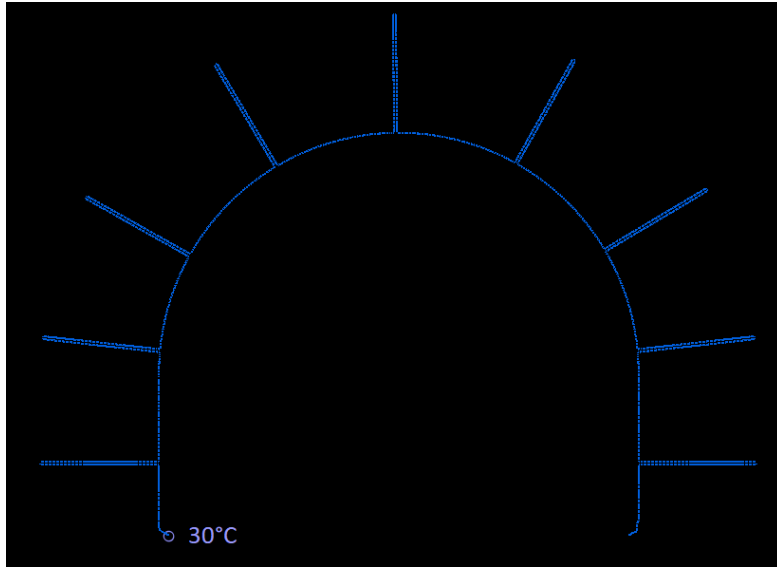


Figura 42. Temperature BC (situazione estiva) per il sistema di bullonature energetiche (FEFLOW)

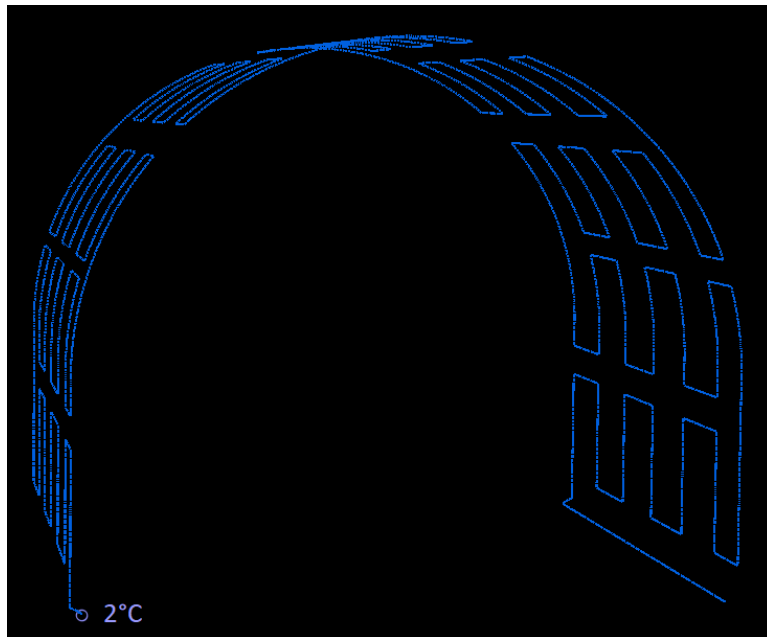


Figura 43. Temperature BC (situazione invernale) per il sistema di reti energetiche (FEFLOW)

6.4 Analisi parametrica

Per valutare al meglio i sistemi proposti in precedenza è stata condotta una analisi parametrica che ha interessato gli aspetti geometrici di entrambi i modelli atti allo scambio termico. Inoltre, è stato valutato il loro rendimento sia nella condizione invernale, ovvero di riscaldamento del fluido, sia nella condizione estiva, ovvero di raffreddamento del fluido. Per quanto riguarda la stagione invernale il fluido è stato immesso a 2°C mentre per la stagione estiva è stato immesso a 30°C. Infine, le soluzioni ritenute più idonee sono state analizzate in condizione di falda in movimento. Nei grafici sotto riportati è rappresentata la temperatura del fluido in entrata (“inlet”) e in uscita (“outlet”) dal sistema di tubazioni. Mentre quello in entrata rimane costante (2°C o 30°C) quello in uscita varia nel tempo poiché nel suo percorso scambia calore con il terreno circostante. Lo scambio si stabilizza intorno ai 30 giorni di analisi e per questo motivo le analisi sono state bloccate al raggiungimento di tale durata; una volta raggiunto l’equilibrio la temperatura del fluido in uscita rimane costante nel tempo. Nella seguente tabella sono riportate tutte le analisi effettuate con la relativa numerazione che sarà richiamata nelle tabelle successive.

6 Modellazione numerica

Numero analisi	Sistema analizzato	Caraterizzazione geometrica del sistema	Temperatura fluido immesso	Caratteristica Falda
1	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 2 m	30°C/estate	Statica
2	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 3 m	30°C/estate	Statica
3	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 4 m	30°C/estate	Statica
4	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 5 m	30°C/estate	Statica
5	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 6 m	30°C/estate	Statica
6	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 2 m	2°C/inverno	Statica
7	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 3 m	2°C/inverno	Statica
8	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 4 m	2°C/inverno	Statica
9	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 5 m	2°C/inverno	Statica
10	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 6 m	2°C/inverno	Statica
11	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 2 m	30°C/estate	1,5 m/d
12	Bullonatura energetica	Lunghezza bullonature: 2 m	2°C/inverno	1,5 m/d
13	Rete equipaggiata con tubazioni	Distanza tratti verticali delle tubazioni: 10 cm	30°C/estate	Statica
14	Rete equipaggiata con tubazioni	Distanza tratti verticali delle tubazioni: 20 cm	30°C/estate	Statica
15	Rete equipaggiata con tubazioni	Distanza tratti verticali delle tubazioni: 30 cm	30°C/estate	Statica
16	Rete equipaggiata con tubazioni	Distanza tratti verticali delle tubazioni: 40 cm	30°C/estate	Statica
17	Rete equipaggiata con tubazioni	Distanza tratti verticali delle tubazioni: 10 cm	2°C/inverno	Statica
18	Rete equipaggiata con tubazioni	Distanza tratti verticali delle tubazioni: 20 cm	2°C/inverno	Statica
19	Rete equipaggiata con tubazioni	Distanza tratti verticali delle tubazioni: 30 cm	2°C/inverno	Statica
20	Rete equipaggiata con tubazioni	Distanza tratti verticali delle tubazioni: 40 cm	2°C/inverno	Statica
21	Rete equipaggiata con tubazioni	Distanza tratti verticali delle tubazioni: 30 cm	30°C/estate	1,5 m/d
22	Rete equipaggiata con tubazioni	Distanza tratti verticali delle tubazioni: 30 cm	2°C/inverno	1,5 m/d
23	Sistema accoppiato di Reti e Bullonature	Lunghezza bullonature: 2 m; Distanza tratti verticali delle tubazioni: 30 cm	30°C/estate	1,5 m/d
24	Sistema accoppiato di Reti e Bullonature	Lunghezza bullonature: 2 m; Distanza tratti verticali delle tubazioni: 30 cm	2°C/inverno	1,5 m/d

Tabella 6. Elenco delle analisi effettuate con relative caratteristiche

6.4.1 Studio parametrico del sistema di bullonature energetiche

Il parametro che viene fatto variare nelle analisi nel caso delle bullonature energetiche poste a raggiera lungo il perimetro del tunnel è la lunghezza delle stesse. Quindi sono state effettuate le simulazioni con le lunghezze di 2, 3, 4, 5 e 6 m (quando per lunghezza si intende quella della chiodatura). Inoltre, le diverse configurazioni geometriche sono state simulate attraverso il software sia in situazione estiva che in situazione invernale; ciò significa che oltre a variare la lunghezza delle bullonature varierà anche la temperatura di immissione del fluido, 2°C in inverno e 30°C in estate.

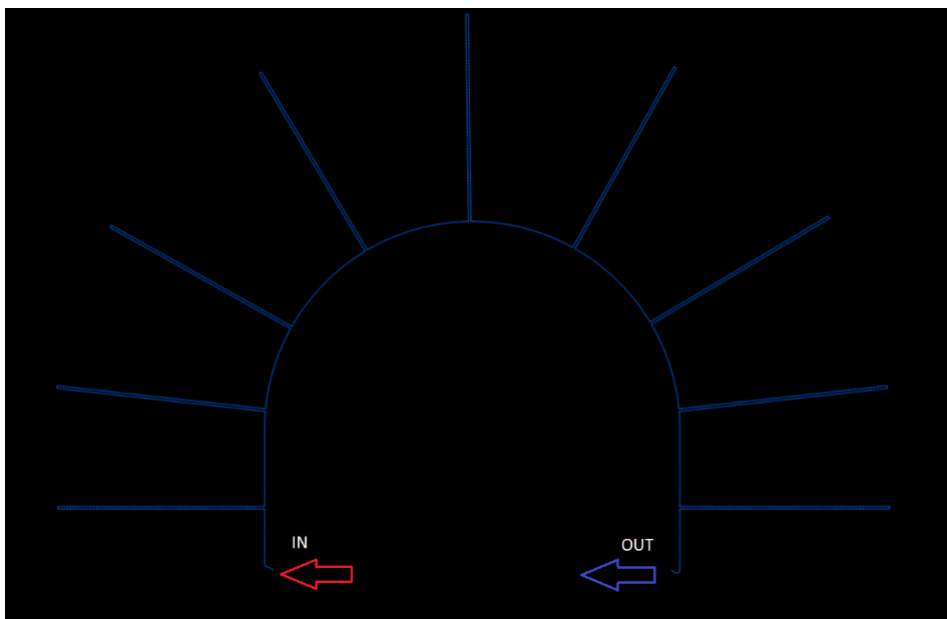


Figura 44. Punto di ingresso e punto di uscita del fluido

Nei grafici riportati in Figura 45 e Figura 46 vengono riportati i risultati di tutte le analisi effettuate rispettivamente per la situazione estiva e per quella invernale.

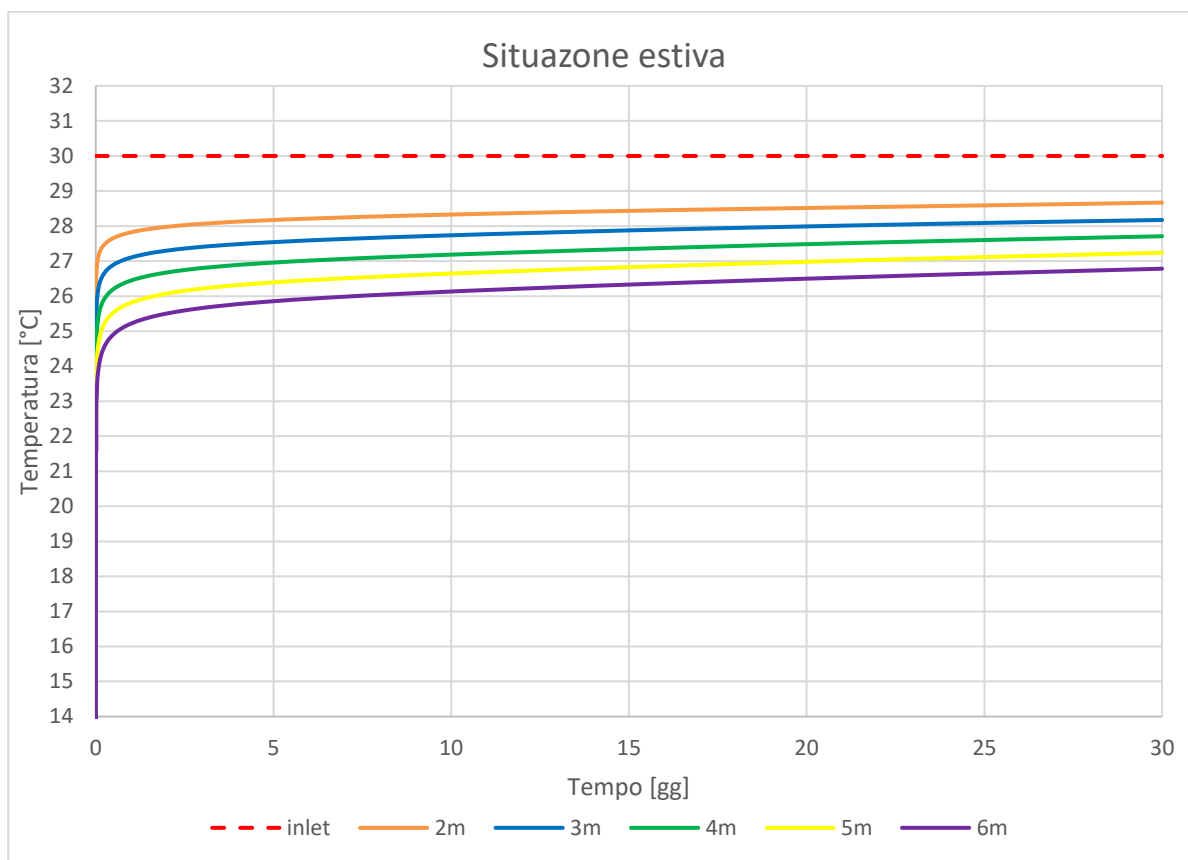


Figura 45. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di bullonature energetiche, situazione estiva (analisi 1, 2, 3, 4, 5)

Nel grafico soprariportato si può notare come la temperatura abbia un incremento molto brusco nel primo giorno di funzionamento del sistema; nei successivi 5 giorni la temperatura continua a salire con una certa importanza, ovvero la variazione è dell'ordine del grado centigrado; infine, vediamo come, oltre il quinto giorno, il flusso di calore si stabilizzi e quindi si arrivi ad una temperatura pressoché costante nel tempo al raggiungimento dei 30 giorni di analisi. In particolare, si può ricavare questa informazione dalla condizione di pseudo parallelismo fra la retta che rappresenta la temperatura del fluido entrante e la parte finale delle curve che rappresentano la temperatura del fluido uscente. Un altro aspetto da valutare è la regolarità con cui incrementa la temperatura di uscita in funzione della diminuzione della lunghezza della bullonatura. Proprio la distanza nel tratto finale fra la retta e la curva restituisce il ΔT che risulta essere il risultato principale

dell'analisi numerica. Infatti, grazie a questi valori, come sarà spiegato in seguito, è possibile calcolare la potenza ricavabile dal sistema in kW.

Analisi	Lunghezza bullonature [m]	ΔT estate [-]
1	2	1,3
2	3	1,8
3	4	2,3
4	5	2,8
5	6	3,3

Tabella 7. ΔT per il sistema di bullonature energetiche nella situazione estiva

Di seguito sono riportati i risultati dell'analisi parametrica condotta in situazione invernale e quindi con una temperatura del fluido immesso di 2°C.

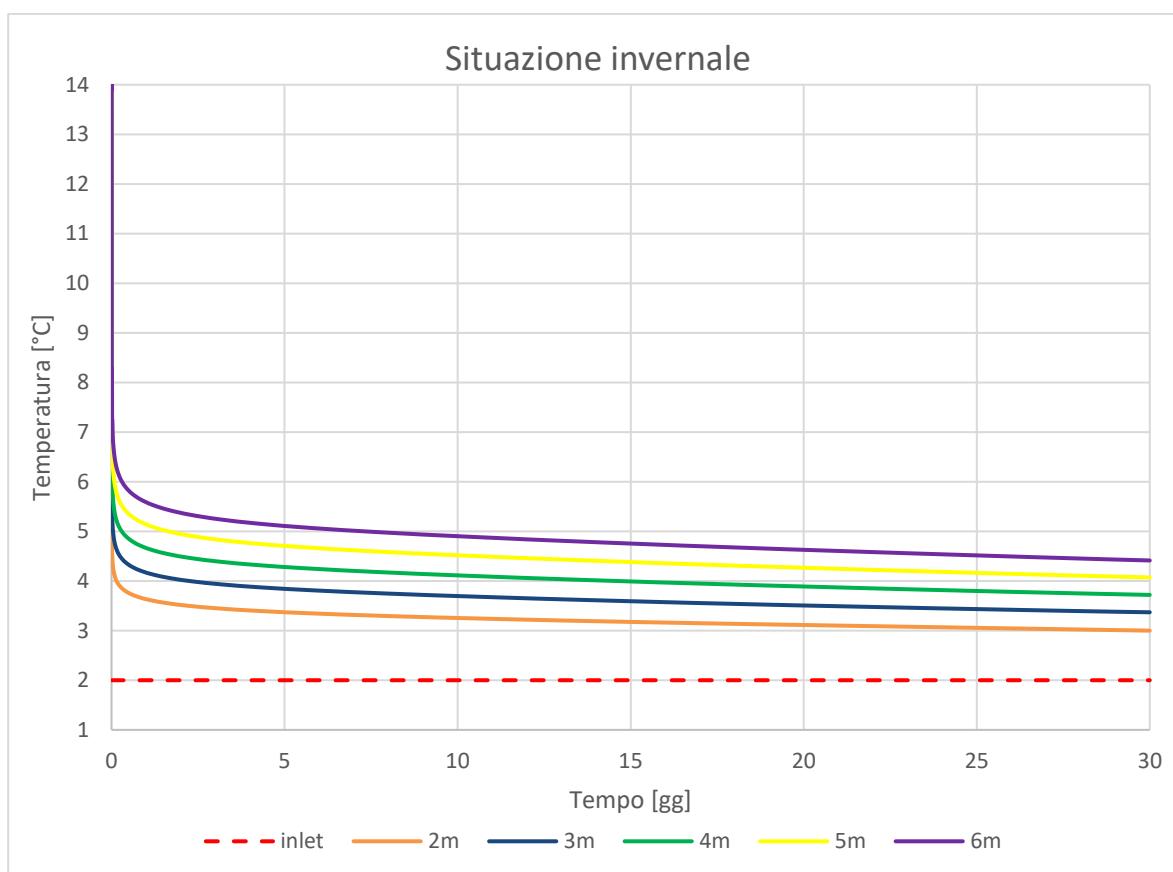


Figura 46. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di bullonature energetiche, situazione invernale (analisi 6, 7, 8, 9, 10)

Per quanto riguarda la situazione invernale la situazione e i criteri di lettura sono del tutto simili a quelli utilizzati per l'analisi della situazione estiva. Si può comunque notare come i ΔT siano minori nella situazione estiva, questo perché il divario iniziale di temperatura è maggiore nella suddetta situazione (16°C) rispetto a quella invernale (12°C).

Analisi	Lunghezza bullonature [m]	ΔT inverno [-]
6	2	1
7	3	1,4
8	4	1,7
9	5	2,1
10	6	2,4

Tabella 8. ΔT per il sistema di bullonature energetiche nella situazione invernale

Una volta note le differenze di temperatura fra fluido entrante e fluido uscente è possibile valutare la potenza estraibile dal sistema attraverso la formula del calore:

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

Dove:

- Q rappresenta la potenza estraibile [kW];
- $\dot{m} = \rho_w v A$ rappresenta la velocità di flusso massica [kg/s];
- c è il calore specifico dell'acqua [$kJ/kg K$];
- ΔT rappresenta la differenza di temperatura fra fluido entrante e fluido uscente dal sistema (risultato dell'analisi numerica) [-].

Nella seguente tabella sono riportati i valori utilizzati per il calcolo.

ρ_w [kg/m^3]	997
v [m/s]	0.4
A [m^2]	0.000314
c [$kJ/kg K$]	4.186
\dot{m} [kg/s]	0.1252

Tabella 9. Valori utilizzati per il calcolo del calore estraibile dal sistema geotermico

Quindi inserendo i valori ΔT all'interno della formula otteniamo valori di potenza estraibile in funzione della lunghezza della bullonatura energetica.

Analisi	Lunghezza bullonature [m]	Potenza estraibile in situazione estiva, Q [kW]
1	2	0,68
2	3	0,94
3	4	1,21
4	5	1,47
5	6	1,73

Tabella 10. Potenza estraibile in situazione estiva dal sistema di bullonature energetiche

Analisi	Lunghezza bullonature [m]	Potenza estraibile in situazione invernale, Q [kW]
6	2	0,52
7	3	0,73
8	4	0,89
9	5	1,10
10	6	1,26

Tabella 11. Potenza estraibile in situazione invernale dal sistema di bullonature energetiche

I risultati si presentano graficamente come segue.

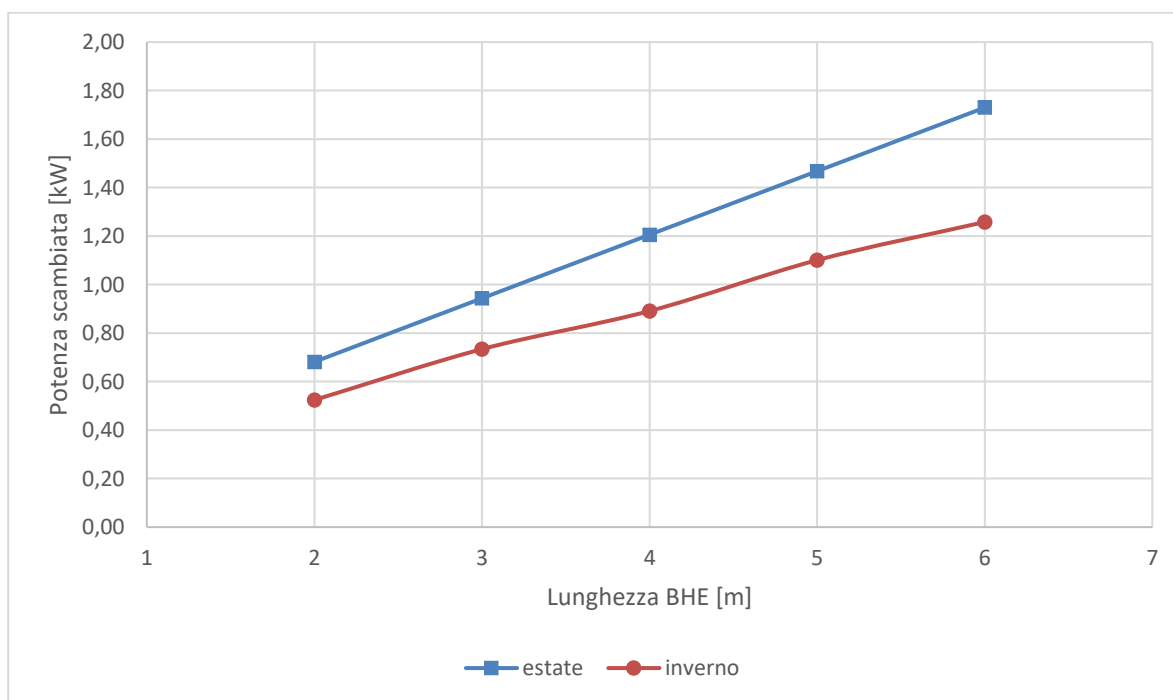


Figura 47. Andamento della potenza scambiata dal sistema di chiodature energetiche in funzione della loro lunghezza

Dalla rappresentazione grafica dei risultati si può notare, come già accennato in precedenza, che la spezzata che rappresenta la potenza scambiata sia, per ogni lunghezza delle chiodature energetiche, posizionata più in alto con riferimento all'asse delle ϵ . Questo perché più è grande la differenza di temperature fra cui il sistema lavora e maggiore sarà il calore scambiato in accordo con il Primo Principio della Termodinamica.

Inoltre, l'andamento è chiaramente lineare e ciò significa che non si può dire a priori quale sia la lunghezza ottimale per lo scambio termico per la bullonatura energetica. Infatti, visto l'andamento costantemente crescente (nella forbice di lunghezze utilizzate per l'analisi) la conclusione suggerita potrebbe essere quella per cui più la bullonatura è lunga più la potenza estraibile è grande. Ovviamente questo è vero ma bisogna tenere a mente che le bullonature nascono per un'esigenza strutturale e di sostegno e che quindi sarà questo il criterio con cui verosimilmente si sceglierà la loro lunghezza. In più bisognerebbe aggiungere una analisi costi benefici che potrebbe mostrare come non sia del tutto conveniente creare chiodature troppo lunghe sulle quali inciderebbe il costo di realizzazione. Infine non è da dimenticare il fatto che fori inutilmente lunghi (da un punto di vista strutturale) potrebbero andare a diminuire le caratteristiche dell'ammasso roccioso intorno alla galleria. La successiva analisi con falda in movimento, condizione spiegata nel paragrafo 6.3, è stata effettuata prendendo in considerazione delle bullonature energetiche della lunghezza di 2 m che risulta essere una lunghezza spesso utilizzata nella pratica comune.

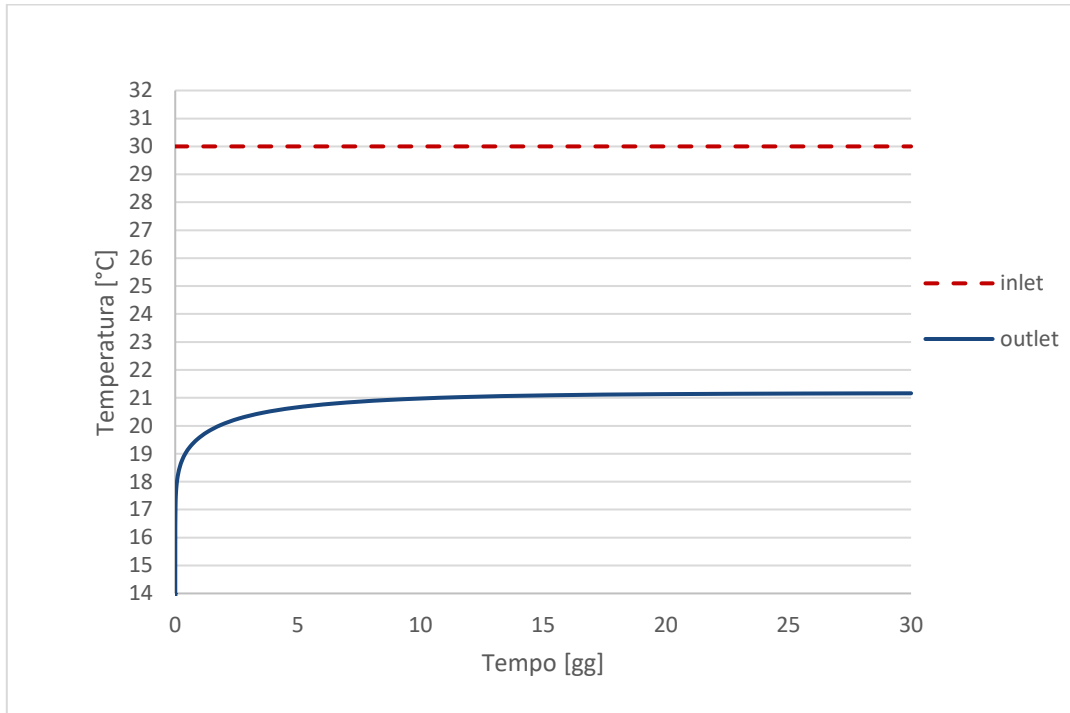


Figura 48. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di bullonature energetiche caratterizzato da una lunghezza di 2 metri e da falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione estiva (analisi 11)

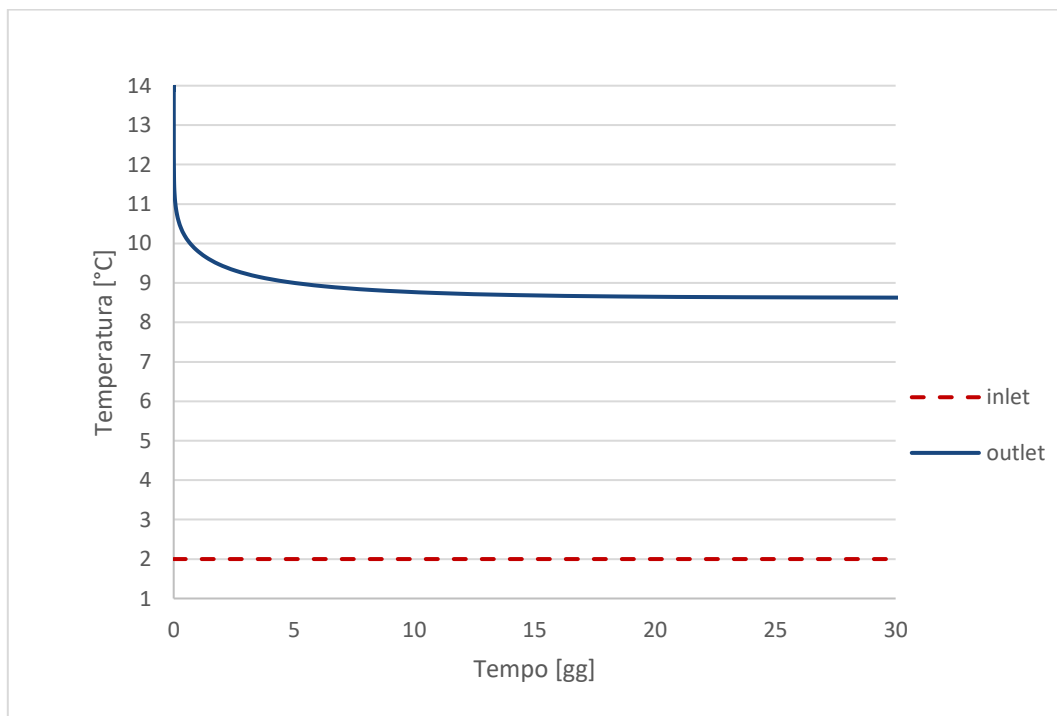


Figura 49. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di bullonature energetiche caratterizzato da una lunghezza di 2 metri e da falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione invernale (analisi 12)

Anche graficamente si può notare come i quantitativi di calore scambiati siano ampiamente aumentati in presenza di falda. Questo è un risultato atteso visto che lo scambio termico aumenta in presenza di un fluido in movimento e visto che la velocità apparente di falda utilizzata risulta essere relativamente alta (1.5 m/d). Nella seguente tabella sono riportati i nuovi valori di ΔT e quindi le nuove potenze scambiate.

Analisi	Situazione	Lunghezza bullonatura [m]	ΔT [-]	Potenza estraibile, Q [kW]
11	Estate	2	8,8	4,61
12	Inverno	2	6,6	3,46

Tabella 12. Valori di ΔT e di potenza estraibile dal sistema di bullonature energetiche in presenza di falda in movimento con velocità 1.5 m/d

Confrontando questi valori con quelli ottenuti con il sistema immerso nel terreno con falda in condizione statica si può subito comprendere quali siano i benefici del flusso incidente sulle bullonature. Si passa infatti da una potenza estraibile nella situazione estiva di 0.68 kW a quella di 4.61 kW e da una potenza estraibile nella situazione invernale di 0.52 kW a quella di 3.46 kW. Questo significa che in presenza di falda si ha un incremento della potenza estraibile veramente notevole e in particolare di circa il 578% per la situazione estiva e di circa il 565% per la situazione invernale.

Un altro aspetto interessante da valutare è come in presenza di falda in movimento non tutte le chiodature scambino la stessa quantità di calore, come avviene nel caso della falda in condizione statica. Quindi si riscontra una fortissima correlazione fra velocità di falda non solo nella potenza totale scambiata ma anche nella valutazione dei singoli bulloni energetici. Nella seguente immagine ottenuta attraverso il software FEFLOW i bulloni sono stati numerati con un numero che va da 1 a 9 con il quale sarà identificato nei seguenti grafici. Inoltre, l'immagine mostra l'andamento delle velocità di falda nell'intorno della galleria.

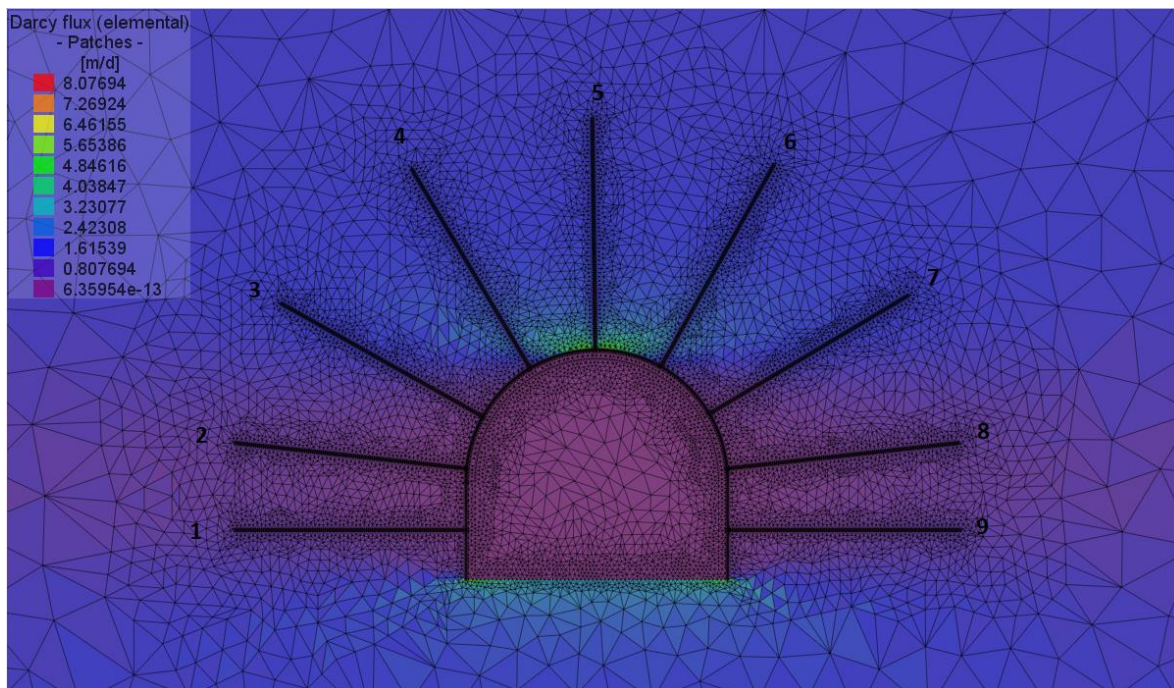


Figura 50. Numerazione bullonature e andamento delle velocità di falda (FEFLOW)

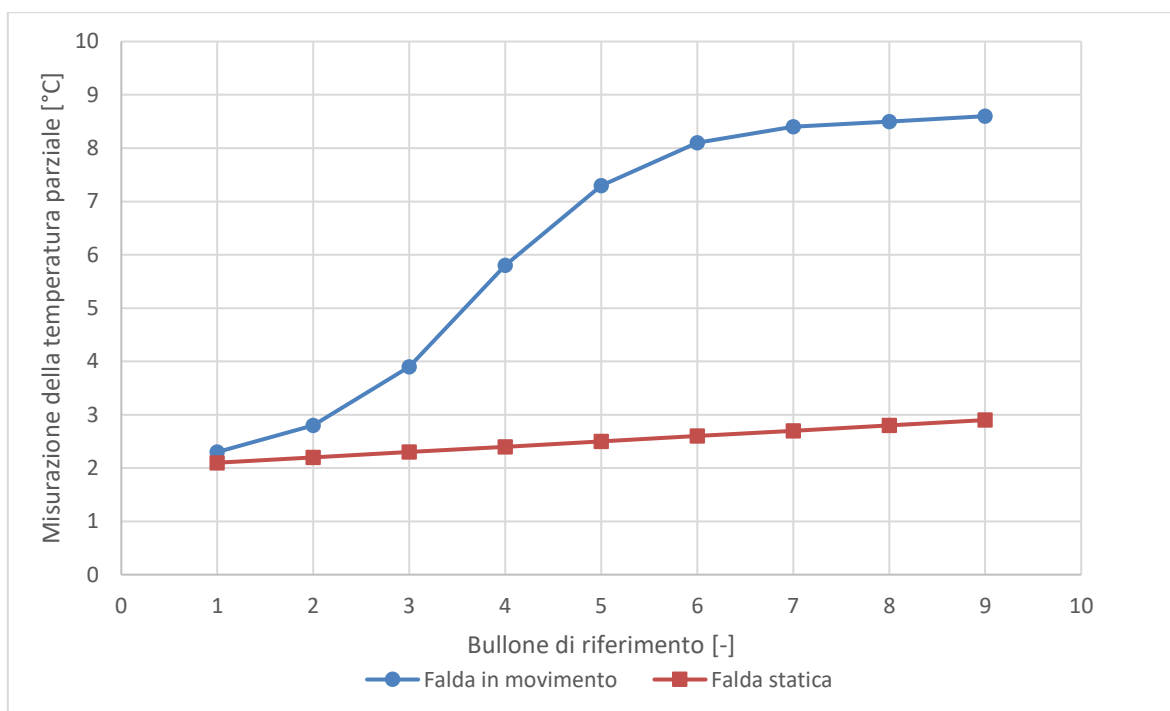


Figura 51. Misurazione delle temperature alle estremità delle bullonature energetiche alla fine delle analisi 2 e 11 (situazione estiva con falda in condizione statica e con falda in movimento)

Nei grafici sopra riportati viene graficata la temperatura misurata alla fine dell'analisi (30 giorni) all'estremità superiore in funzione del bullone di riferimento (numerazione in Figura 50). Come si evince dall'andamento delle curve, in condizione di falda statica l'andamento è lineare e quindi l'incremento di temperatura attraverso le chiodature è pressoché costante e possiamo giungere alla conclusione che ogni bullone energetico è in grado di ricavare lo stesso quantitativo di potenza; quindi non ci sono posizioni da privilegiare rispetto ad altre. L'andamento è molto differente se la falda è in movimento; si può notare infatti come la parte centrale della curva sia molto più ripida rispetto alla parte iniziale e alla parte finale. Proprio grazie a questa forma si può comprendere come i bulloni 3, 4, 5 e 6 siano in grado di scambiare una quantità di calore sensibilmente maggiore rispetto ai bulloni 1, 2, 7, 8 e 9. Come si può infatti vedere in Figura 50 la falda è rallentata dalla geometria del problema ed in particolare dalla presenza del tunnel che essendo impermeabile rallenta la falda alla sua sinistra e alla sua destra. In conclusione, essendo alcuni bulloni molto più performanti di altri, con una analisi più dettagliata e inserita in un contesto reale, si può valutare se procedere con l'inserimento delle tubazioni in accoppiamento con tutti i bulloni o solamente con quelli posizionati nei punti più vantaggiosi da un punto di vista dello scambio termico.

6.4.2 Studio parametrico del sistema di reti energetiche

Il parametro che viene fatto variare nelle analisi nel caso delle reti energetiche è la spaziatura dei tratti verticali di condotta. Quindi sono state effettuate le simulazioni con spaziature di 10, 20, 30 e 40 cm. Inoltre, le analisi sono state condotte per la situazione estiva e per la situazione invernale. La sovrapposizione dei risultati in un unico grafico risulta poco chiara e comprensibile a causa del piccolissimo scostamento di valori riscontrato nelle seguenti analisi. Pertanto, come si vedrà successivamente, viene riportato un dettaglio del grafico che contiene le informazioni di maggior interesse, ovvero la parte di grafico in cui si riscontra un equilibrio dei valori delle temperature di uscita. Inoltre, i risultati sono quindi presentati singolarmente e confrontati successivamente in Tabella 13 e Tabella 14.

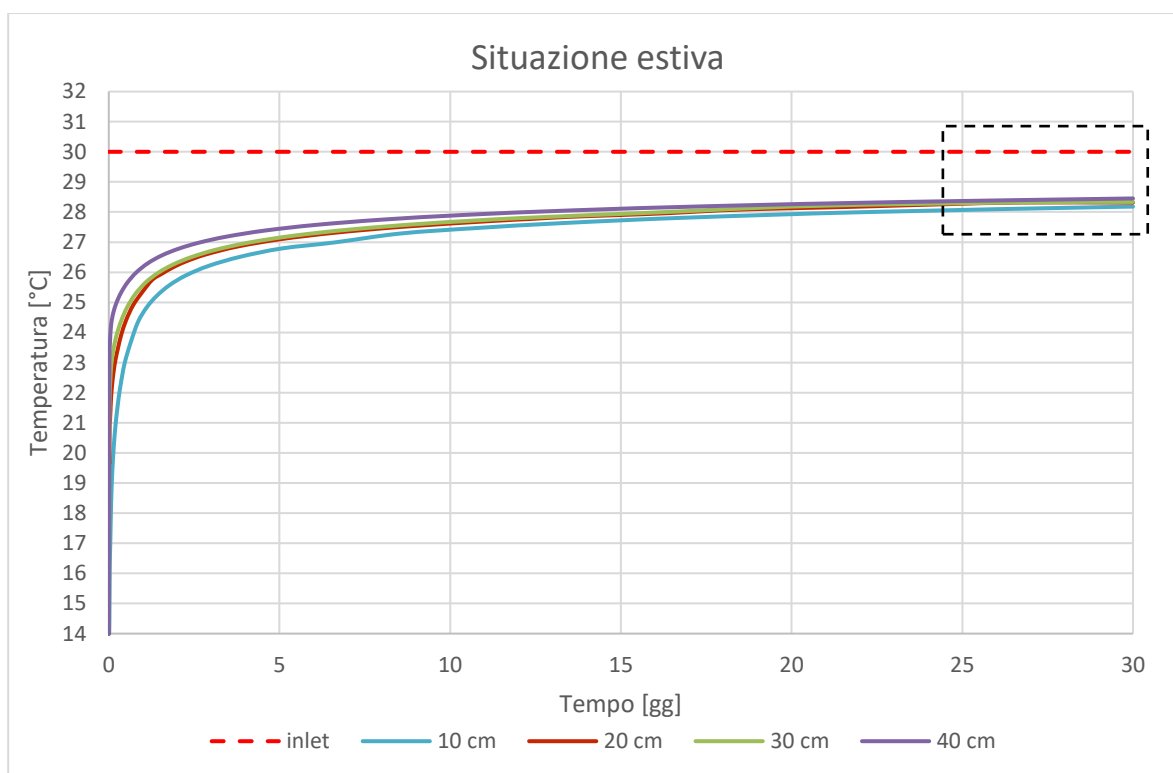


Figura 52. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di reti energetiche, situazione estiva (analisi 13, 14, 15, 16)

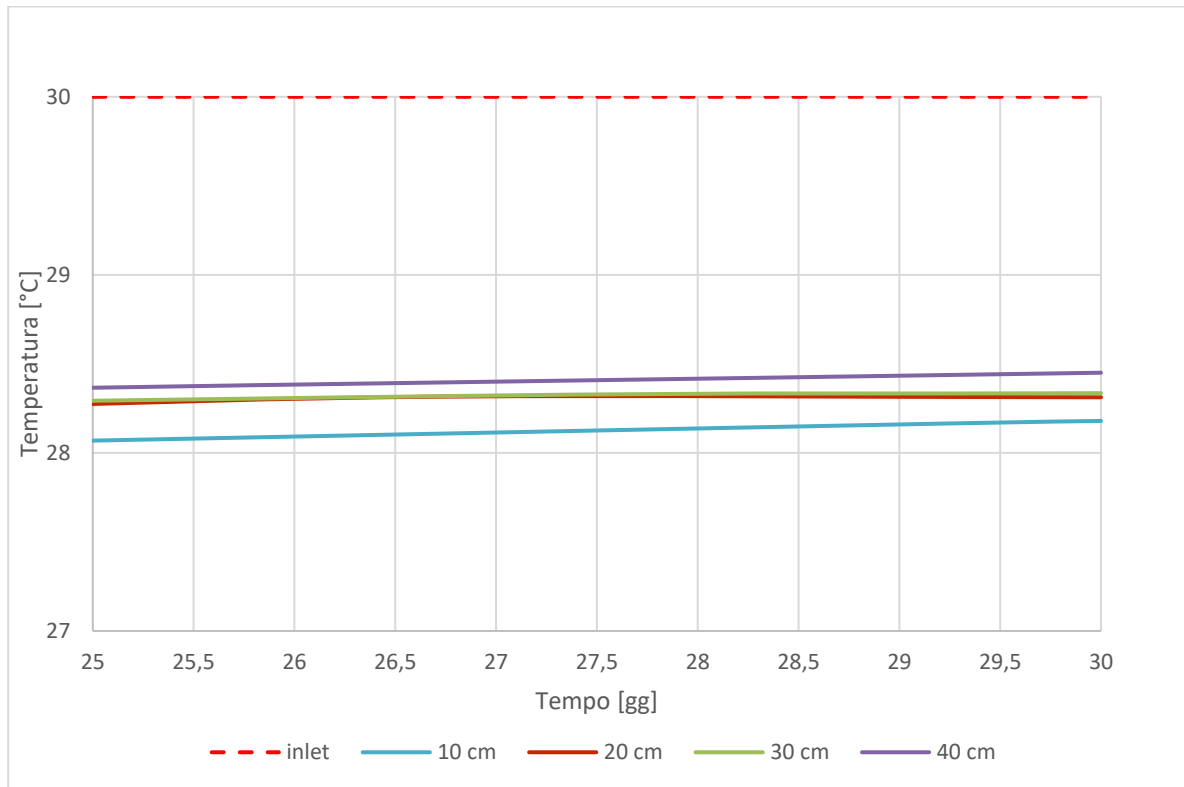


Figura 53. Dettaglio della porzione finale del grafico in Figura 52

I criteri di lettura dei grafici soprariportati sono del tutto simili a quelli utilizzati per l'analisi delle bullonature energetiche. Infatti, si può notare un brusco aumento della temperatura nel primo giorno, una fase di stabilizzazione nei successivi 5 giorni e infine una condizione di parallelismo fra la curva che rappresenta la temperatura del flusso in uscita e la retta che rappresenta la temperatura del flusso in entrata che suggerisce, con quelle condizioni, che da quel punto temporale in avanti la risposta sia costante nel tempo. Proprio a questo punto avviene la lettura della differenza di temperatura (ΔT) fra fluido entrante e fluido uscente.

Analisi	Spaziatura tratti verticali [cm]	ΔT estate [-]
13	10	1,82
14	20	1,69
15	30	1,67
16	40	1,55

Tabella 13. ΔT per il sistema di bullonature energetiche nella situazione estiva

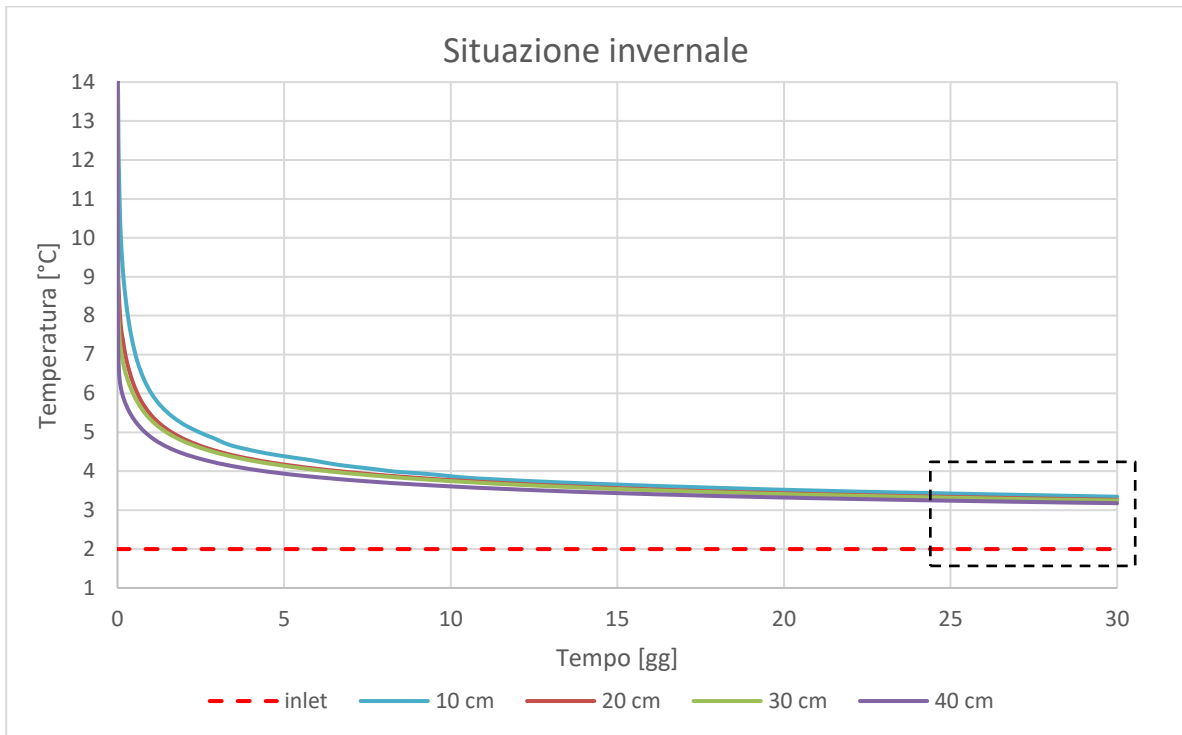


Figura 54. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di reti energetiche, situazione invernale (analisi 17, 18, 19, 20)

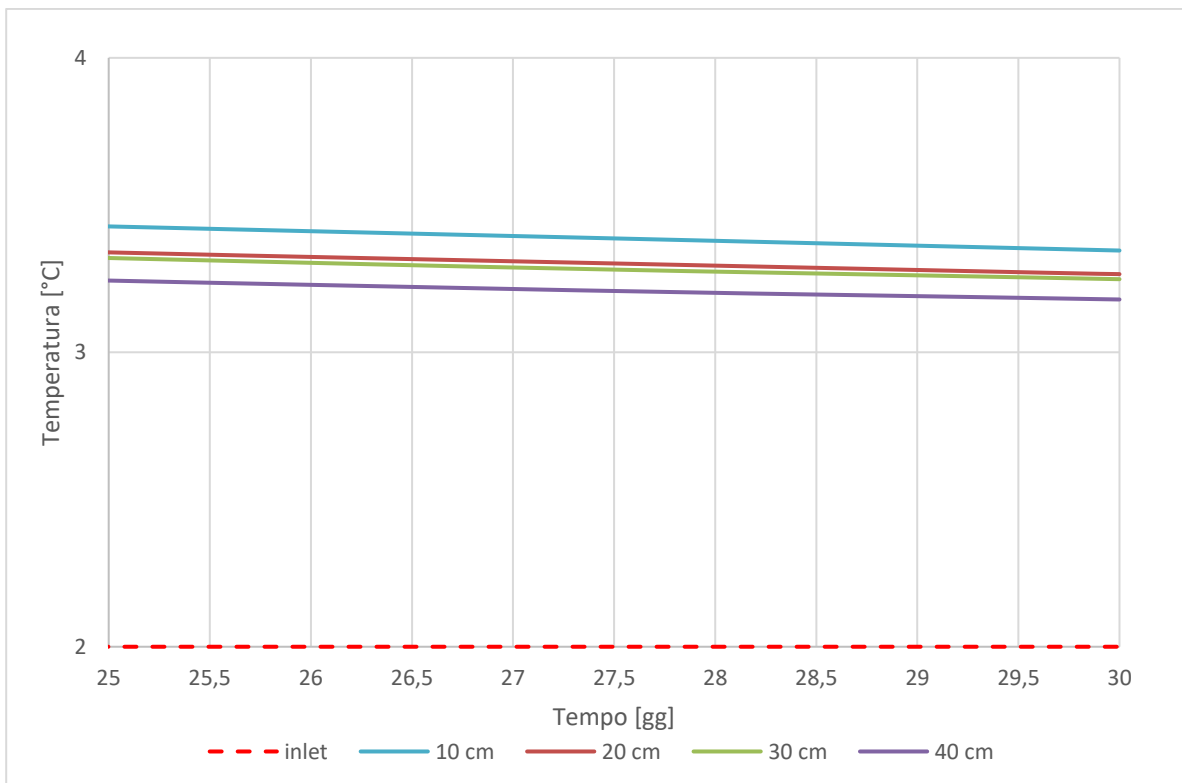


Figura 55. Dettaglio della porzione finale del grafico in Figura 54

In modo del tutto analogo alla situazione estiva e all'analisi delle bullonature energetiche, anche per la situazione invernale il risultato principale delle analisi risiede nel ΔT fra fluido in ingresso e fluido in uscita.

Analisi	Spaziatura tratti verticali [cm]	ΔT inverno [-]
17	10	1,34
18	20	1,27
19	30	1,25
20	40	1,18

Tabella 14. ΔT per il sistema di reti energetiche nella situazione invernale

Una volta note le differenze di temperatura fra fluido entrante e fluido uscente è possibile valutare la potenza estraibile dal sistema attraverso la formula del calore:

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

Dove:

- Q rappresenta la potenza estraibile [kW];
- $\dot{m} = \rho_w v A$ rappresenta la velocità di flusso massica [kg/s];
- c è il calore specifico dell'acqua [kJ/kg K];
- ΔT rappresenta la differenza di temperatura fra fluido entrante e fluido uscente dal sistema (risultato dell'analisi numerica) [-].

Quindi inserendo i valori ΔT e i valori riportati in Tabella 9 all'interno della formula otteniamo valori di potenza estraibile in funzione della spaziatura dei tratti verticali delle reti energetiche.

6 Modellazione numerica

Analisi	Spaziatura tratti verticali [cm]	Potenza estraibile in situazione estiva, Q [kW]
13	10	0,95
14	20	0,89
15	30	0,88
16	40	0,81

Tabella 15. Potenza estraibile in situazione estiva dal sistema di reti energetiche

Analisi	Spaziatura tratti verticali [cm]	Potenza estraibile in situazione invernale, Q [kW]
17	10	0,70
18	20	0,67
19	30	0,66
20	40	0,62

Tabella 16. Potenza estraibile in situazione invernale dal sistema di reti energetiche

I risultati si presentano graficamente come segue.

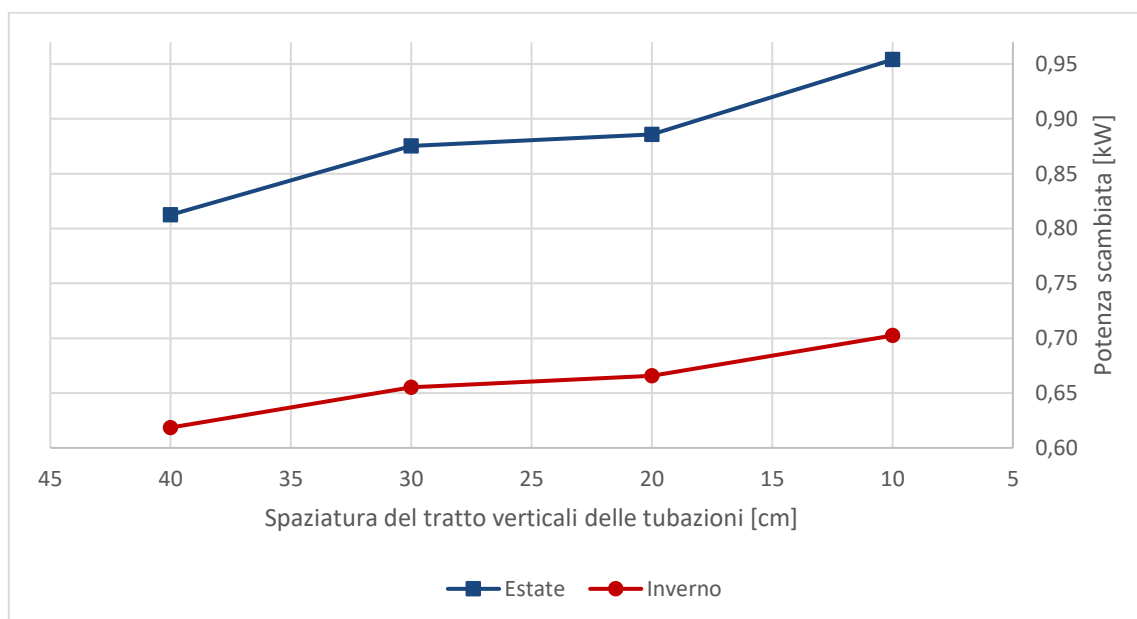


Figura 56. Andamento della potenza scambiata dal sistema di reti energetiche in funzione della spaziatura dei tratti verticali

Per meglio comprendere il grafico riportato in Figura 56 e per avere un criterio decisionale più solido, introduciamo il concetto di Potenza scambiata per metro lineare di tubazione (W/m) ed effettuiamo una analisi costi-benefici. Per ogni configurazione geometrica (le diverse spaziature dei tratti verticali delle tubazioni) è possibile valutare quanti watt

vengano scambiati per ogni metro di tubazione. Di seguito vengono riportati i risultati in forma tabulare e in forma grafica.

Spaziatura dei tratti verticali di tubazione [cm]	Lunghezza totale della tubazione [m]	Potenza scambiata per metro lineare in situazione estiva [W/m]
40	90	9,0
30	119	7,4
20	147	6,0
10	262	3,6

Tabella 17. Valori di potenza scambiata per metro lineare di tubazione in situazione estiva

Spaziatura dei tratti verticali di tubazione [cm]	Lunghezza totale della tubazione [m]	Potenza scambiata per metro lineare in situazione invernale [W/m]
40	90	6,9
30	119	5,5
20	147	4,5
10	262	2,7

Tabella 18. Valori di potenza scambiata per metro lineare di tubazione in situazione invernale

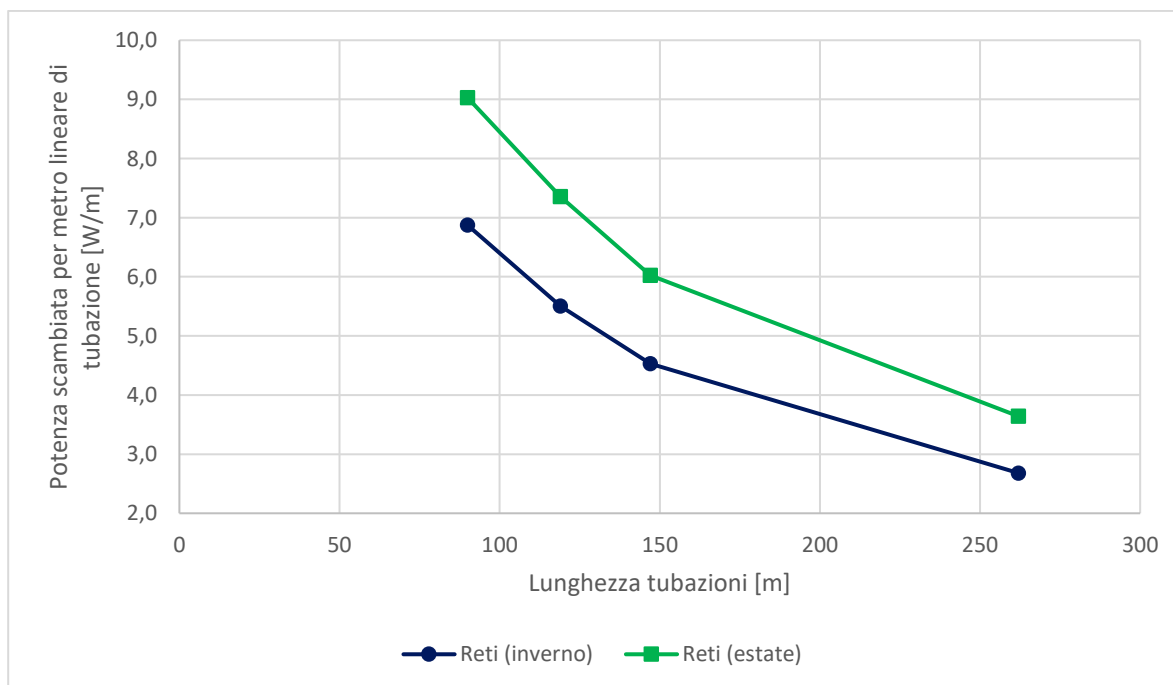


Figura 57. Andamento della potenza scambiata per metro lineare di tubazione

L'aspetto da aggiungere alla potenza effettivamente scambiata per avere una lettura più veritiera della situazione sta nel progressivo decremento dei watt prodotti al metro di tubazione con l'aumentare della lunghezza della stessa. Infatti, dal grafico in Figura 56 si potrebbe pensare che la soluzione migliore sia un sistema con spaziatura di 10 cm dei tratti verticali perché, sia in situazione estiva sia in situazione invernale, presenta una potenza scambiata massima superiore alle altre configurazioni geometriche. Aggiungendo invece l'informazione contenuta nel grafico in Figura 57 si può notare che sì, la potenza scambiata per un sistema con spaziatura 10 cm aumenti, ma che allo stesso tempo i watt scambiati al metro lineare di tubazione calano drasticamente. Sostanzialmente il criterio si risolve con una analisi costi benefici. Il prezzo preso in considerazione al metro lineare di tubazione è di 2.7 €. Nella seguente tabella sono riportati i costi fissi della materia prima del sistema (tubazioni); in questa analisi preliminare non è stata presa in conto la manodopera e i costi operativi del sistema.

Spaziatura [cm]	Lunghezza tubazioni [m]	Costo [€]
40	90	243
30	119	321
20	147	397
10	262	707

Tabella 19. Costi delle tubazioni per le varie configurazioni geometriche

Per andare a valutare i benefici consideriamo 1800 ore d'uso adibito a riscaldamento e 1400 ore d'uso adibito a raffrescamento e un prezzo medio in Italia di un kWh di 0.17 €. Con questi valori i ricavi in euro dopo un anno di utilizzo del sistema sono i seguenti.

Spaziatura [cm]	kWh per il raffrescamento (1400 ore)	Ricavo annuo dovuto al solo raffrescamento [€]
40	1137	193
30	1226	208
20	1240	211
10	1336	227

Tabella 20. Ricavi annui in situazione estiva

6 Modellazione numerica

Spaziatura [cm]	kWh per il riscaldamento (1800 ore)	Ricavo annuo dovuto al solo riscaldamento [€]
40	1113	189
30	1179	201
20	1198	204
10	1264	215

Tabella 21. Ricavi annui in condizione invernale

Spaziatura [cm]	kWh totali (3200 ore)	Ricavo annuo totale [€]
40	2251	283
30	2405	409
20	2439	415
10	2600	442

Tabella 22. Ricavi annui totali

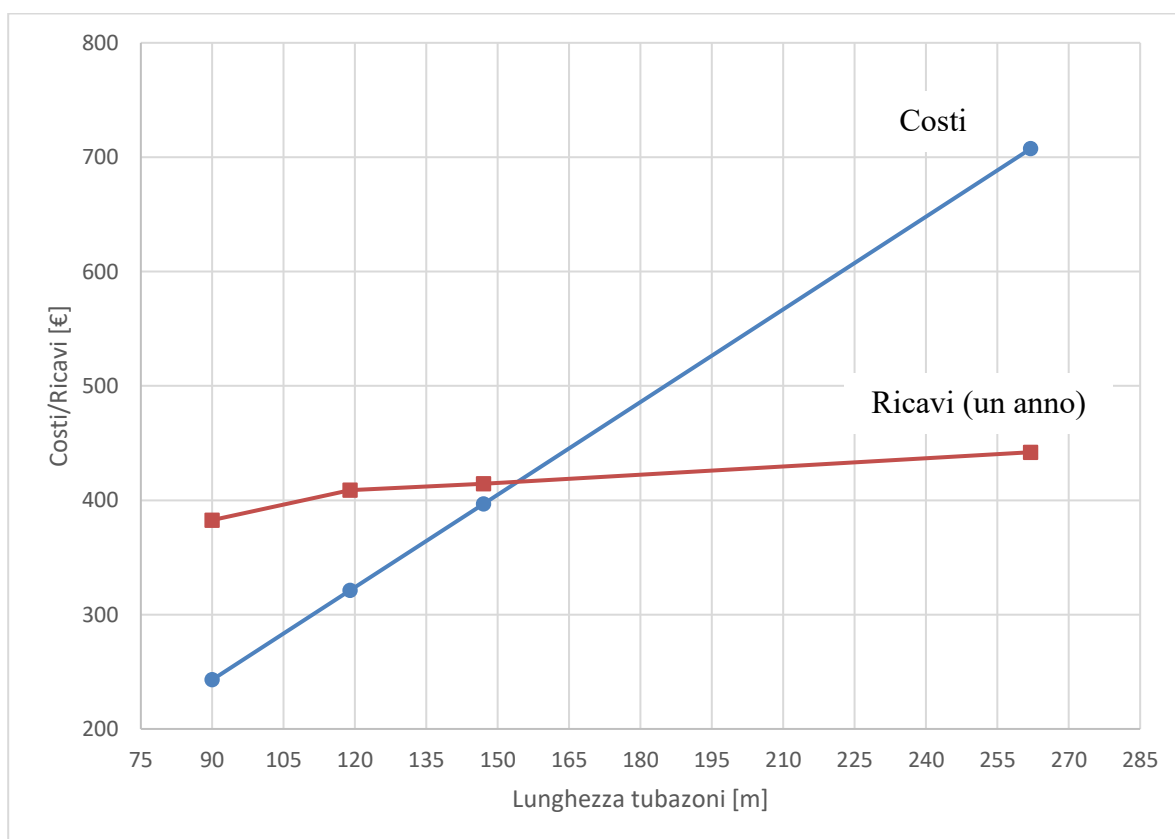


Figura 58. Confronto costi benefici per le diverse configurazioni geometriche delle reti energetiche

Quindi, come sottolineato dal grafico in Figura 58, per osservare un piccolo aumento di ricavi bisogna far fronte ad un significativo aumento dei materiali necessari per creare il sistema e quindi ad un aumento dei costi di messa in opera. Questa condizione è suggerita anche dall'andamento geometrico della spezzata rappresentante i ricavi. Infatti, dopo un percettibile aumento nel passaggio fra un sistema con spaziatura 40 cm ad uno con spaziatura 30 cm il trend tende ad appiattirsi e quindi i ricavi rimangono pressoché costanti all'aumentare dei costi. Per le successive considerazioni è quindi stato scelto un sistema caratterizzato da spaziatura di 30 cm. Interpolando questo risultato con quello relativo alla potenza totale scambiata e al quella relativa ai watt per metro lineare di tubazione scambiati, la successiva analisi con falda in movimento, condizione spiegata nel paragrafo "Condizioni iniziali e condizioni al contorno", è stata effettuata prendendo in considerazione delle reti con spaziatura dei tratti verticali di 30 cm.

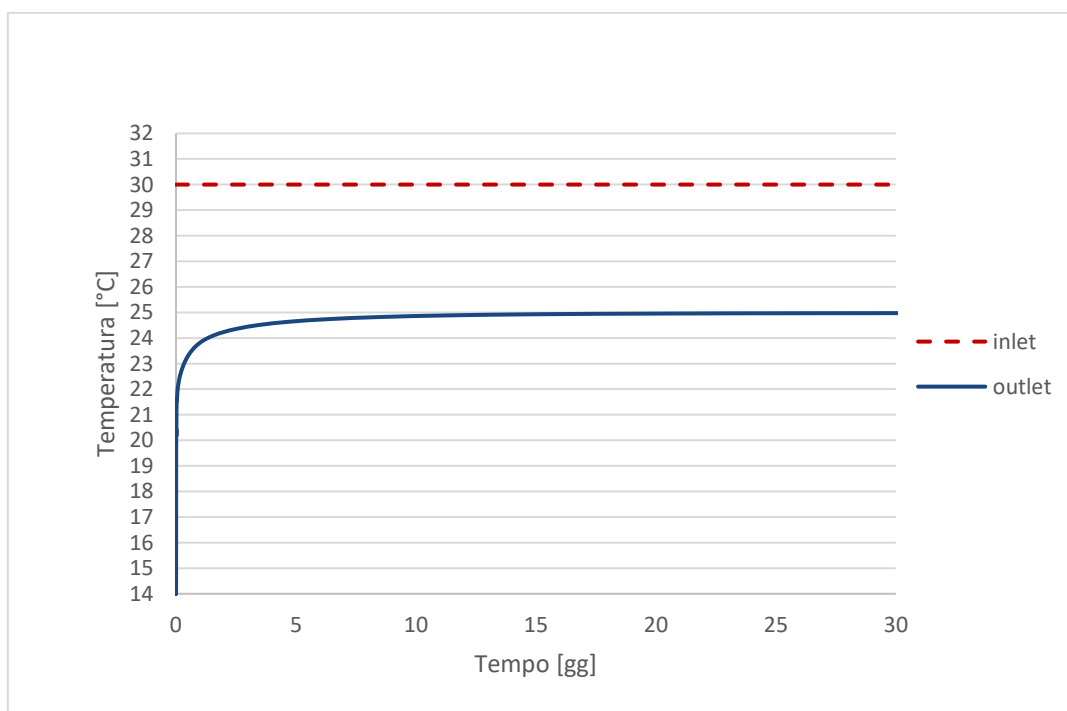


Figura 59. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di reti energetiche caratterizzato da una spaziatura dei tratti verticali di 30 cm e da falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione estiva (analisi 21)

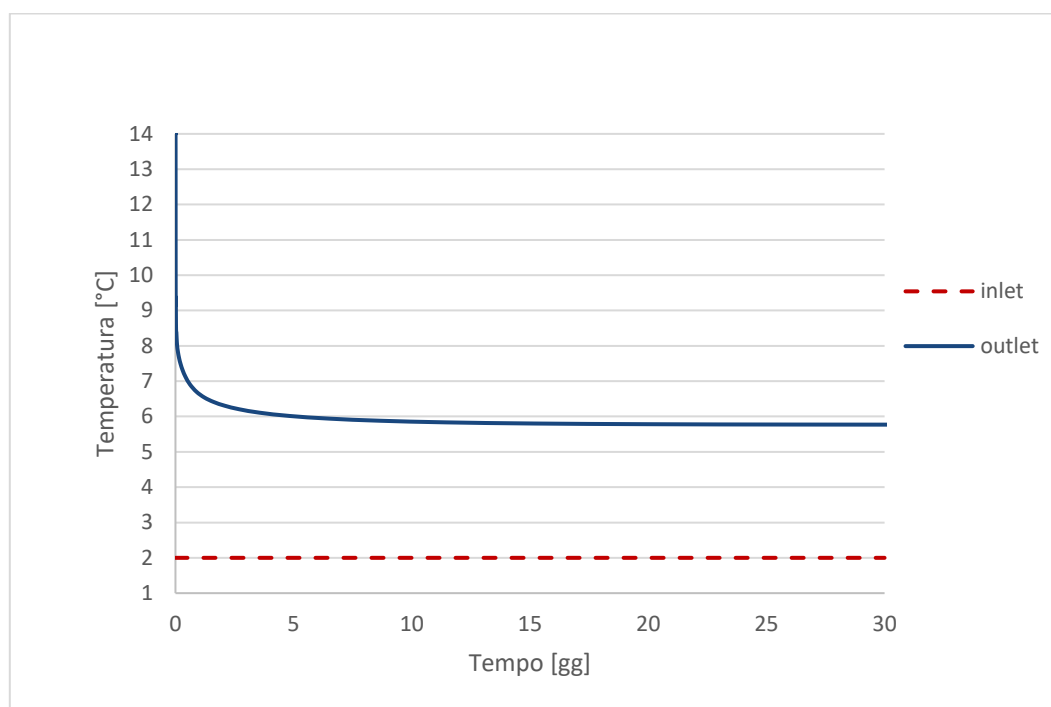


Figura 60. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema di reti energetiche caratterizzato da una spaziatura dei tratti verticali di 30 cm e da falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione invernale (analisi 22)

Come nel caso delle bullonature energetiche anche per le reti si può notare graficamente come i quantitativi di calore scambiati siano ampiamente aumentati in presenza di falda. Questo è un risultato atteso visto che lo scambio termico aumenta in presenza di un fluido in movimento e visto che la velocità apparente di falda utilizzata risulta essere relativamente alta (1.5 m/d). Nella seguente tabella sono riportati i nuovi valori di ΔT e quindi le nuove potenze scambiate.

Analisi	Situazione	Spaziatura tratti verticali delle tubazioni [cm]	ΔT [-]	Potenza estraibile, Q [kW]
21	Estate	30	5	2,6
22	Inverno	30	3,7	2

Tabella 23. Valori di ΔT e di potenza estraibile dal sistema di reti energetiche in presenza di falda in movimento con velocità 1.5 m/d

Confrontando questi valori con quelli ottenuti con il sistema immerso nel terreno con falda in condizione statica si può subito comprendere quali siano i benefici del flusso incidente sulle bullonature. Si passa infatti da una potenza estraibile nella situazione estiva di 0.88 kW a quella di 2.6 kW e da una potenza estraibile nella situazione invernale di 0.66 kW a quella di 2 KW. Questo significa che in presenza di falda si ha un incremento della potenza estraibile veramente notevole e in particolare di circa il 195% per la situazione estiva e di circa il 203% per la situazione invernale.

6.4.3 Studio del sistema accoppiato di bullonature e reti energetiche

Da un punto di vista tecnologico la presenza di un sistema non esclude la possibilità di posizionare contemporaneamente l'altro. Però, come anticipato nel paragrafo "Sistema accoppiato", la potenza scambiata dal sistema accoppiato non potrà essere una semplice somma delle potenze scambiate dai singoli sistemi perché c'è interazione termica fra le tubazioni che si trovano ad essere relativamente vicine. Quindi, a seguito delle valutazioni fatte nei paragrafi 6.4.1 e 6.4.2 si è deciso di analizzare un sistema accoppiato con bullonature energetiche della lunghezza di 2 m e con le tubazioni applicate alle reti caratterizzate da una spaziatura del tratto verticale di 30 cm. Inoltre, la condizione di analisi scelta per il sistema accoppiato è quello di falda in movimento.

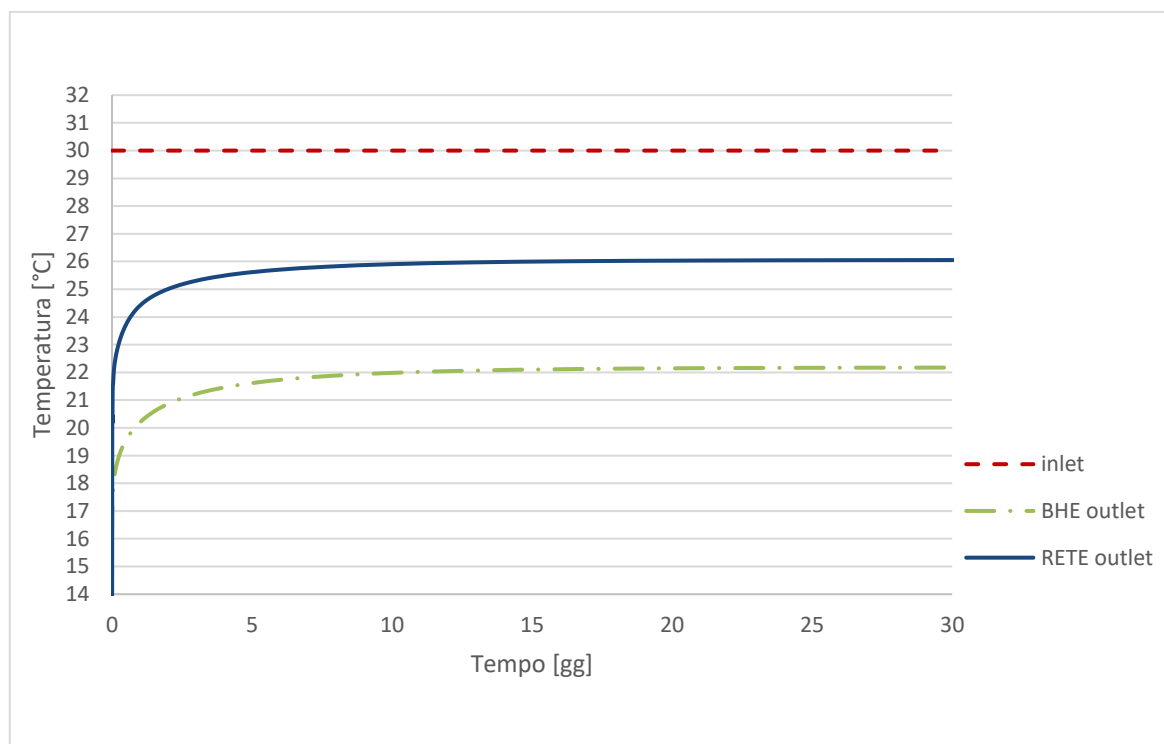


Figura 61. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema accoppiato caratterizzato da bullonature energetiche di lunghezza di 2 metri e da tubazioni applicate alla rete con spaziatura dei tratti verticali di 30 cm, falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione estiva (analisi 23)

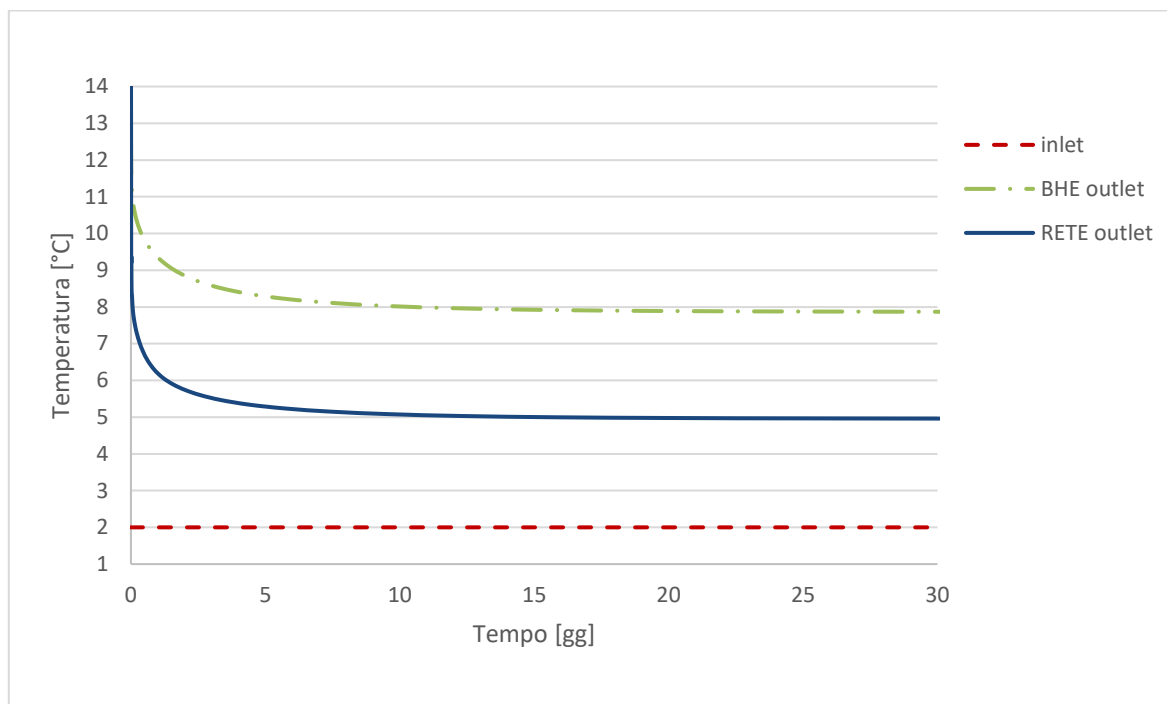


Figura 62. Andamento della temperatura del fluido di ingresso e di uscita per il sistema accoppiato caratterizzato da bullonature energetiche di lunghezza di 2 metri e da tubazioni applicate alla rete con spaziatura dei tratti verticali di 30 cm, falda in movimento con velocità 1.5 m/d, situazione invernale (analisi 24)

Come accennato in precedenza, nei singoli sistemi inseriti nel sistema accoppiato non si riscontrano gli stessi valori di gap termico fra fluido in entrata e fluido in uscita che si trovano nei sistemi utilizzati singolarmente. Questo è dovuto principalmente a due fattori: all'interazione fra le tubazioni dei sistemi che si trovano ad essere geometricamente più vicine e quindi a scambiare calore con terreno che è interessato da entrambi i sistemi; il secondo fattore è che la falda in movimento intercetta prima le bullonature energetiche con le quali scambiando calore e di conseguenza si scalda/raffredda (in funzione della situazione estiva o invernale) e quindi in prossimità della rete la temperatura operativa sarà più alta o più bassa, andando così a diminuire la differenza fra le due (fluido in entrata e temperatura del sistema circostante) e di conseguenza andando a diminuire il calore scambiato.

6 Modellazione numerica

	Rete energetica singola (analisi 21 e 22)	Rete energetica nel sistema accoppiato (analisi 23 e 24)
ΔT estate	5	3,9
ΔT inverno	3,8	2,9

Tabella 24. Confronto ΔT del sistema di reti energetiche analizzato singolarmente o nel sistema accoppiato

	Bullonatura energetica singola (analisi 11 e 12)	Bullonatura energetica nel sistema accoppiato (analisi 23 e 24)
ΔT estate	8,8	7,8
ΔT inverno	6,6	5,9

Tabella 25. Confronto ΔT del sistema di bullonature energetiche analizzato singolarmente o nel sistema accoppiato

Quindi, come in precedenza si è calcolato la potenza scambiabile attraverso la formula del calore ottenendo, come conseguenza del minore ΔT riscontrato, un minor quantitativo di kW scambiabili dai singoli sistemi. Il vantaggio del sistema accoppiato è che, a parità di portata del fluido che scorre nelle tubazioni (come nel caso studiato), la potenza scambiata dai due sistemi può essere sommata arrivando così ad ottenere un risultato significativamente elevato di kW scambiabili.

	Potenza estraibile dalle bullonature energetiche, Q [kW]	Potenza estraibile dalle reti energetiche, Q[kW]	Potenza estraibile totale, Q [kW]
ΔT estate	4,1	2	6,1
ΔT inverno	3,1	1,5	4,6

Tabella 26. Potenza totale estraibile dal sistema accoppiato

Per avere un paragone con un sistema funzionante e per renderci quindi conto della bontà o meno del sistema accoppiato appena proposto, confrontiamo i risultati con quelli del sistema di conci prefabbricati ENERTUN applicati nel prolungamento sud della Linea 1 della metropolitana di Torino. Per rendere le soluzioni paragonabili è stato calcolato la potenza scambiata in watt per metro lineare di tubazione. Nella configurazione “Ground” dei conci prefabbricati (che risulta essere quella più simile per posizionamento delle tubazioni rispetto alle reti energetiche) vengono scambiati 2.34 kW e 1.67 kW rispettivamente nella situazione estiva e in quella invernale (Barla & Di Donna, Gallerie energetiche in ambiente urbano, 2015).

	Situazione (estate/inverno)	Lunghezza totale tubazioni [m]	Potenza totale scambiata, Q [kW]	Potenza scambiata per metro lineare [W/m]
ENERTUN	Estate	116	2.3	20.2
	Inverno	116	1.7	14.4
Sistema accoppiato	Estate	173	6.1	35.5
	Inverno	173	4.6	26.7

Tabella 27. Confronto fra potenze scambiate al metro lineare di tubazione fra il sistema ENERTUN e il sistema accoppiato

Come si può notare nella tabella soprariportata non solo i valori sono confrontabili ma addirittura maggiori. Nella situazione estiva i watt al metro lineare di tubazione superano quelli del sistema di conci prefabbricati del 75 % mentre nella situazione invernale l’incremento è del 85 %. Bisogna però precisare che anche se le dimensioni delle tubazioni, il flusso all’interno delle stesse e le condizioni termoidrauliche del terreno circostante siano le stesse, le temperature di ingresso sono leggermente differenti; nel sistema ENERTUN nella situazione invernale l’ingresso è a 4°C mentre nel sistema studiato è 2°C e nella situazione estiva è 28°C anziché 30°C.

7 Conclusioni

In conclusione, è importante sottolineare ancora una volta l'importanza che stanno assumendo e che è giusto che assumano le strutture attivabili termicamente. Esse presentano il vantaggio fondamentale di creare armonia fra le esigenze strutturali e le esigenze, sempre più importanti, di avere edifici con il minor impatto ambientale possibile. Dunque è prioritario che le soluzioni presentate in questo studio non interferiscano con lo scopo primario dei sistemi di supporto che è appunto di natura strutturale. Proprio per questo, come si può leggere nel capitolo 5, sia le bullonature energetiche sia le reti energetiche sono state ideate cercando di non ridurre le caratteristiche meccaniche e cercando di non interferire troppo con i processi costruttivi soprattutto sotto un punto di vista di tempistiche.

Le soluzioni sono state analizzate singolarmente seguendo un approccio parametrico legato agli aspetti geometrici, ovvero la lunghezza delle bullonature e la spaziatura dei tratti verticali delle tubazioni applicate alle reti metalliche del sistema di reti energetiche. Per quanto riguarda le bullonature, l'analisi ha mostrato un andamento lineare della potenza totale scambiata all'aumentare della lunghezza dei bulloni nel range di valori investigati (da 2 m a 6 m); ciò dimostra che non si possa scegliere a priori una lunghezza privilegiata da un punto di vista di scambio del calore e, in ogni caso, questa lunghezza sarebbe fortemente influenzata dai dettami costruttivi legati alla stabilità della galleria. Per queste motivazioni

per l'analisi nel sistema accoppiato si è scelta la lunghezza di 2 m che rappresenta una delle più comuni nella pratica professionale. Il sistema di reti energetiche è stato analizzato con spaziature di 10, 20, 30 e 40 cm; in questo caso l'andamento al modificarsi della geometria non è così chiaro come nel caso precedente e quindi per definire la soluzione migliore dal punto di vista energetico mi sono affidato ad una analisi preliminare basata sui costi e sui benefici. La conclusione che si può apprezzare dall'interpolazione fra l'analisi numerica e quindi sulla potenza scambiabile e l'analisi costi-benefici è che la soluzione migliore è quella rappresentata da un sistema con spaziatura verticale pari a 30 cm. A questo punto i due sistemi sono stati analizzati in presenza di falda in movimento andando a sottolineare come in entrambi i casi la falda vada ad aumentare drasticamente il calore scambiato e di conseguenza ad aumentare la potenza scambiabile. L'incremento di potenza scambiabile è di circa il 200 % per il sistema di reti energetiche e di circa il 570 % per il sistema di bullonature energetiche. Infine è stato valutato da un punto di vista numerico il sistema accoppiato; la soluzione, come ci si poteva aspettare, non potrà essere una semplice somma delle potenze scambiate dai singoli sistemi perché c'è interazione termica fra le tubazioni che si trovano ad essere relativamente vicine. In entrambi si nota una diminuzione di potenza scambiata rispetto al sistema studiato singolarmente a parità di condizioni al contorno; nonostante questo decremento dal punto di vista dello scambio termico la soluzione accoppiata risulta essere molto valida poiché sommando le potenze scambiabili si ottengono 6.1 kW e 4.6 kW rispettivamente nella situazione estiva e in quella invernale.

Pur considerando la natura preliminare di questo studio, e quindi il livello di incertezza associato, ci si può rendere conto della bontà della soluzione proposta confrontando i risultati con quelli del sistema ENERTUN attualmente in funzione all'interno del prolungamento sud della Linea 1 che mostrano come i watt scambiati al metro lineare di tubazione siano addirittura maggiori.

Riferimenti bibliografici

- Allan, M., & Philippacopoulos, A. (2000). World Geothermal Congress. *Performance characteristics and modelling of cementitious grouts for geothermal heat pumps*. Kyushu - Tohoku, Japan.
- Barla, M., & Di Donna, A. (2015). *Gallerie energetiche in ambiente urbano*. Cagliari.
- Barla, M., & Di Donna, A. (2015). *The role of ground conditions on energy tunnels' heat exchange*. ICE publishing.
- Barla, M., & Di Donna, A. (2016). *Conci energetici per il rivestimento delle gallerie*.
- Barla, M., Di Donna, A., & Baralis, M. (2018). *City-scale analysis of subsoil thermal conditions due to geothermal exploitation*. ICE publishing.
- Barla, M., Di Donna, A., & Perino, A. (2016). Application of energy tunnels to an urban environment. *Geothermics*, 61, 104-113.
- Berga, A., Grimma, M., & Stergiaropoulou, K. (2017). Geothermal usage in inner city tunnels - A study of the Fasanenhof subway tunnel in Stuttgart Germany. *IEA Heat Pump Conference*. Rotterdam.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 81-122.
- Cui, W., Gawecka, K., Potts, D., Zdravković, L., & Taborda, D. (2016). Numerical analysis of coupled thermo-hydraulic problems in geotechnical engineering. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 6, 22-34.
- DHI-WASY. (2010). *White papers Vol. V (FEFLOW)*.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). *Cos'è la geotermia?* Pisa.

- Franzius, J. N., & Pralle, N. (2011). Turning segmental tunnels into sources of renewable energy. *Civil Engineering*(164), 35-40.
- Frodl, S., & Jan Niklas Franzius, T. B. (2010). *Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach*.
- Innaurato, N. (s.d.). *Costruzione di gallerie*. Torino: Politeko.
- Mimouni, T., Dupray, F., & Laloui, L. (2014). Estimating the geothermal potential of heat-exchanger anchors on a cut-and-cover tunnel. *Geothermics*, 51, 380-387.
- Nicholson, D. P., Chen, Q., Silva, M. d., Winter, A., & Winterling, R. (2014). *The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK*. ICE publishing.
- Schneider, M., & Moorman, C. (2010). GeoTU6- a geothermal research project for tunnels.
- Sommaruga, C., & Verdiani, G. (1995). *Geotermia, principi, ricerca, produzione*. Roma: La Nuova Italia Scientifica.
- Unterberger, W., Hofinger, H., & Grünstäudl, T. (s.d.). *Utilization of Tunnels as Sources of Ground Heat and Cooling – practical application in Austria*.
- Working group 14 and 19. (aprile 2016). *Recommendations on the development process for mined tunnels (N° 17)*. ITA international tunneling and underground space association.
- Working Group 19. (aprile 2009). *General report on conventional tunneling method (N° 2)*. ITA international tunneling and underground space association.
- Zhao, J. (2012). *A General Overview on Tunnel Boring Machines*. Losanna.