

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Valutazione delle potenzialità geotermiche della galleria di base della
Torino-Lione**



Relatori:

Prof. Marco Barla

Ing. Alessandra Insana

Candidato:

Maria Romana Alvi

Ottobre 2021

*Inevitabilmente, a mio padre,
di cui sento ancora la mancanza,
come se ci avesse appena lasciati.*

Sommario

I mutamenti climatici e il riscaldamento globale non possono più essere ignorati e mai come ora sono grande argomento di attualità.

Oltre ai negoziati internazionali, dove si innovano strategie e accordi sul clima, è necessario continuare a sviluppare e investigare quelle tecnologie che vadano a sfruttare le nuove risorse energetiche.

Il collegamento ferroviario Torino-Lione rappresenta uno dei progetti più importanti per lo stimolo dello sviluppo economico europeo e la competitività commerciale. L'infrastruttura contribuisce alla salvaguardia dell'ambiente alpino, grazie all'attuazione di un'ambiziosa politica di trasferimento modale di una quota del trasporto merci dalla strada alla ferrovia, essenziale anche nella strategia europea di riduzione dei gas serra, così come stabilito nell'accordo siglato a Parigi nell'ambito della 'Conferenza sul Clima (COP21) '. Gli Stati, consapevoli delle conseguenze negative del traffico autostradale in questo territorio, hanno firmato nel 1995 la Convenzione delle Alpi, fondamentale per la strategia europea di riduzione delle emissioni di CO₂. Si stima che la costruzione dell'infrastruttura della Torino-Lione porterà ad una riduzione annuale di emissioni di gas serra di circa 3 milioni di tonnellate.

Una diffusione sempre maggiore delle cosiddette geostrutture energetiche, oltre ai soliti impianti geotermici, si è avuta dagli anni '70. La novità di questi sistemi è riassunta nel loro doppio ruolo, poiché riescono ad integrare alla loro principale funzione strutturale quella di scambiatori di calore, sfruttando il sottosuolo come "serbatoio di accumulo".

In particolare, tra tutte le geostrutture disponibili (pali, diaframmi, tunnel, ecc.) le gallerie energetiche offrono la maggiore superficie per lo scambio termico. Attraverso rivestimenti innovativi in cui sono presenti i tubi scambiatori di calore, è possibile attivare termicamente porzioni più o meno lunghe dell'infrastrutture ferroviarie e, con l'ausilio di una pompa di calore, ottenere una potenza termica che si potrebbe ad esempio sfruttare per soddisfare i fabbisogni energetici di più utenze, possibilmente quanto più vicine al punto di installazione della pompa.

Lo scopo di questa tesi si riassume nella quantificazione del potenziale geotermico di un tratto del collegamento Torino-Lione, nello specifico di una porzione lunga 10 km dell'ammasso roccioso

d'Ambin, lungo la quale sono stati registrati elevati valori di temperatura alle quote in cui avverrà lo scavo del tunnel di base del Moncenisio. Per fare ciò, si ipotizzerà di installare e poi attivare termicamente, mediante l'ausilio di analisi numeriche, un rivestimento in conci di calcestruzzo di tipo 'ENERTUN' nella sola configurazione 'AIR', concentrandosi, quindi, soprattutto nello scambio di calore con l'aria interna alla sezione della galleria.

Si parlerà nel dettaglio del modello costruito con il software ad elementi finiti 'Finite Element subsurface FLOW simulation system' (FEFLOW), con brevi cenni teorici ai problemi accoppiati di tipo TH, e, soprattutto, si elencheranno e motiveranno le analisi parametriche svolte e le simulazioni effettuate, per poi mostrare i risultati ottenuti in termini di potenza ed energia termica.

Infine, sarà d'interesse fare un confronto con il potenziale geotermico stimato da TELT nel 2021, a seguito del monitoraggio delle sorgenti sotterranee e sulla base della previsione delle portate incontrate durante tutto lo scavo del tunnel di base (quindi anche prima della messa in esercizio dell'infrastruttura). In conseguenza delle fasi di utilizzo della risorsa da loro introdotte, saranno ipotizzati altrettanti scenari di disponibilità del potenziale geotermico, con lo scopo di garantirne lo sfruttamento nel più lungo periodo possibile.

Abstract

The subsurface represents space and resource of ever-growing importance to meet human activity needs associated with the availability of built environments and energy. So-called energy geostructures represent a breakthrough technology in this context.

All earth-contact structures that embed a piping circuit with a circulating heat carrier fluid to achieve a heat exchange between the ground and any building or infrastructure represent energy geostructures. By integrating the structural support role of earth-contact structures with the heating-cooling role of shallow geothermal heat exchangers, these systems can sustain or enclose built environments, while providing them with renewable thermal energy.

In addition, an increase in awareness of the environmental impact of CO₂, NO_x and CFCs emissions triggered a renewed interest in environmentally friendly cooling and heating technologies.

Over the past twenty years, increasing interest has been concentrated on energy geostructures. This interest has been motivated by the fact that 30 to 40% of the final energy consumption of developed and developing countries is associated with the building sector, whose thermal energy requirements for space heating and cooling as well as hot water account from 50 to 80% of the total end-use of energy.

Despite such promising features, the integrated roles of energy geostructures pose various challenges to understand their behaviour and performance, and to address the related analysis and design.

Thermally-activated segmental lining of tunnels have been completed in a small number of projects but limited operational information has been published. Such information that is available suggests that in tunnels, climatic temperature changes and ground characteristics may dominate the thermo-mechanical response of the overall system.

In this context, the work focuses on the application of the new technology of the ENERTUN segmental lining to a certain section of the Turin-Lyon Base Tunnel with the ultimate goal of investigating the energy exploitation in those portions of the infrastructure where the temperature field reaches over the 45 °C. A model will be built in the finite element software 'Finite Element subsurface FLOW simulation system' (FEFLOW), and some notes about the coupled TH problems will be introduced.

After performing some parametric analysis, the numerical simulations carried out will be discussed and motivated, showing the results in terms of thermal power and geothermal potential.

Finally, the geothermal potential assessed by TELT (Tunnel Euralpin Lyon Turin) in 2021, after monitoring the underground sources and on the basis of the flow rates forecast encountered throughout the base tunnel excavation, will be compared to the potential evaluated with the exploitation of the high temperatures recorded at the base tunnel depth.

Looking at their scenarios of possible use and with the aim of the longest exploitation of the geothermal resource, as many scenarios will be assumed thanks to the thermal activation of tunnel lining.

Indice dei contenuti

Sommario	I
Abstract	III
1. INTRODUZIONE	1
2. ENERGIA GEOTERMICA	3
2.1 Cenni storici	3
2.2 Origine dell'energia geotermica e sua classificazione	5
2.2.1 Geotermia a Bassa Entalpia.....	6
2.2.2 Pompa di calore	9
2.2.3 Tipologie di impianto geotermico a bassa entalpia a circuito aperto	11
2.2.4 Tipologie di impianto geotermico a bassa entalpia a circuito chiuso	12
2.3 Normativa di riferimento per la geotermia a bassa entalpia	15
2.4 Geostrutture energetiche.....	17
2.4.1 Tubi di scambio e fluidi termovettori.....	18
2.4.2 Pali Energetici	20
2.4.3 Diaframmi Energetici	21
2.4.4 Gallerie energetiche.....	23
2.4.5 Esempio applicativo della galleria energetica con conci ENERTUN	28
2.5 Influenza della temperatura del terreno nella fase preliminare di design.....	36
2.6 Influenza del flusso di falda nello scambio di calore in fase preliminare di design	37
2.7 Influenza dell'ambiente interno sulla performance dei tunnel energetici	39
2.7.1 Risultati di Analisi Numeriche sulla performance dei tunnel energetici e conclusioni..	40
2.7.2 Altre influenze nello scambio di calore (geometria, scabrezza, velocità del flusso d'aria interno) 46	
3. IL CASO STUDIO DELLA GALLERIA DI BASE DELLA TORINO-LIONE	53
3.1 Caratteristiche geometriche	55
3.2 Condizioni geologiche e idrogeologiche	56
3.2.1 Contesto Geologico del tunnel di Base	56
3.2.2 Interferenze di falda e metodologie di Scavo	58
3.3 Condizioni termiche	62
3.4 Cunicolo esplorativo de "La Maddalena" (Chiomonte).....	65
3.5 Lo studio condotto da TELT sull'energia estratta dal tunnel di base.....	67
3.5.1 Casi Internazionali.....	67
3.5.2 I diversi scenari	68
3.6 Effetto della circolazione interna dei treni	69
3.6.1 Flusso d'aria interno alla galleria	70

4. LA MODELLAZIONE NUMERICA ACCOPPIATA TERMO-IDRAULICA.....	74
4.1 Cenni sul metodo degli elementi finiti	74
4.1.1 Discretizzazione del dominio e step successivi.....	75
4.2 Le equazioni alla base del problema accoppiato THM e TH	77
4.2.1 Processo Idraulico	80
4.2.2 Processo di Trasferimento di Calore	82
4.2.3 Condizioni al Contorno	83
4.3 Parametri significativi per la progettazione di una galleria energetica.....	84
4.4 Analisi numerica e generalità del codice di calcolo FEFLOW	88
5. STUDIO NUMERICO DELL'ATTIVAZIONE TERMICA DELLA GALLERIA DI	
BASE	89
5.1 Geometria del modello	89
5.2 Proprietà dei materiali	100
5.3 Condizioni iniziali e al contorno	113
5.4 Analisi parametriche preliminari.....	117
5.4.1 Effetto della velocità di flusso d'aria nell'ambiente interno	118
5.4.2 Ruolo della temperatura e velocità di flusso del fluido termovettore.....	128
5.5 Studio del funzionamento continuo dell'impianto	133
5.5.1 Analisi di 1 anno con $v = 0,6$ m/s.....	135
5.5.2 Analisi di 1 anno con $v = 0,8$ m/s.....	137
5.5.3 Analisi di 10 anni con $v = 0,6$ m/s.....	140
5.5.4 Analisi di 10 anni con $v = 0,8$ m/s.....	142
5.5.5 Calcolo dell'energia termica fornita dall'impianto	144
5.6 Studio del funzionamento ciclico dell'impianto.....	146
5.6.1 Spegnimento nei mesi estivi per 1 anno con $v = 0,6$ m/s	148
5.6.2 Spegnimento nei mesi estivi per 1 anno con $v = 0,8$ m/s	150
5.6.3 Spegnimento nei mesi estivi per 10 anni con $v = 0,6$ m/s	151
5.6.4 Spegnimento nei mesi estivi per 10 anni con $v = 0,8$ m/s	153
5.7 Ottimizzazione del funzionamento ciclico dell'impianto.....	156
5.7.1 Spegnimento di cinque mesi consecutivi per 10 anni con $v = 0,6$ m/s e $v = 0,8$ m/s ...	156
5.7.2 Spegnimento a mesi alterni di 10 anni con $v = 0,6$ m/s e $v = 0,8$ m/s	161
6. STUDIO DELLE CONDIZIONI DI ESERCIZIO DELLA TECNOLOGIA	168
6.1 Scenari di ipotesi di disponibilità	169
6.1.1 Confronto con gli scenari dello studio TELT	171
7. CONCLUSIONI	175
ALLEGATO 1	181
ALLEGATO 2	185

BIBLIOGRAFIA	188
Ringraziamenti	194

Indice delle figure

<i>Figura 1. Larderello, 1904: il conte Ginori Conti (www.unionegeotermica.com)</i>	4
<i>Figura 2. Probabile distribuzione della temperatura interna terrestre (https://www.gsamasternews.it/?p=2263)</i>	5
<i>Figura 3. Diagramma che mostra l'utilizzo dei fluidi geotermali: T tra 20 e 180 °C (Lindal, 1973)</i>	7
<i>Figura 4. Andamento della temperatura nel sottosuolo (Baietto et al., 2010)</i>	8
<i>Figura 5. Schema di una pompa di calore con T e pressioni per un mezzo refrigerante R290 (Brandl, 2006)</i>	9
<i>Figura 6. Schematizzazione della pompa di calore (Singh et al., 2019)</i>	10
<i>Figura 7. Flusso di energia (Brandl, 2006)</i>	11
<i>Figura 8. Schema di un sistema Open loop (http://old.tekneco.it/)</i>	12
<i>Figura 9. Schema di un sistema Closed loop (http://old.tekneco.it/)</i>	13
<i>Figura 10. Schema di heating/cooling di una casa unifamiliare con pali geotermici (Brandl, 2006)</i>	13
<i>Figura 11. Tipologie di schemi per sonde verticali (Tinti, 2008)</i>	15
<i>Figura 12. Disposizione degli scambiatori in "tubi coassiali semplici" o "complessi" (Tinti, 2008)</i>	15
<i>Figura 13. Tubi in polietilene adottati per le geostrutture (Barla, 2021)</i>	19
<i>Figura 14. Circuito primario, pompa di calore e circuito secondario con pannelli radianti (https://kuehnbuilding.com/geothermal.html)</i>	19
<i>Figura 15. Tubazioni di scambio termico accoppiate all'armatura del palo di fondazione (https://undertheground.org/2014/04/11/monitoring-long-term-performance-of-energy-piles/)</i>	20
<i>Figura 16. Schema di funzionamento di un palo energetico in inverno e estate (Raouf et al., 2014)</i> ...	21
<i>Figura 17. Schema di pali e diaframmi energetici nel Bulgari hotel Knightsbridge London project (Amis, 2011)</i>	22
<i>Figura 18. Concetto di tunnel energetico (Nicholson, 2013)</i>	23
<i>Figura 19. Attivazione termica del rivestimento della galleria e connessione alla pompa di calore (Barla e Di Donna, 2018)</i>	24
<i>Figura 20. Tunnel "freddi" e tunnel "caldi" (Nicholson, 2013)</i>	25
<i>Figura 21. Schema del tunnel energetico Lainzer (Vienna) scavato con il New Austrian Tunneling Method e accompagnato da tiranti scambiatori di calore (Brandl, 2006)</i>	25
<i>Figura 22. Geotessile con tubi di scambio nel tunnel energetico Lainzer, a Vienna (Brandl, 2006)</i>	26

<i>Figura 23. Rappresentazione del rivestimento prefabbricato con conci ottimizzati per lo scambio termico (Barla e Perino, 2014; Barla et al., 2016)</i>	26
<i>Figura 24. Concio energetico con tubi scambiatori collegati alla gabbia di armatura (Barla et al., 2019b)</i>	27
<i>Figura 25. Concio energetico sviluppato dalla Rehau AG & Co e dalla Zublin AG (Franzius e Pralle, 2011)</i>	27
<i>Figura 26. Connessioni dei tubi dei circuiti tra conci adiacenti, assicurati con nastro isolante (Barla et al., 2019)</i>	27
<i>Figura 27. Tasche di collegamento in un Thermal Energy segment (TES, UK), (Nicholson, 2013)</i>	28
<i>Figura 28. Sito sperimentale Enertun e sua collocazione lungo la linea metropolitana 1 di Torino (Barla e Insana, 2020)</i>	29
<i>Figura 29. Conci energetici: a) 'Energietübbingand' b) 'ENERTUN' (Ma et al, 2021)</i>	30
<i>Figura 30. Differenti configurazioni del rivestimento a conci ENERTUN: (a) ground&air, (b) ground and (c) air (Barla e Di Donna, 2018)</i>	31
<i>Figura 31. Dettaglio della rete di tubi nel concio modulare in configurazione air</i>	31
<i>Figura 32. Dettaglio della rete di tubi nel concio modulare in configurazione ground</i>	32
<i>Figura 33. Vista della galleria nell'estensione Sud della Linea 1 della metropolitana di Torino e dell'impianto geotermico proposto connesso alla torre della Regione Piemonte (Barla e Di Donna, 2015)</i>	33
<i>Figura 34. T imposta di ingresso e T d'uscita ottenuta dall'analisi in condizioni invernali (a) e estive (b), (Barla e Di Donna, 2015)</i>	34
<i>Figura 35. Temperatura predetta a varie profondità per il tunnel di base della Torino-Lione (Barla e Di Donna, 2018)</i>	35
<i>Figura 36. Andamento della temperatura nel tunnel durante i 4 cicli on&off di attivazione del rivestimento (Barla e Di Donna, 2018)</i>	35
<i>Figura 37. Grafici di design per la stima del calore estratto e immesso (in W/mq) nel caso estivo e invernale, (Barla e Di Donna, 2016)</i>	37
<i>Figura 38. Grafici di progettazione del potenziale geotermico in W/mq (caso invernale a sinistra, estivo a destra) per una direzione di flusso di falda perpendicolare e di 45° (Barla e Insana, 2020)</i> .	38
<i>Figura 39. Possibili meccanismi di scambio di calore in un tunnel energetico sotterraneo (Rotta Loria, 2020)</i>	40
<i>Figura 40. Oscillazione stagionale della temperatura nel tunnel (Ma et al., 2021)</i>	41
<i>Figura 41. Range di variazione dell'aria interna al tunnel durante le simulazioni numeriche (Ma et al., 2021)</i>	42
<i>Figura 42. Variazione del coefficiente di scambio termico sulla potenza termica media: a) stagione invernale (heating), b) stagione estiva (cooling) (Ma et al., 2021)</i>	43

<i>Figura 43. Potenza termica media al variare della temperatura interna del tunnel: a) stagione invernale (heating), b) stagione estiva (cooling) (Ma et al.,2021).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 44. Grafici di pre-dimensionamento: a) stagione invernale (heating), b) stagione estiva (cooling) (Ma et al.,2021)</i>	<i>44</i>
<i>Figura 45. Contributo di ogni componente del sistema geotermico allo scambio di calore al variare del coefficiente di scambio termico: a) stagione invernale (heating), b) stagione estiva (cooling) (Ma et al.,2021)</i>	<i>44</i>
<i>Figura 46. Contributo di ogni componente del sistema geotermico allo scambio di calore per fissati valori di conduttività termica del rivestimento contro: a) coefficiente di scambio termico, b) temperatura interna dell'aria (Ma et al.,2021)</i>	<i>45</i>
<i>Figura 47. Forme delle sezioni adottate nelle simulazioni: a) circolare, b) a ferro di cavallo, c) Cut-and-cover (Peltier et al.,2019)</i>	<i>47</i>
<i>Figura 48. Sviluppo degli strati limite termici e di velocità per sezioni di 3 diverse forme (Peltier et al.,2019)</i>	<i>48</i>
<i>Figura 49. Sviluppo degli strati limite termici e di velocità per diversi valori del numero di Reynolds (Peltier et al.,2019)</i>	<i>49</i>
<i>Figura 50. Sviluppo degli strati limite termici e di velocità per diversi valori di scabrezza della superficie (Peltier et al.,2019).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 51. Relazione tra il coefficiente di scambio termico per convezione e velocità di flusso d'ingresso per diversi valori di scabrezza della superficie (Peltier, et al.,2019)</i>	<i>51</i>
<i>Figura 52. Relazione tra il coefficiente di scambio termico per convezione e velocità di flusso d'ingresso per strati limite d'ingresso e pieno sviluppo (Peltier et al.,2019).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 53. Inquadramento dell'infrastruttura sotterranea (https://www.telt-sas.com/it/la-sezione-transfrontaliera/).....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 54. Inquadramento della sezione transfrontaliera nella linea ferroviaria Torino-Lione</i>	<i>54</i>
<i>Figura 55. Tipica sezione trasversale del tunnel di base (Bufalini et al., 2017).....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 56. Schema generale dell'infrastruttura italo-francese: Tunnel di base e di by-pass Bussoleno (https://twitter.com/Tunnel_Talk/status/1412830229756846081)</i>	<i>56</i>
<i>Figura 57. Sezioni geologiche semplificate del tunnel di base e legenda (Gabalda ,2008)</i>	<i>58</i>
<i>Figura 58. Metodo di scavo per le sezioni del Tunnel di base e il Tunnel bypass Bussoleno (TBM e "a mezza sezione").....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 59. Stato dei lavori al 2017: Discenderie (lato Francia) e galleria geognostica (lato Italia), (Bufalini et al., 2017)</i>	<i>60</i>
<i>Figura 60. TBM adottata per i 9 km del tunnel sud di base tra Saint-Martin-La-Porte e La Praz (Barla et al., 2017).....</i>	<i>61</i>

<i>Figura 61. Profilo geotermico previsionale del tunnel di base (“Modello Geotermico” nel Progetto Definitivo disponibile al sito della Regione Piemonte).....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 62. Galleria geognostica de “La Maddalena” (Bufalini et al., 2017).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 63. Conseguenze dell’effetto pistone sulla velocità all’interno del tunnel (singolo treno in circolazione) per i 3 tipi di treno (AF a 120 km/h, TGV a 220 km/h e treni merci a 120 km/h), LTF (2013).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 64. Conseguenze dell’effetto pistone sulla velocità all’interno del tunnel per i tre scenari di traffico orario definiti nel piano di esercizio: 2 treni l’ora (2 treni merci), 8 treni l’ora (AF, TGV, merci, AF, merci, AF, merci, merci) e 11 treni l’ora (AF, TGV-Rés, TGV-Duplex, AF, merci, merci, merci, AF, merci, merci, AF): tunnel Francia → Italia (LTF 2013).....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 65. Flusso d’aria generato dalle differenze di temperatura tra l’interno del tunnel e l’esterno (0 e 30 °C). Tunnel Francia → Italia (LTF, 2013).....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 66. Flusso d’aria generato da una contro-pressione tra + 1000 Pa e -1000 Pa; la temperatura dell’aria ai portali del tunnel e alla sommità dei pozzi è fissata uguale e pari a 10 °C. Tunnel Francia → Italia. (LTF, 2013).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 67. Processi termo-idro-meccanici accoppiati (Joulin, 2019).....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 68. Trasporto di calore per profondità maggiori di 15 m (Brandl, 2006).....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 69. Conducibilità termica vs densità secca e contenuto d’acqua per un terreni: a) a grana grossa ghiacciati, b) a grana grossa non ghiacciati, c) a grana fine ghiacciati, d) a grana fine non ghiacciati (Jessberger e Jagow-Klaff, 1996).....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 70. "New Project" in FEFLOW.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 71. Supermesh importata da “Maps”.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 72. Importazione dei file .dxf.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 73. Dimensioni esterne del modello, diametro esterno e diametro interno della galleria (in metri).....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 74. Sezione trasversale importata: rivestimento e serpentine (AIR), dimensioni in metri.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 75. Supermesh di linee e punti che formano rivestimento e tubazioni di scambio della galleria.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 76. Finestra di Problem Settings in FEFLOW.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 77. Impostazione della gravità e condizioni di isotropia.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 78. Impostazioni per la qualità della mesh.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 79. Discretizzazione del modello.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 80. 3D Layer Configuration di due anelli in serie di spessore 1,4 m.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 81. 3D Layer Configuration: modello adottato con 6 anelli in serie due a due.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 82. Vista interna ed esterna del concio prefabbricato e serpentine di tubi in configurazione AIR (misure in cm).....</i>	<i>98</i>

<i>Figura 83. Rappresentazione 3D delle 'Discrete Features'; (in alto) e dettaglio degli 'Edges' dei primi due anelli (in basso).....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 84. Selezioni degli elementi salvate-materiali.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 85. Profilo geotermico per la porzione d'interesse (dal 'Modello geotermico' - LTF, 2010)</i>	<i>100</i>
<i>Figura 86. Profilo geotermico previsionale del Tunnel di Base tra la progressiva 34+000 e la pk 56+000 (tratta scavata in roccia) (da 'Valutazione e gestione dei rischi' - LTF, 2001).....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 87. Isolamento delle tubazioni di scambio tra un anello e il successivo (per anelli collegati in parallelo).....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 88. Differenziazione dei materiali nel modello in FEFLOW</i>	<i>103</i>
<i>Figura 89. Elementi con proprietà isolanti nei tratti di collegamento tra le tubazioni degli anelli</i>	<i>104</i>
<i>Figura 90. Pannello Data di FEFLOW contenente le condizioni al contorno e proprietà dei materiali</i>	<i>104</i>
<i>Figura 91. Valori sperimentali (barra arancione) e da letteratura di conduttività termica (database GSHPs).....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 92. Valori sperimentali (barra arancione) e da letteratura di capacità termica volumetrica (database GSHPs)</i>	<i>106</i>
<i>Figura 93. Concetto generale di REV per la porosità (Bear et Batchman, 1990).....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 94. Visione 3D completa del modello in FEFLOW.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 95. Boundary conditions nella finestra 'Data'.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 96. Condizioni al contorno (carico idraulico)</i>	<i>114</i>
<i>Figura 97. "Fluid-flux" boundary Conditions.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 98. Data > Temperature: impostazione condizioni iniziali e interpretazione dei risultati.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 99. Punto di osservazione inserito per monitorare la temperatura di aria interna</i>	<i>119</i>
<i>Figura 100. Prima ipotesi di 'Time series' adottata per la velocità di flusso d'aria e applicata al primo layer.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 101. Evoluzione della temperatura in galleria al variare delle condizioni di flusso d'aria, dopo 10 giorni di simulazione.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 102. Effetto della velocità del flusso d'aria sull'evoluzione della temperatura in galleria dopo 270 giorni</i>	<i>123</i>
<i>Figura 103. Andamento della temperatura nell'intradosso della galleria al giorno 270.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 104. Profilo di temperatura dell'aria interna dopo 24 h</i>	<i>125</i>
<i>Figura 105. Distribuzione della temperatura nel modello FEFLOW (dopo 365 giorni).....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 106. Paragone del profilo di aria interna in presenza e assenza di flusso interno (dopo 365 giorni).....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 107. Temperatura a partire da 1 m dal centro della sezione per le analisi a lungo termine..</i>	<i>128</i>

<i>Figura 108. Andamento delle temperature di uscita del fluido al variare della temperatura d'ingresso (in 365 giorni)</i>	<i>130</i>
<i>Figura 109. Profilo di potenza termica al variare della velocità di flusso</i>	<i>132</i>
<i>Figura 110. Profili di potenza termica al metro al variare della velocità del fluido (in un anno di simulazione continua).....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 111. Punti di osservazione nel terreno a partire dall'estradosso del tunnel</i>	<i>134</i>
<i>Figura 112. Punti di osservazione nella sezione del tunnel.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 113. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita dopo 365 gg di funzionamento</i>	<i>135</i>
<i>Figura 114. Distribuzione della temperatura nei punti di osservazione interni alla sezione nei 365 gg di funzionamento continuo</i>	<i>136</i>
<i>Figura 115. Distribuzione di temperatura per i punti scelti nel terreno circostante dopo 1 anno</i>	<i>137</i>
<i>Figura 116. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita dopo 365 gg di funzionamento</i>	<i>138</i>
<i>Figura 117. Distribuzione della temperatura nei punti di osservazione interni alla sezione dopo 365 gg di funzionamento continuo</i>	<i>139</i>
<i>Figura 118. Distribuzione di temperatura per i punti scelti nel terreno circostante dopo 365 gg dall'attivazione</i>	<i>140</i>
<i>Figura 119. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita dopo 3650 gg, $v=0,6$ m/s ..</i>	<i>141</i>
<i>Figura 120. Profilo nel tempo della potenza termica in kW/m, $v=0,6$ m/s</i>	<i>141</i>
<i>Figura 121. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita dopo 3650 gg, $v=0,8$ m/s .</i>	<i>143</i>
<i>Figura 122. Profilo nel tempo della potenza termica in kW/m, $v=0,8$ m/s</i>	<i>143</i>
<i>Figura 123. " Time Series " della temperature d'ingresso del fluido termovettore.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 124. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita (365 gg di funzionamento ciclico), $v=0,6$ m/s.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 125. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita (365 gg di funzionamento ciclico), $v=0,8$ m/s.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 126. Andamento temporale della temperatura all'ingresso e uscita del fluido dopo 10 anni di funz. ciclico ($v=0,6$ m/s).....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 127. Confronto della potenza di estrazione termica per il caso stagionale e continuo, $v=0,6$ m/s</i>	<i>152</i>
<i>Figura 128. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita (10 anni con funzionamento ciclico), $v=0,8$ m/s.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 129. Confronto della potenza di estrazione termica per il caso stagionale e continuo, $v=0,8$ m/s</i>	<i>155</i>
<i>Figura 130. Profilo temporale della potenza termica estraibile dalla galleria.....</i>	<i>157</i>

<i>Figura 131. Andamento temporale della temperatura d'uscita del fluido con sospensione di 5 mesi (3650 gg)</i>	<i>159</i>
<i>Figura 132. Profilo temporale di potenza termica per la galleria (10 anni)</i>	<i>162</i>
<i>Figura 133. Dettaglio potenza termica al metro al decimo anno (v=0,6 m/s).....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 134. Dettaglio potenza termica al metro al decimo anno (v=0,8 m/s).....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 135. Andamento temporale della temperatura dell'aria interna sotto l'ipotesi di funzionamento ciclico a mesi alterni (per le due velocità di flusso di 0,6 e 0,8 m/s)</i>	<i>167</i>
<i>Figura 136. Inquadramento e risultati del potenziale geotermico di TELT (2021) e di ENERTUN per le lunghezze di competenza</i>	<i>173</i>
<i>Figura 137. Lunghezze di riferimento di TELT e ENERTUN per lo sfruttamento della risorsa nel tunnel di base</i>	<i>174</i>

Indice delle tabelle

<i>Tabella 1. Quantificazione della potenza termica scambiabile dalle analisi numeriche (Barla e Di Donna, 2018).....</i>	<i>33</i>
<i>Tabella 2. Principali caratteristiche geometriche del tunnel di base. La pendenza positiva si riferisce al transito nel senso Ovest-Est, ovvero Francia –Italia (LTF, 2013)</i>	<i>55</i>
<i>Tabella 3. Proprietà termiche del calcestruzzo (LTF, 2013)</i>	<i>56</i>
<i>Tabella 4. Sezioni del tunnel di base e estensioni (LTF, Final report 2006)</i>	<i>59</i>
<i>Tabella 5. Gradienti geotermici per le unità tettoniche incontrate dallo scavo e range di temperature attese all'altezza del tunnel di base (Torri et al., 2014).....</i>	<i>62</i>
<i>Tabella 6. Temperature estrapolate alla quota della galleria (dal sito della Regione Piemonte).....</i>	<i>63</i>
<i>Tabella 7. Confronto fra scenari di tunnel esistenti e quelli previsti per il tunnel di base del Moncenisio (TELT, 2021)</i>	<i>67</i>
<i>Tabella 8. Scenari di disponibilità di risorsa geotermica analizzati (TELT, 2021).....</i>	<i>68</i>
<i>Tabella 9. Temperature estrapolate dal profilo termico del tratto del Tunnel di Base (pk 42 - 52).....</i>	<i>102</i>
<i>Tabella 10. Proprietà termo-idrauliche del terreno.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabella 11. Caratteristiche del calcestruzzo del rivestimento</i>	<i>110</i>
<i>Tabella 12. Proprietà dello spessore di malta</i>	<i>110</i>
<i>Tabella 13. Proprietà dell'isolante adottato.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabella 14. Proprietà termiche e idrauliche dell'aria interna (Barla et al., 2016).....</i>	<i>111</i>
<i>Tabella 15. Parametri utilizzati per le tubazioni di scambio termico</i>	<i>112</i>

<i>Tabella 16. Differenza tra la temperatura media (data assumendo i 5 valori costanti di velocità) e quella dovuta ad velocità con 'Time series', per tre diversi giorni di simulazione</i>	121
<i>Tabella 17. Confronto tra le temperature registrate al termine della simulazione</i>	121
<i>Tabella 18. Confronto della temperatura al giorno 270 al variare delle velocità del flusso d'aria</i>	123
<i>Tabella 19. Parametri utilizzati per il calcolo del calore estraibile dall'impianto</i>	129
<i>Tabella 20. Risultati dell'analisi parametrica per $v=0,8$ m/s</i>	130
<i>Tabella 21. Two – Tg al variare della velocità del fluido e della temperature d'ingresso del fluido</i>	131
<i>Tabella 22. Massime potenze termiche al termine di un anno di simulazione continua e al variare della velocità del fluido termovettore</i>	131
<i>Tabella 23. Risultati ottenuti al termine di 1, 30, 60, 90, 180, 365, 3650 giorni ($v=0,6$ m/s)</i>	142
<i>Tabella 24. Risultati ottenuti al termine di 1, 30, 60, 90, 180, 365, 3650 giorni ($v=0,8$ m/s)</i>	144
<i>Tabella 25. Confronto dei risultati per entrambi i tipi di funzionamento e velocità del fluido (365 gg)</i>	151
<i>Tabella 26. Confronto dei risultati per entrambi i tipi di funzionamento e velocità del fluido (10 anni)</i>	155
<i>Tabella 27. Potenza termica e potenza annuale della galleria prima della sospensione</i>	158
<i>Tabella 28. Recupero di potenza termica ed energia dopo la sospensione di 5 mesi, al giorno 274.5 dell'anno considerato</i>	160
<i>Tabella 29. Risultati di potenza al metro e potenza a regime, per ogni ciclo del 1° anno e per le due velocità di flusso del fluido</i>	162
<i>Tabella 30. Risultati di potenza al metro e potenza dopo 12 ore, per ogni ciclo del 1° anno e per le due velocità di flusso del fluido</i>	163
<i>Tabella 31. Risultati di potenza al metro e potenza a regime, per ogni ciclo del 10° anno e per le due velocità di flusso del fluido</i>	165
<i>Tabella 32. Risultati di potenza al metro e potenza dopo 12 ore, per ogni ciclo del 10° anno e per le due velocità di flusso del fluido</i>	166
<i>Tabella 33. Scenari di disponibilità della risorsa per i 10 km d'interesse (funzionamento 1 e 2) in termini di potenza termica</i>	170
<i>Tabella 34. Scenari di disponibilità della risorsa per i 10 km d'interesse (funzionamento 3 e 4) in termini di potenza termica</i>	170
<i>Tabella 35. Nuovi scenari di disponibilità della risorsa distinti in base alla riduzione di potenza</i>	171
<i>Tabella 36. Scenari di potenza termica stimata per l'intera lunghezza del tunnel di base, da TELT (2021)</i>	172
<i>Tabella 37. Risorsa geotermica disponibile con lo sfruttamento delle acque (da studio TELT, 2021) lungo il tunnel di base</i>	172
<i>Tabella 38. Risultati e parametri utilizzati nell'analisi parametrica ($v = 0,3$ m/s)</i>	181

<i>Tabella 39. Risultati e parametri utilizzati nell' analisi parametrica ($v = 0,4$ m/s)</i>	<i>181</i>
<i>Tabella 40. Risultati e parametri utilizzati nell' analisi parametrica ($v = 0,5$ m/s)</i>	<i>182</i>
<i>Tabella 41. Risultati e parametri utilizzati nell' analisi parametrica ($v = 0,6$ m/s)</i>	<i>182</i>
<i>Tabella 42. Risultati e parametri utilizzati nell' analisi parametrica ($v = 0,7$ m/s)</i>	<i>183</i>
<i>Tabella 43. Risultati e parametri utilizzati nell' analisi parametrica ($v = 0,8$ m/s)</i>	<i>183</i>
<i>Tabella 44. Risultati e parametri utilizzati nell' analisi parametrica ($v = 0,9$ m/s)</i>	<i>184</i>
<i>Tabella 45. Risultati e parametri utilizzati nell' analisi parametrica ($v = 1,0$ m/s)</i>	<i>184</i>
<i>Tabella 46. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 1° anno....</i>	<i>185</i>
<i>Tabella 47. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 2° anno....</i>	<i>185</i>
<i>Tabella 48. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 3° anno....</i>	<i>186</i>
<i>Tabella 49. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 4° anno....</i>	<i>186</i>
<i>Tabella 50. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 5° anno....</i>	<i>186</i>
<i>Tabella 51. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 6° anno....</i>	<i>186</i>
<i>Tabella 52. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 7° anno....</i>	<i>187</i>
<i>Tabella 53. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 8°anno.....</i>	<i>187</i>
<i>Tabella 54. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 9° anno....</i>	<i>187</i>
<i>Tabella 55. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 10° anno..</i>	<i>187</i>

1. INTRODUZIONE

Il rispetto del Protocollo di Kyoto entro il 2012, gli obiettivi dello European Strategic Energy Technology Plan con il 20-20-20 (20% di riduzione dei gas serra emessi in atmosfera, 20% di produzione da energie rinnovabili, 20% di riduzione dell'uso di energia primaria), il cambiamento climatico globale oramai evidente anche ai più scettici non permettono più di aspettare.

La domanda di energia nel mondo è in continua crescita ed è ancora attualmente soddisfatta principalmente da petrolio, gas naturale e carbone. Allo stesso tempo, alti livelli di inquinamento atmosferico e mancanza di spazi verdi colpiscono le grandi città portando ad un crescente utilizzo della metropolitana per i trasporti e le utenze. La necessità di sviluppare risorse energetiche locali e a basso impatto ambientale diventa sempre più necessaria.

In questo contesto, l'energia geotermica può svolgere un ruolo importante e il suo potenziale di crescita dovrebbe essere studiato in quanto fonte di energia 'gratuita' che può essere incorporata in qualsiasi struttura ingegneristica che fornisca ampie aree di interfaccia con il suolo.

Grazie alle sue peculiari caratteristiche, è una risorsa sostenibile, compatibile con l'ambiente ed economicamente conveniente.

Vi è quindi un crescente utilizzo in tutto il mondo delle cosiddette "geostrutture energetiche" che sfruttano la temperatura relativamente costante del terreno sottostante per ridurre il fabbisogno energetico degli edifici. Il fluido che circola nei tubi di tali strutture può estrarre calore dal terreno per aiutare a riscaldare un edificio in inverno e può espellere il calore in eccesso dall'aria condizionata in estate. Tuttavia, questo introduce ulteriori stress e tensioni potenzialmente gravi che devono essere considerati durante la progettazione, anche se raramente sono critici.

Tali progetti termici e meccanici devono essere sviluppati facendo un uso efficace di metodi computazionali per quantificare il calore sfruttabile e valutare le possibili conseguenze sul terreno circostante e sulla struttura stessa. In questo studio saranno mostrate analisi numeriche TH al fine di ottenere una progettazione corretta ed efficace dei tunnel energetici.

Per concludere, le strutture energetiche hanno inequivocabili benefici che, di seguito, si vanno ad elencare:

- Sfruttano energia sostenibile, riducendo l'inquinamento;
- Offrono una riduzione delle emissioni di CO₂, a fronte di una riduzione della richiesta di combustibile fossile;
- Sono economiche, soprattutto nel lungo periodo;
- Sono a bassa manutenzione e lunga durata;
- Promuovono il rispetto degli obblighi internazionali in materia di ambiente, come gli obiettivi proposti a Kyoto (1997) e Toronto (1998);
- Anche se le strutture termo-attive a contatto col terreno richiedono comunemente costi d'investimento simili o leggermente superiori a quelli dei sistemi convenzionali, comportano costi di gestione più bassi e, quindi, costi del ciclo di vita;
- I sistemi energetici geotermici funzionano in modo completamente automatizzato;
- Per le basse temperature e pressioni previste nei circuiti di trasporto del calore, i sistemi di riscaldamento/raffreddamento geotermico possono operare senza rischi;
- Il circuito primario chiuso dello scambiatore di calore, immerso nel calcestruzzo previene il danneggiamento delle tubature o l'inquinamento delle acque sotterranee;
- Offrono un maggiore comfort negli edifici (ad esempio nelle stanze interne); inoltre il raffreddamento geotermico può rimpiazzare il convenzionale sistema di aria condizionata, il quale è spesso ritenuto rumoroso e anti-igienico;
- Non è previsto lo stoccaggio di combustibile fossile, né sono necessari radiatori a vista;
- L'energia geotermica può essere combinata con altre forme di energia e non è soggetta alle stesse debolezze delle altre (ad esempio non è indebolita da condizioni di siccità come l'energia idroelettrica né il suo costo è soggetto a imprevedibili fluttuazioni di prezzo);
- Ha una positiva immagine pubblica ed è supportata da sovvenzioni governative in molte Regioni.

2. ENERGIA GEOTERMICA

L'energia geotermica è una forma di energia alternativa, generata a partire dal calore naturale della Terra, il cosiddetto "gradiente geotermico", originato dai processi di decadimento degli elementi contenuti naturalmente all'interno del nucleo, del mantello e della crosta terrestre. Infatti, l'etimologia del termine geotermia è riconducibile all'unione delle parole greche gê (terra) e thermos (calore), ovvero "calore della terra". Tale calore rappresenta una riserva di energia che può essere sfruttata con diverse finalità, in funzione della temperatura che caratterizza il cosiddetto serbatoio geotermico. Grazie alle sue peculiari caratteristiche, è una risorsa sostenibile, rinnovabile, compatibile con l'ambiente ed economicamente conveniente.

Nel 2016, sul podio dei più forti produttori di energia geotermica si trovavano: gli Stati Uniti (18,6 TWh), la Nuova Zelanda (7,43 TWh) e l'Italia (6,29 TWh). Le risorse geotermiche del territorio italiano, e potenzialmente estraibili da profondità fino a 5 km, sono dell'ordine di 21 Exajoule (21x10¹⁸ Joule, corrispondenti a circa 500 MTEP, ovvero 500 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio). L'Italia ha dunque una forte vocazione geotermica e questo potenziale potrebbe essere valorizzato molto più di quanto fatto finora.

2.1 Cenni storici

Lo sfruttamento delle risorse geotermiche ha una storia molto interessante. Già nel periodo arcaico (VIII secolo a.C.) autori greci descrivevano gli usi terapeutici di sorgenti termali oltre a riportare miti, leggende, tradizioni popolari e pratiche divinatorie collegate a manifestazioni geotermiche.

Tra i primi sfruttamenti dell'energia geotermica, si annoverano i centri termali in Cina nel III secolo a.C. e dal II secolo a.C. anche gli antichi romani utilizzarono questa risorsa costruendo terme e bagni ad uso pubblico. Solo nel XVII secolo, partendo dalle osservazioni empiriche sull'aumento della temperatura con la profondità, si cominciarono a costruire le basi delle moderne teorie sull'origine del calore terrestre.

Lo sfruttamento esclusivamente industriale delle risorse geotermiche nasce invece nei primi decenni del XIX secolo in Italia, in Toscana, nelle vicinanze di Volterra, con lo sviluppo dell'industria dell'acido borico. Dopo un decennio di tentativi e sviluppi si può datare al 1827 l'inizio della grande avventura industriale dei fluidi geotermici: François De Larderel utilizzò il vapore di un geyser per riscaldare le acque ricche di boro e, tramite l'evaporazione dell'acqua, ottenere l'acido borico.

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

Il principe Piero Ginori Conti (Figura 1), erede della ditta di De Larderel, iniziò degli esperimenti finalizzati a sfruttare il vapore naturale per ottenere energia di tipo meccanico e, in seguito, pensò di utilizzare il vapore per la generazione dell'energia elettrica: il 4 luglio 1904 ottenne il primo fondamentale successo utilizzando una macchina a vapore a stantuffo della potenza di circa 500 W, accoppiata ad una dinamo con cui riuscì ad accendere cinque lampadine.

Più tardi, nel 1912, furono in grado di cominciare a realizzare una centrale elettrica in grado di soddisfare il fabbisogno di elettricità degli stabilimenti per l'estrazione dell'acido; nel 1914 poi fu costruita la prima linea elettrica al mondo alimentata da energia geotermica (in grado di coprire la distanza Larderello-Volterra di 25 km). Questo sistema migliorerà fino ad arrivare, nel 1916, alla distribuzione di energia elettrica in tutta la zona circostante.



Figura 1. Larderello, 1904: il conte Ginori Conti (www.unionegeotermica.com)

Questi esperimenti furono emulati in seguito in altri paesi e, soprattutto, in quelle zone dove vi erano evidenti manifestazioni superficiali della presenza nel sottosuolo di elevate quantità di fluidi geotermici ad alta temperatura: un esempio è la centrale "The Geysers", a Nord di San Francisco in California

(USA), che con i suoi 800 MW detiene il primato mondiale per potenza totale; l'Islanda è uno stato che sfrutta molto il suo "patrimonio" geotermico ad alta entalpia, producendo corrente o utilizzando il calore per il riscaldamento.

2.2 Origine dell'energia geotermica e sua classificazione

L'energia geotermica è quella particolare forma di energia della Terra dovuta al calore immagazzinato all'interno della crosta o più precisamente alla differenza di temperatura tra le zone più profonde, a temperatura maggiore, e quelle superficiali, a temperatura minore, che dà origine ad un flusso di calore dall'interno verso l'esterno della Terra.

La presenza di un gradiente termico verticale (Figura 2), la presenza di eruzioni vulcaniche, di fumarole e di sorgenti termali forniscono un'evidenza diretta del calore contenuto all'interno del nostro pianeta, che può esser a buon diritto considerato come un vasto motore termico. I processi responsabili della produzione di quest'energia sono vari e direttamente collegati alla costituzione interna della Terra.

È stata fatta una stima del valore della temperatura in funzione della profondità di 40-45 °C nel primo chilometro della crosta, 100-120 °C a 4 km di profondità e così via (assumendo, in media, un aumento di 2,5-3 °C ogni 100 metri); tuttavia questo ragionamento risulta incompleto, poiché non tiene in conto delle caratteristiche geologiche del sottosuolo che vanno ad influenzare il fenomeno.

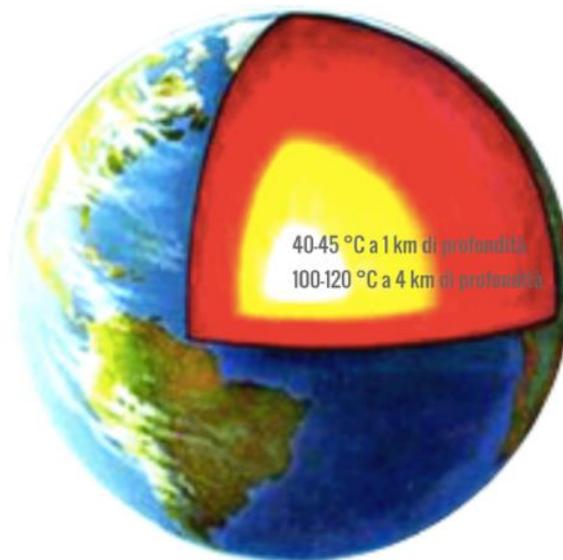


Figura 2. Probabile distribuzione della temperatura interna terrestre (<https://www.gsamasternews.it/?p=2263>)

Bisogna dunque sottolineare il fatto che questo gradiente sarebbe costante in tutti i punti del globo solo se le sue caratteristiche fossero identiche ovunque: poiché ciò non si verifica, si assiste ad anomalie termiche, positive o negative, a seconda che il gradiente sia più o meno basso della media. Non vi è ancora una terminologia standard per la classificazione delle risorse geotermiche; piuttosto, in

letteratura, esistono termini diversi a seconda del criterio seguito. Il più comune criterio di classificazione delle risorse geotermiche si basa sull'entalpia dei fluidi termovettori, che trasferiscono il calore dalle masse calde profonde alla superficie. L'entalpia, che è correlata alla temperatura e alla pressione dei fluidi stessi, è usata per esprimere il loro contenuto energetico in rapporto sia al calore che al lavoro meccanico che se ne può trarre, e dà un'idea approssimativa del loro "valore".

In base al contenuto energetico e ai possibili metodi di utilizzo del fluido si dividono le risorse geotermiche in risorse a *bassa, media e alta entalpia*:

- Sistemi a Bassa Entalpia: le risorse a bassa entalpia sono quelle il cui fluido geotermico ha una temperatura minore di 90 °C. Adatti all'uso diretto del calore, non si prestano invece alla produzione di energia.
- Sistemi a Media Entalpia: le temperature dei fluidi saranno ora comprese tra 90 e 180 °C.
- Sistemi ad Alta Entalpia: in cui si superano i 180 °C. Questi sistemi son solitamente impiegati per la produzione di energia elettrica.

Si possono distinguere i sistemi geotermici anche con riferimento alle caratteristiche fisiche del fluido nel serbatoio: i più diffusi al mondo son i sistemi a *fluido dominante* in contrasto con quelli a *vapore dominante* (White,1973). Nei primi è l'acqua liquida ad esser la fase fluida continua e di cui si controlla la pressione, mentre nei secondi la fase liquida e gassosa coesistono nel serbatoio, con il vapore come fase continua e di cui si controlla la pressione.

2.2.1 Geotermia a Bassa Entalpia

Come già detto, l'energia geotermica a bassa entalpia sfrutta fluidi con temperature al di sotto dei 90°C. La produzione di energia elettrica è la più importante forma di utilizzazione delle risorse geotermiche la cui temperatura supera i 150 °C, mentre, dati i valori relativamente bassi di temperatura nei sistemi geotermici a bassa entalpia, questi ultimi si prestano molto bene ad usi diretti (ad esempio usi agricoli, civili e industriali).

Potrebbero essere sfruttati per la produzione dell'energia elettrica se fossero disponibili temperature sufficientemente basse per il raffreddamento del fluido di lavoro in una centrale elettrica binaria: queste condizioni son state trovate solo in zone molto fredde (Chena Hot Springs, in Alaska), ma certamente non sono comuni in Italia, tolte le zone alpine più elevate, non adatte a una centrale geotermoelettrica a causa dei problemi di accesso.

Il classico diagramma di Lindal (Lindal, 1973) in Figura 3 è ancora valido e mostra i possibili usi dei fluidi geotermali alle diverse temperature. Fluidi sotto i 20 °C sono usati raramente e in condizioni molto particolari. Fra gli utilizzi dell'energia geotermica a bassa entalpia slegati dagli usi civili si possono

ricordare quelli legati all'agricoltura e zootecnia (tutte quelle applicazioni, dunque, che rientrano nei settori di produzione, lavorazione e conservazione di prodotti vegetali o animali). Fra gli usi civili, invece, quello della climatizzazione degli edifici è una delle forme più antiche e diffuse: le temperature di esercizio dei fluidi qui variano in funzione degli impianti termici adottati.



Figura 3. Diagramma che mostra l'utilizzo dei fluidi geotermali: T tra 20 e 180 °C (Lindal, 1973)

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 arrivano alle temperature sopraindicate, le si potranno raggiungere ricorrendo a sistemi noti come pompe di calore: quest'ultime (descritte brevemente nel capitolo seguente) sono macchinari il cui principio assomiglia a quello di un frigorifero, però al contrario: il loro funzionamento si presenta reversibile (potendo operare alternativamente come unità riscaldanti o raffreddanti) e permette lo scambio di calore tra due mezzi, in questo caso il sottosuolo e l'ambiente da climatizzare.

Non si può fissare, come già detto, una temperatura di riferimento nel sottosuolo, poiché è una grandezza che varia anche in funzione della temperatura dell'aria esterna, almeno per i primi 15-20 m. Per profondità maggiori, invece, subisce un incremento in funzione del gradiente geotermico, rimanendo però più o meno stabile tutto l'anno, una volta fissata la profondità (Baietto et al., 2010) con un valore che si aggira attorno ai 10 °C (Figura 4). Il suolo si presenta perciò come una sorgente adatta allo scambio di calore, essendo più caldo di inverno e più fresco d'estate rispetto all'aria atmosferica, a vantaggio del rendimento della pompa di calore.

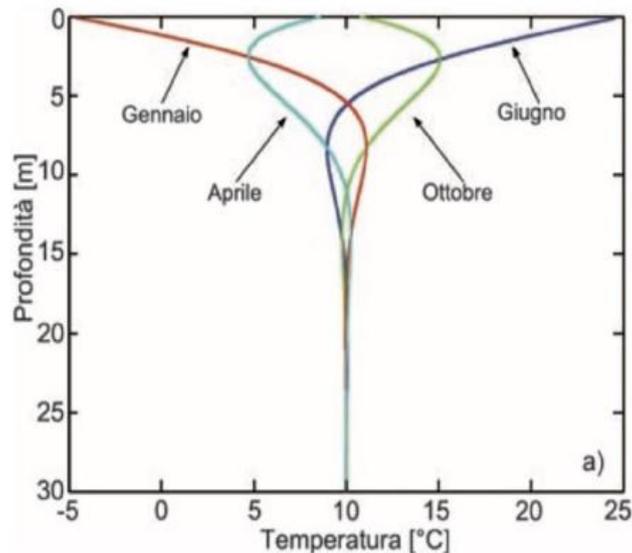


Figura 4. Andamento della temperatura nel sottosuolo (Baietto et al., 2010)

Il trasporto dell'energia termica è effettuato mediante l'acqua stessa presente nel sottosuolo o un liquido antigelo e lo scambio può avere luogo in tre modi diversi.

- Scambio diretto: contatto diretto tra il circuito della pompa di calore e il sottosuolo;
- Impianti a circuito chiuso: dove la pompa 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 è effettuato lo scambio termico.

Il sistema di tubazioni che percorre il terreno può essere aperto o chiuso (sulla loro distinzione si porrà l'attenzione nei paragrafi 2.2.3 e 2.2.4). I principali vantaggi derivanti dallo sfruttamento dell'energia geotermica a bassa entalpia sono legati sia ad aspetti ecologico-ambientali, riducendo le emissioni di CO₂ in atmosfera, sia economici in quanto con l'utilizzo di queste tecnologie, a fronte di un investimento iniziale superiore del 20% circa rispetto ai tradizionali impianti a gas o metano, si ottiene un risparmio complessivo di esercizio di circa il 60% ± 70% (Brandl, 2006).

2.2.2 Pompa di calore

In natura, il calore fluisce spontaneamente da un corpo a temperatura elevata verso altri che si trovano a temperatura inferiore e il processo opposto non avviene mai in maniera spontanea. Le pompe di calore, però, sono macchine che lavorano in direzione opposta alla tendenza naturale del calore, trasferendolo da una sorgente a temperatura più bassa verso un utilizzatore a temperatura più alta: il suo funzionamento, infatti, prevede una spesa di energia esterna inevitabile (elettrica, meccanica o geotermica) e questo lavoro deve essere pari alla differenza fra il calore ceduto al serbatoio caldo e quello sottratto alla sorgente. Nella pompa di calore uno speciale fluido, detto refrigerante, attraversa un circuito chiuso sotto forma di liquido o di vapore a seconda delle condizioni di temperatura e pressione in cui si trova. Questo circuito chiuso è composto da un *compressore*, una *valvola di espansione*, un *condensatore* e un *evaporatore* (schema in Figura 5): questi ultimi due sono costituiti da scambiatori di calore formati da tubi posti a contatto con un fluido di servizio (acqua o aria) nei quali scorre il fluido refrigerante. Con il compressore si fornisce energia al fluido refrigerante che, nell'evaporatore, assorbe calore dal mezzo attorno e lo cede al mezzo da riscaldare tramite il condensatore.

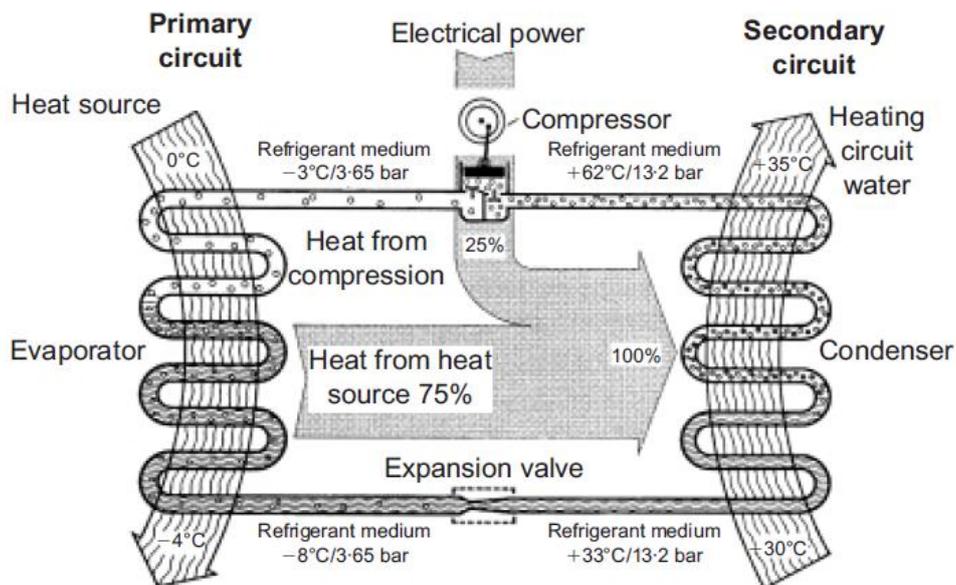


Figura 5. Schema di una pompa di calore con T e pressioni per un mezzo refrigerante R290 (Brandl, 2006)

Le pompe di calore geotermiche (Geothermal Heat Pump), esteticamente simili a una normale caldaia, utilizzano il terreno o l'acqua contenuta in esso come fonte o dispersore di calore, permettendone il passaggio dalla sorgente rispetto al pozzo (punto dove si immette il calore): il sottosuolo rappresenta dunque, per la pompa di calore, un ottimo serbatoio di stoccaggio (in modalità di raffreddamento, essendo l'edificio la "sorgente fredda" da cui estrarre calore) o una fonte da cui estrarlo (quando essa lavora in riscaldamento).

Poiché la temperatura del terreno, come accennato nel punto precedente, non segue il comportamento dell'aria nell'ambiente, la quale subisce notevoli escursioni termiche, si ha a disposizione una differenza di temperatura nei primi metri di profondità che consente di estrarre calore dal terreno d'inverno e cedere calore al medesimo in estate, utilizzandolo rispettivamente per riscaldare e raffreddare. L'utilizzo di pompe di calore geotermiche non è quindi necessariamente legato ad un gradiente geotermico anomalo e non richiede perforazioni profonde: il metodo più semplice ed immediato di ottenere energia termica è quello di estrarre il calore dall'acqua di una falda sotterranea, estraendola e scaricandola in un corso d'acqua, o reiniettandola nella falda stessa. È anche possibile estrarre il calore dal terreno per mezzo di una tubazione continua sotterrata, contenente un fluido refrigerante o un liquido antigelo mantenuto a bassa temperatura e pressurizzato. La Figura 6 sottostante mostra le tre parti che compongono le GHP: **Geothermal heat pump** (scambia il calore tra edificio e terreno e modifica la sua temperatura), **Earth connection** (facilita l'estrazione del calore dal terreno attraverso un ciclo di scambiatori di calore da utilizzare nell'unità della pompa di calore) e **Interior heat distribution system** (condiziona e distribuisce il calore nello spazio interno dell'edificio) (Self J. Et al.,2012).

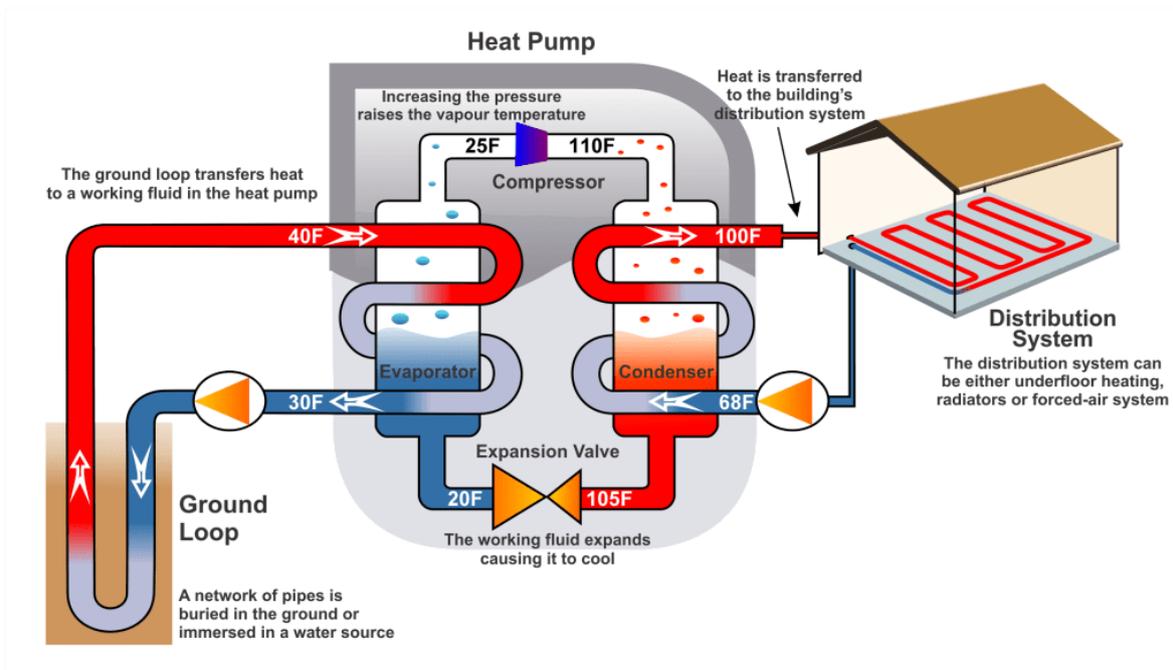


Figura 6. Schematizzazione della pompa di calore (Singh et al., 2019)

Una delle caratteristiche più attraenti delle pompe di calore è la loro capacità di trasportare più energia termica rispetto all'energia richiesta per il funzionamento del dispositivo: avranno, dunque, un'**efficienza energetica** maggiore del 100 % (grandezza definita come rapporto tra l'energia prodotta in uscita e l'energia motrice in entrata, in percentuale).

Per le pompe di calore l'efficienza energetica è misurata con il *coefficiente di prestazione* "C.O.P":

$$COP = \frac{\text{energia restituita (calore ceduto al mezzo da riscaldare in kW)}}{\text{energia immessa per il funzionamento della macchina (kW)}}$$

I COP per le pompe geotermiche di solito vanno da 3 a 6, con un valore dipendente dalle modalità di connessione alla terra, dalle dimensioni del sistema, dalle caratteristiche della terra stessa, dalle profondità di installazione, dal clima locale e da altre caratteristiche; un valore COP = 4 significa che da una porzione di energia elettrica e tre porzioni di energia geotermica (dal terreno) se ne derivano 4 di energia complessiva restituita (Figura 7).

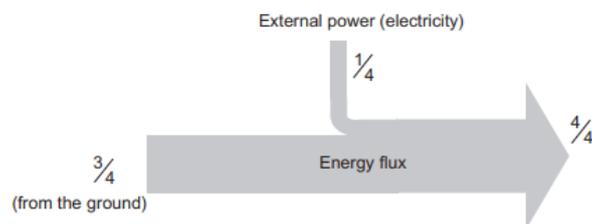


Figura 7. Flusso di energia (Brandl, 2006)

Per ragioni economiche si dovrebbe raggiungere un valore di COP > 4; per tale motivo la temperatura utilizzabile nel circuito secondario non dovrebbe superare i 35 - 45 °C (ottimi, ad esempio, i sistemi radianti, meno i sistemi ad aria) e la temperatura di estrazione nei tubi dell'assorbitore non dovrebbe scendere sotto 0-5 °C (il terreno è dunque una sorgente fredda ideale). Sarà una grandezza tanto maggiore quanto più bassa sarà la temperatura a cui il calore viene ceduto e quanto più alta quella della sorgente da cui viene assorbito. Di conseguenza, questa tecnologia tende ad essere limitata ad un riscaldamento (e raffreddamento) a bassa temperatura.

2.2.3 Tipologie di impianto geotermico a bassa entalpia a circuito aperto

Nel sistema aperto (vedi Figura 8) si estrae l'acqua calda da una falda sotterranea e la si porta allo scambiatore di calore. Successivamente la si scarica in un corso d'acqua o nello stesso acquifero da cui è stata estratta o, in alternativa, in un bacino appositamente costruito (e tale da permettere la rinfiltrazione verso il terreno), tramite trincee drenanti o pozzi. In questa tipologia di impianti vengono realizzati dei pozzi (uno di prelievo e uno di reimmissione, alimentati dalla falda), da cui l'acqua viene prelevata ed inviata allo scambiatore che si connette con la pompa di calore. Successivamente questa sarà pompata in falda. Vi sono due possibilità: o si sfrutta un pozzo diverso da quello di mandata o, nel caso in cui il pozzo sia lo stesso, l'acqua di ritorno sarà pompata sulla superficie del pozzo mentre quella di alimentazione viene prelevata dal fondo. Nel caso si vadano a costruire due pozzi, essi devono esser

installati a una distanza sufficiente da evitare la cortocircuitazione termica, che si rischia di raggiungere quando l'acqua termicamente alterata dal pozzo di reimmissione raggiunge il pozzo di prelievo.



Figura 8. Schema di un sistema Open loop (<http://old.tekneco.it/>)

2.2.4 Tipologie di impianto geotermico a bassa entalpia a circuito chiuso

Nel sistema chiuso (vedi Figura 9) il calore è intercettato dal terreno per mezzo di una tubazione continua sotterrata con al suo interno un fluido refrigerante o liquido antigelo mantenuto a bassa temperatura e pressurizzato che circola in un loop continuo.

In questa tipologia di impianti viene installato un circuito di tubazioni in PVC ad "U", poste verticalmente in appositi pozzi ottenuti tramite perforazioni (sistema verticale) o posti orizzontalmente mediante escavazione di una trincea nel terreno (sistema orizzontale) come mostra la Figura 9. Entrambi sono circuiti chiusi e impermeabilizzati, in cui il fluido termovettore (acqua mista a glicole – liquido antigelo) presente al suo interno, svolge solamente la funzione di trasferire il calore dal suolo al circuito della pompa di calore e viceversa (Rafferty, 1997).

Nello schema orizzontale il circuito viene posto in una trincea la cui profondità supererà la porzione di terreno dove potrebbe verificarsi il congelamento (1-3 m circa): maggiore la profondità di installazione, maggiore sarà l'inerzia termica e, di conseguenza, il rendimento della pompa di calore. Il tubo può esser lineare o a spirale e, in base alla sua lunghezza, si avrà una diversa potenza scambiabile col terreno.

Il rendimento della pompa di calore è più basso se posto in confronto con quello delle sonde geotermiche previste nella configurazione verticale del circuito closed loop, tuttavia i minori costi di installazione rendono comunque competitiva questa soluzione.



Figura 9. Schema di un sistema Closed loop (<http://old.tekneco.it/>)

Nello schema verticale il circuito si compone di due o più tubi installati nel terreno verticalmente (sonde geotermiche se son state effettuate perforazioni apposite o in un palo di fondazione, a costituire pali geotermici, Figura 10) a formare un circuito chiuso dove scorre il fluido termovettore.

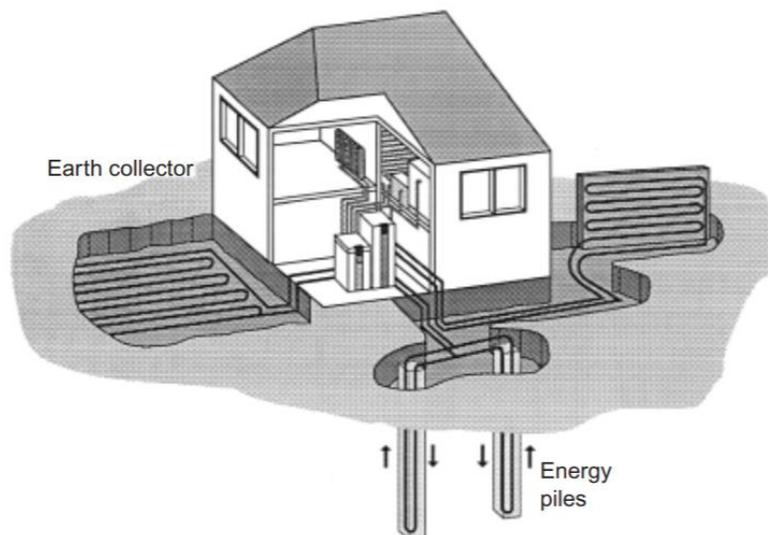


Figura 10. Schema di heating/cooling di una casa unifamiliare con pali geotermici (Brandl, 2006)

La lunghezza della perforazione può essere compresa tra 20 e 200 m e avere una distanza compresa tra 5 e 10 m: in realtà bisogna specificare che questi numeri sono influenzati da fattori come la tipologia del sottosuolo e le normative di riferimento in materia di sfruttamento della risorsa geotermica vigenti nel luogo di installazione.

Le sonde geotermiche possono assumere più configurazioni (vedi Figura 11) ed avere un diametro di 15-20 cm:

- Ad U singola con inseriti, al suo interno, un tubo di mandata e uno di ritorno collegati sul fondo;
- Doppia U, differente dal precedente per via della presenza di quattro tubi (e non due) collegati a due a due sul fondo;
- Tripla e Quadrupla U con a loro volta sei (tripla) o otto (quadrupla) tubi collegati sul fondo a due a due.

Esistono anche gli scambiatori coassiali che si distinguono in semplici o complessi (Figura 11 e 12). In quelli semplici il tubo di ritorno è posto all'interno di quello di mandata e, nel caso quest'ultimo presenti un diametro poco inferiore a quello della perforazione, non è nemmeno necessario il getto di riempimento; in quelli complessi, invece, ci sono delle alette di collegamento tra tubo esterno ed interno per garantire non solo la coassialità, ma anche un migliore scambio termico (poiché durante la fase di ritorno il fluido, anziché nella tubazione interna, potrà essere fatto circolare in alcuni dei canali periferici per poter scambiare calore con il terreno in entrambi i sensi di percorrenza).

Sicuramente la prima soluzione ad U è largamente adottata per la sua praticità, affidabilità e ottimizzazione del costo, poiché ha una facilità di installazione superiore, permettendo di eseguire diametri di perforazioni ridotti: il problema più rilevante dei circuiti con sonde geotermiche verticali risiede, infatti, negli alti costi di perforazione, seppur non richiedano un'ampia superficie per la loro posa. All'interno del perforo lo spazio attorno ai tubi è riempito solitamente da un grouting geotermico (un calcestruzzo preparato con inerti silicei e additivi ad elevata conducibilità termica).

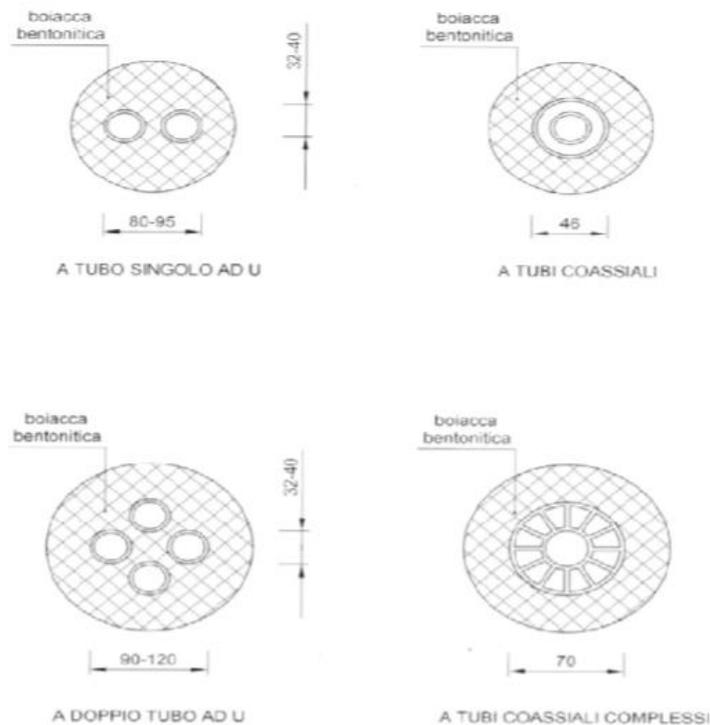


Figura 11. Tipologie di schemi per sonde verticali (Tinti, 2008)

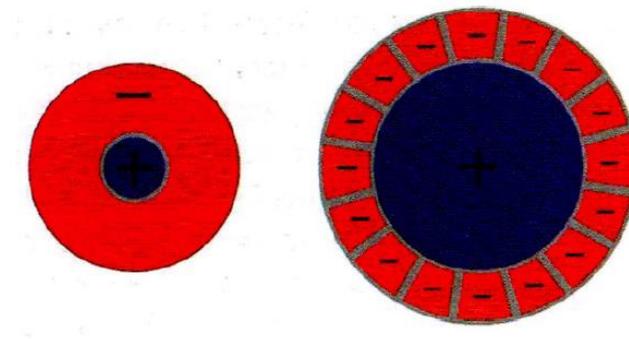


Figura 12. Disposizione degli scambiatori in "tubi coassiali semplici" o "complessi" (Tinti, 2008)

2.3 Normativa di riferimento per la geotermia a bassa entalpia

La diffusione sul territorio nazionale della tecnologia definita geotermia a bassa entalpia o geoscambio risulta ancora limitata per via della scarsa conoscenza dei principi applicativi da parte di molti professionisti e delle corrette modalità tecnico-operative da parte della gran parte degli installatori, nonché fortemente condizionata da una profonda carenza normativa a carattere nazionale ed ancor più a livello regionale.

In un panorama mondiale complesso, con un vincolo chiaro imposto dal protocollo di Kyoto che definiva l'obiettivo al 2020 della diminuzione delle emissioni di CO₂ in atmosfera del 6,5% rispetto al 1990 e

con una comunità scientifica internazionale concorde sugli effetti negativi derivanti dall'emissione di gas serra e polveri sottili provenienti dall'uso di combustibili, l'Unione Europea promuove la diffusione di tecnologie che non prevedano l'utilizzo di fonti di energia fossile, con particolare riferimento al settore dell'edilizia. La direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico dell'edilizia ed il documento strategico del 10 gennaio 2007, definiscono chiaramente la strada da seguire per una corretta politica energetica europea, che chiede l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e la crescita dell'efficienza energetica.

Nel complesso panorama comunitario, solo alcuni paesi si sono dotati di uno strumento normativo efficace: in Italia la situazione è decisamente complessa e frammentaria. L'applicazione dei sistemi di geoscambio per la climatizzazione rientra di diritto tra le tecnologie che permettono di ottenere un miglioramento del rendimento energetico, seppur nelle norme specifiche non sia espressamente menzionata (D.Lgs 19 agosto 2005, n. 192 corretto e integrato con il D.Lgs. 29 dicembre 2006, n. 311). È il D.Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22, art. 10, a definire nell'ambito delle applicazioni geotermiche inequivocabilmente tra le piccole utilizzazioni locali di calore geotermico, quelle effettuate tramite l'installazione di sonde geotermiche che scambiano calore con il sottosuolo senza effettuare il prelievo-reimmissione nel sottosuolo di acque calde o fluidi geotermici.

Il medesimo strumento normativo chiarisce che sono le Regioni, o Enti da esse delegate, le autorità competenti per le funzioni amministrative e di vigilanza per queste utilizzazioni locali geotermiche. Sempre alle Regioni è affidato per tale tipo di applicazioni la definizione di una specifica disciplina applicativa, con previsione di procedure semplificate.

La Regione che per prima si è dotata di uno strumento normativo articolato è stata la Lombardia che già con il Regolamento Regionale 24 marzo 2006 n. 2 nel suo Art.32 ha disciplinato l'uso delle acque superficiali e sotterranee, per gli impianti di geoscambio a ciclo aperto (pompaggio e reimmissione - open loop). Sicuramente l'iter normativo intrapreso dalla Regione Lombardia rappresenta in termini assoluti il più completo ed evoluto quadro nel panorama nazionale.

La Regione Piemonte ha seguito un iter normativo diverso, partendo con la L.R. 22/1996 che ha definito i principi per l'uso e la tutela delle acque sotterranee, prevedendo specifici vincoli di tutela delle falde profonde. Da questo ha emanato criteri e linee guida relativi ai sistemi a ciclo aperto (open loop). Simili, ma più ridotti strumenti normativi sono stati adottati anche per le regioni del Veneto, della Toscana, dell'Umbria, del Friuli Venezia Giulia, della Valle d'Aosta e del Trentino Alto Adige. Il panorama normativo delle restanti Regioni italiane vede lenti procedimenti istruttori in corso di definizione, a testimonianza di un complesso processo di regolamentazione territoriale.

2.4 Geostrutture energetiche

Negli ultimi anni l'ingegneria geotecnica ha ampliato il suo dominio nel campo dell'energia geotecnica e ciò ha portato allo studio del comportamento dei terreni e delle rocce in condizioni complesse ed estreme che coinvolgono azioni accoppiate meccaniche, idrauliche, termiche e geochimiche. Questo ramo dell'ingegneria geotecnica svolgerà un ruolo fondamentale nel prossimo futuro a causa dell'aumento delle richieste di energia nei prossimi decenni associati allo sviluppo economico e alla crescita della popolazione in tutto il mondo.

Perciò alla luce di nuove scoperte in ambito geotecnico, si sono sviluppate nuove tecnologie che consentono di sfruttare questa energia termica. In particolare, si è reso possibile accoppiare alla funzione strutturale delle fondazioni e delle opere in sotterraneo quella di scambiare calore con il terreno; questa possibilità si concretizza laddove si abbia la necessità di realizzare fondazioni profonde, diaframmi o opere in sotterraneo, in cui è quindi possibile annegare nel calcestruzzo un circuito idraulico che realizzi lo scambio termico con il terreno.

Un ulteriore passo in avanti nelle possibilità di sfruttamento di energia geotermica si è avuto a seguito della sperimentazione di sistemi che permettano di scambiare calore nelle gallerie sotterranee (oltre che a pali di fondazione e diaframmi). Su queste ultime soprattutto andremo a porre l'attenzione.

L'ISSMGE ("International Society for Soil Mechanism and Geotechnical Engineering) ha istituito il comitato tecnico TC308 per le "Energy Geotechnics". Le geostrutture energetiche, assieme all'immagazzinaggio nel terreno dell'energia termica, sono un'attività coperta dalla Technical Task Force T-3 (il cui leader è la Dr. Fleur Loveridge):

"Geo-strutture energetiche come pali, diaframmi e tunnel energetici possono utilizzare il terreno per il riscaldamento e il raffreddamento delle strutture. Questi elementi termo-attivi a contatto con il terreno possono essere utilizzati come percorsi per estrarre calore in inverno e iniettare il calore in estate. Pertanto, lo scambio di calore sotterraneo può aiutare a bilanciare la domanda di energia termica nelle stagioni e anche aiutare a mantenere una migliore gestione energetica tra le strutture con diversi profili in termini di domanda di energia. L'uso di elementi profondi della fondazione, come gli scambiatori di calore, presenta sfide uniche per i professionisti geotecnici. I processi che regolano il comportamento di scambio termico possono influenzare i meccanismi di trasferimento del carico in queste strutture profonde di fondazione. Sorge la necessità di sintetizzare varie linee guida per la progettazione, nei diversi paesi. Esistono anche proposte che si offrono di utilizzare il calore scambiato in queste applicazioni al fine di migliorare il comportamento di alcuni tipi di terreni. Opportunità di stoccaggio del calore estratto dalle risorse rinnovabili (termiche solari, celle a combustibile, ecc.) nei terreni e in pozzi posti in sequenza sono un'altra importante fetta della ricerca futura. Alla base di questo accoppiamento vi è un'ampia comprensione dei processi termici e meccanici, poiché questi complessi

fenomeni fanno riferimento al comportamento termico del suolo e all'interazione della struttura con il suolo indotta dalla temperatura”

(<https://www.issmge.org/committees/technical-committees/impact-on-society/energy-geotechnics>).

Le fondazioni energetiche andranno a costituire un impianto geotermico a circuito chiuso, ma grazie alle buone proprietà termiche del calcestruzzo, il trasferimento di calore è significativamente più alto che nei pozzi e fori di trivellazione (sistemi “open loop”). Inoltre, vengono utilizzati tubi sottili per cui il raggio di curvatura di questi tubi scambiatori nella zona inferiore risulta essere più grande rispetto al caso convenzionale di estrazione/accumulo di calore in pozzi o fori di trivellazione di estrazione/accumulo di calore. Ciò vuol dire che la resistenza al flusso del fluido termovettore è minore e i costi di operazione sono più bassi.

Le fondazioni energetiche contengono serpentine chiuse di tubi di plastica attraverso le quali viene pompato un fluido termovettore che scambia energia tra l'edificio e il terreno; il medesimo principio si applica alle pareti energetiche (muri di contenimento), pozzi energetici e tunnel energetici. La differenza essenziale rispetto agli impianti geotermici a bassa entalpia visti nei capitoli precedenti (“closed/open loop systems”) sta nella presenza di elementi in calcestruzzo, a contatto col terreno: anche loro aiutano allo scambio termico e, essendo già presenti per ragioni strutturali, non vanno costruiti separatamente. Inoltre, il calcestruzzo ha una maggiore conducibilità termica rispetto al terreno.

2.4.1 Tubi di scambio e fluidi termovettori

L'aspetto aggiuntivo dovuto all'attivazione termica, che distingue le geo-strutture energetiche da quelle non energetiche, è rappresentato dai tubi e dal fluido termovettore presenti nel circuito primario, dove il calore viene scambiato a livello della struttura stessa.

Si tratta di tubi di polietilene reticolato (Pe-Xa), che costituiscono un aspetto integrativo rispetto ad una geostruttura non energetica, disponibili in commercio a prezzi moderati, non comportando un aggravio eccessivo in termini di costi dei materiali (Figura 13).

Alcune tipologie di tubi mantengono la forma con la quale sono stati prodotti (e il loro costo risulta leggermente maggiore), mentre ve ne sono altre che richiedono di esser scaldate per poter assumere la forma e curvatura desiderata. Ad ogni modo sono tutte in grado di resistere ad alte pressioni (15 bar) e temperature, come anche a corrosione, garantendo una durabilità elevata (100 anni), compatibile con quella della geostruttura stessa (Nicholson, 2013). Questi tubi son composti da tre strati: lo strato interno è in polietilene ad alta densità, quello intermedio è in materiale polimerico e lo strato esterno è formato da una barriera in alcool vinile etilene (EVOH), impermeabile rispetto all'ossigeno. Il fluido termovettore che vi scorre è un glicole propilenico miscelato con acqua in grado di lavorare anche in climi freddi, fino a temperature di -20 °C.



Figura 13. Tubi in polietilene adottati per le geostrutture (Barla, 2021)

Il circuito di tubazioni attorno alla geostruttura rappresenta il “**circuito primario**”, cioè lo scambiatore con il terreno (che nel classico impianto geotermico era costituito dal Borehole Heat Exchanger o dalle serpentine annegate nel giardino di casa); vi è poi lo “**scambiatore**” (rappresentato dalla pompa di calore in grado di passare il calore estratto dal circuito primario al circuito secondario e a volte accompagnata da un serbatoio di accumulo) ed infine il “**circuito secondario**”, che si trova a livello dell’abitazione. Nella Figura 14 vi è un esempio di questo schema: in essa il circuito secondario prevede dei pannelli radianti agenti come riscaldamento a pavimento, tipologia che meglio si adatta per i casi di sistemi geotermici a bassa entalpia in quanto prevede temperature non troppo elevate (35 - 40 °C) rispetto a quelle, ad esempio, dei termosifoni.

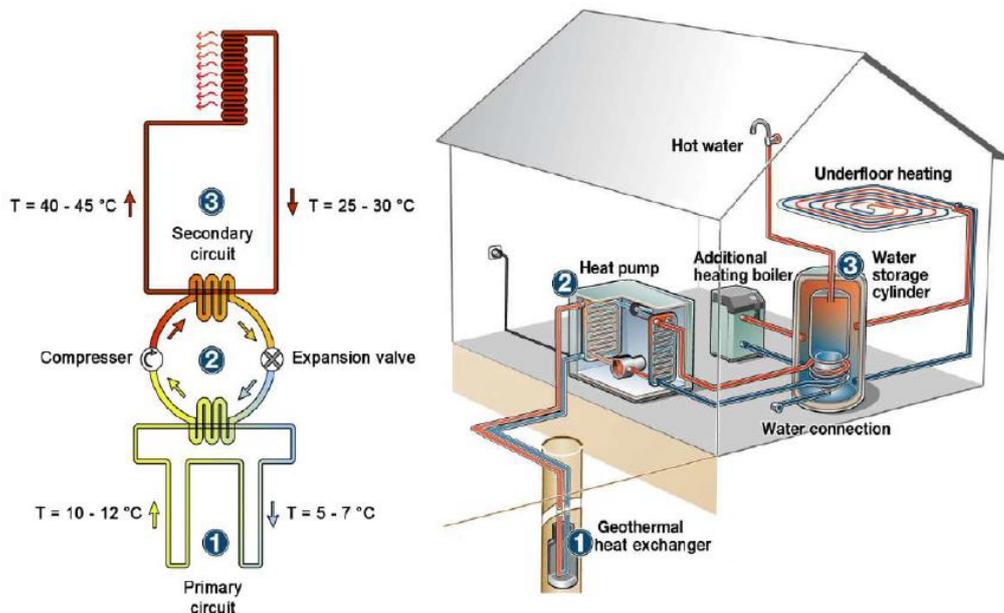


Figura 14. Circuito primario, pompa di calore e circuito secondario con pannelli radianti (<https://kuehnbuilding.com/geothermal.html>)

2.4.2 Pali Energetici

Al giorno d'oggi, la geostruttura energetica più comunemente implementata sono i pali. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che la loro configurazione è costituita da un singolo foro, geometria molto favorevole per catturare calore dal terreno e scambiarlo.

Gli studi si sono focalizzati sulle prestazioni termiche di queste strutture e gli effetti geo-meccanici indotti dall'attività termica: le ricerche hanno dimostrato che, riguardo agli effetti indotti a seguito dell'attivazione termica, nella maggior parte dei casi non ci sono problemi significativi.

I pali energetici prevedono, al loro interno, l'installazione di un tubo o un fascio di tubi in polietilene (spesso si tratta di "U" doppi o quadrupli, in base al diametro dei pali) così da costituire una soluzione molto semplice e a basso costo in grado di integrare la funzione secondaria di scambiatore di calore: oltre a fornire supporto strutturale alla sovrastruttura, infatti, i tubi fanno circolare un fluido termovettore così da sfruttare le capacità di accumulo termico del terreno che circonda la fondazione.

Questi fasci di tubi possono essere connessi alle gabbie di armatura installate (in fabbrica o, più comunemente, in cantiere) all'interno della fondazione, comportando limitati costi aggiuntivi (Figura 15).



*Figura 15. Tubazioni di scambio termico accoppiate all'armatura del palo di fondazione
(<https://undertheground.org/2014/04/11/monitoring-long-term-performance-of-energy-piles/>)*

Anche se il concetto di palo energetico è stato applicato con successo in alcuni paesi come il Regno Unito (Knellwolf et al., 2011), l’Austria (Brandl, 2006) e Germania (Ennigkeit e Katzenbach, 2001), altri paesi sono riluttanti ad accettare questa tecnica a causa, principalmente, di preoccupazioni riguardo al potenziale impatto dei cicli termici sulle prestazioni strutturali del palo. Infatti, a differenza del convenzionale palo di fondazione, quello energetico è soggetto non solo a carichi strutturali, ma anche termici.

Un singolo palo può fornire da 25 a 50 W/m a seconda delle sue dimensioni, dai dettagli costruttivi, dalla tipologia del suolo circostante e dalle tipologie di funzionamento del sistema (Bourne-Webb, 2013): il suo comportamento stagionale è mostrato in Figura 16.

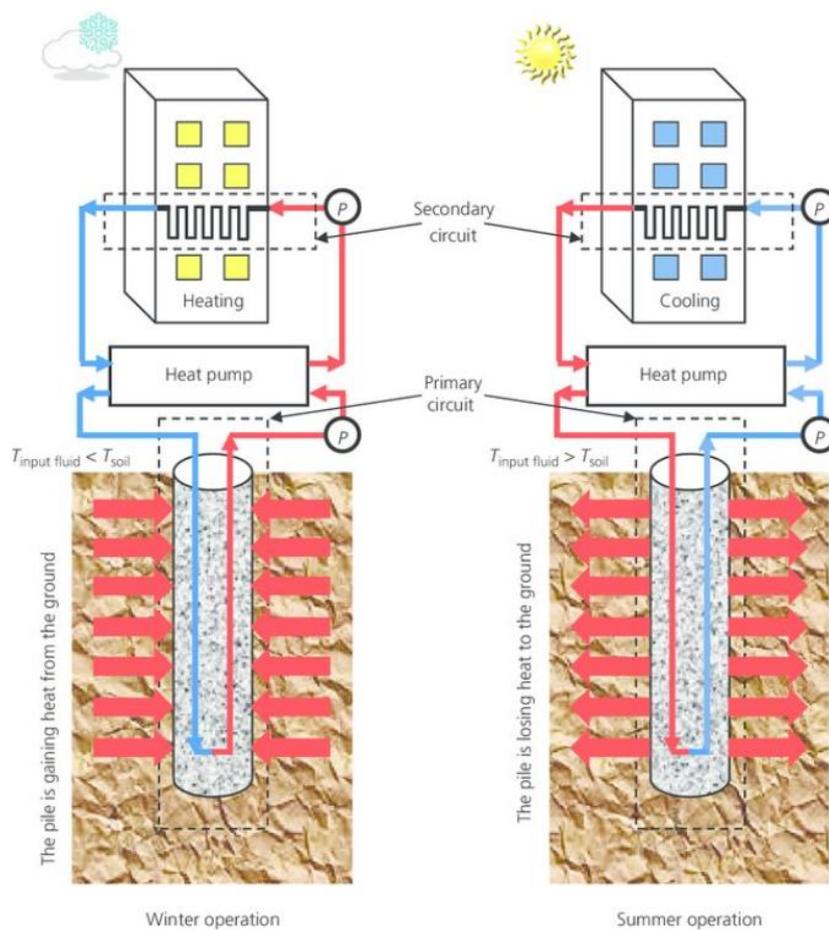


Figura 16. Schema di funzionamento di un palo energetico in inverno e estate (Raouf et al., 2014)

2.4.3 Diaframmi Energetici

Dopo i pali energetici, anche i diaframmi (assieme ai rivestimenti delle gallerie) sono stati studiati e sperimentati come strutture a cui integrare la funzione di scambiatori di calore con il terreno.

Le informazioni su queste geostrutture energetiche sono più limitate; tali non sono del tutto ricoperte dal terreno circostante e ciò aggiunge complessità al problema: la geometria, infatti, non risulta più

essere simmetrica come visto nel caso precedente (punto 2.4.2.) e ciò comporta una difficoltà aggiuntiva nella stima delle tensioni e deformazioni indotte dai carichi termici, assieme alla presenza dell'aria interna che, a sua volta, gioca un ruolo sulla performance del sistema geotermico. Ciononostante la grande area di contatto offre molte opportunità di scambio termico. Come per le gallerie, queste strutture risultano essere scoperte da un lato e lì vi si potrebbe considerare una fonte di calore extra dovuta all'aria, oppure no, a seconda delle attività che si svolgono e dai movimenti che avvengono. Anche le tipologie di costruzione dei diaframmi influiscono sulla loro capacità di scambiare calore; sicuramente le strutture più favorevoli sono i diaframmi in calcestruzzo rinforzato.

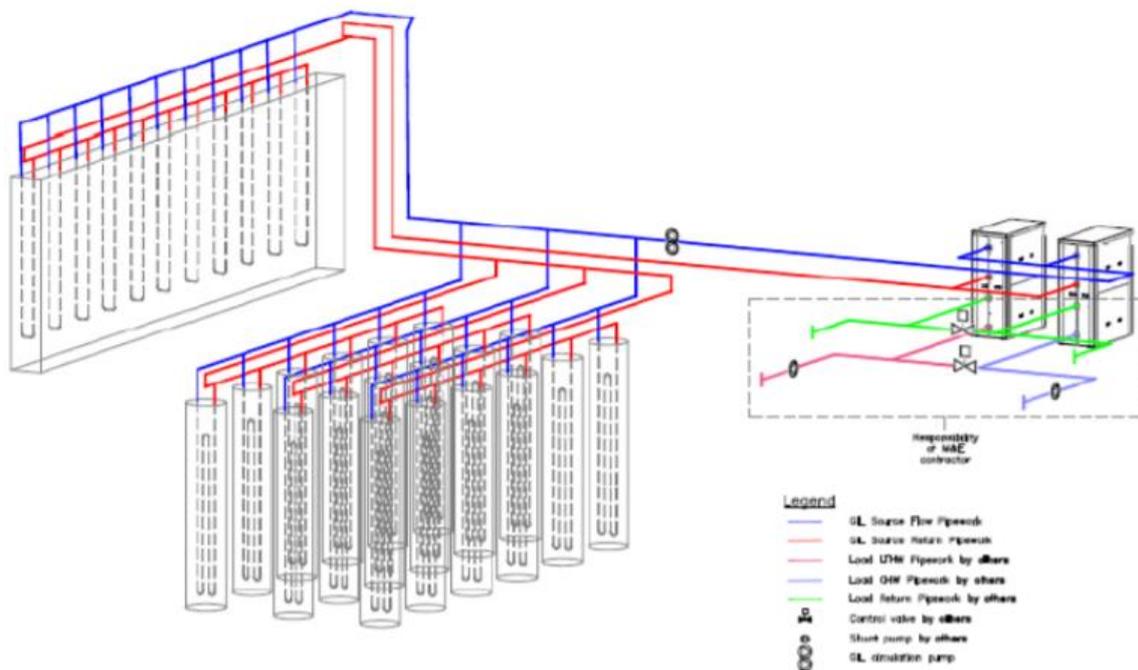


Figura 17. Schema di pali e diaframmi energetici nel Bulgari hotel Knightsbridge London project (Amis, 2011)

Il principio di funzionamento è identico a quello descritto per i pali di fondazione energetici (vedi Figura 17), ma il diaframma energetico offre una funzione strutturale del tutto diversa da quella del palo, poiché è soggetto a pressioni orizzontali contrastate dalla sua risposta flessionale e dall'azione di supporto di ipotetici ancoraggi e tiranti (Sterpi e Coletto, 2016). Potrebbero anche essere di interesse variazioni di pressione indotte dalla contrazione (o espansione) termica del materiale, mentre si potrebbe trascurare la possibile azione indotta dai carichi ciclici termici (poiché la resistenza al taglio dell'interfaccia non è un fattore chiave nel comportamento strutturale della parete). Inoltre, i gradienti di temperatura nel piano della parete, si sviluppano non solo nella direzione verticale, ma anche in quella orizzontale, a causa della distanza non trascurabile che di solito esiste tra le porzioni a temperatura minore e porzioni a temperatura maggiore di questi scambiatori di calore (Sterpi e Coletto, 2016).

2.4.4 Gallerie energetiche

I recenti progressi nella tecnologia degli scavi in sotterraneo hanno permesso la costruzione di tunnel profondi per lo sfruttamento complementare di infrastrutture stradali, civili e idroelettriche, ai fini di assorbimento di fonti energetiche rinnovabili idroelettriche e geotermiche; ciononostante i tunnel sono probabilmente la struttura geoenergetica meno investigata (Barla e Perino, 2014).

Paragonate alle fondazioni quali pali e diaframmi energetici, i tunnel coinvolgono un volume maggiore di terreno e una superficie più grande per lo scambio di calore. Il metodo più economico e semplice per il loro impiego prevede l'utilizzo di tubazioni che siano in grado di trasportare le acque al portale del tunnel, cercando di minimizzare la perdita di temperatura. Se questa all'uscita del tunnel risulta troppo bassa, verrà potenziata tramite pompe di calore.

I pozzi di accesso, le stazioni terminali delle metropolitane, i tunnel di passaggio trasversali e i fori di trivellazione adiacenti assicurano punti di connessione alla superficie (Figure 18). Dove possibile, sarà prevista una sala impianti in superficie in cui incorporare pompe di calore e sistemi di disaerazione.

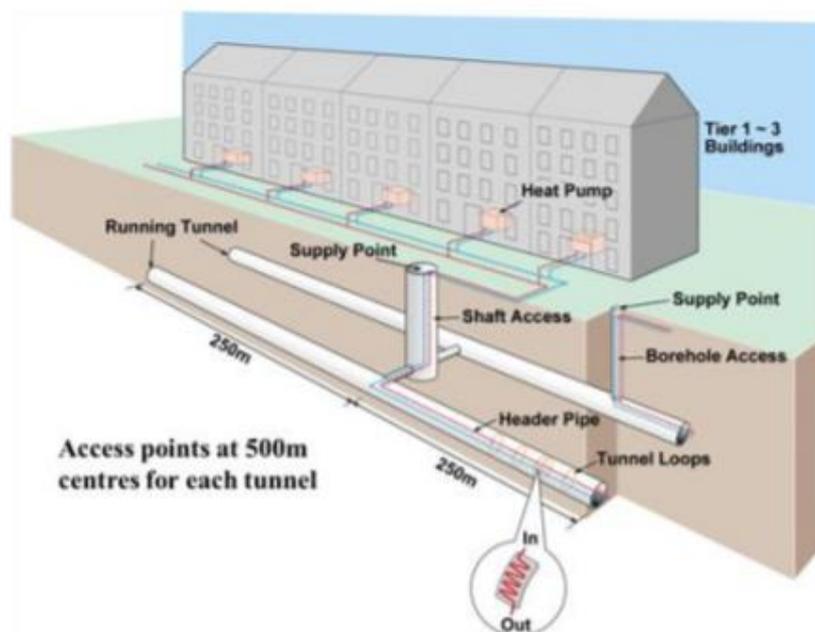


Figura 18. Concetto di tunnel energetico (Nicholson, 2013)

In generale, l'attivazione di un tunnel geotermico si traduce nell'attivazione termica del suo rivestimento attraverso l'inserimento tubi di polietilene nel suo corpo in calcestruzzo, in cui il fluido che vi scorre costituisce il mezzo di trasferimento del calore dal terreno agli edifici o viceversa, tramite pompe di calore (Figura 19). Ciò che è essenziale, comunque, per l'attivazione termica riguarda la temperatura del terreno attorno alla geostruttura: deve mantenersi pressoché costante durante tutto l'anno (condizione assicurata come spiegato nel 2.2.1), così da poter sfruttare il terreno sia come sorgente di calore (inverno) che come serbatoio (estate).

Il calore scambiato all'altezza del tunnel può essere trasferito in superficie o attraverso tubi inseriti nei condotti di ventilazione o attraverso portali; anche le stazioni intermedie della metropolitana possono essere utilizzate per questo scopo. A seconda delle esigenze di calore richieste in superficie le lunghezze delle tubazioni possono essere migliorate al fine di ridurre le perdite di calore e permetterne la distribuzione (approfitando, nel caso di una metropolitana ad esempio, delle numerose connessioni presenti alla superficie). Si può anche sfruttare lo scambio termico al fine di raffreddare il tunnel stesso, andando così a migliorare l'autonomia dell'infrastruttura.

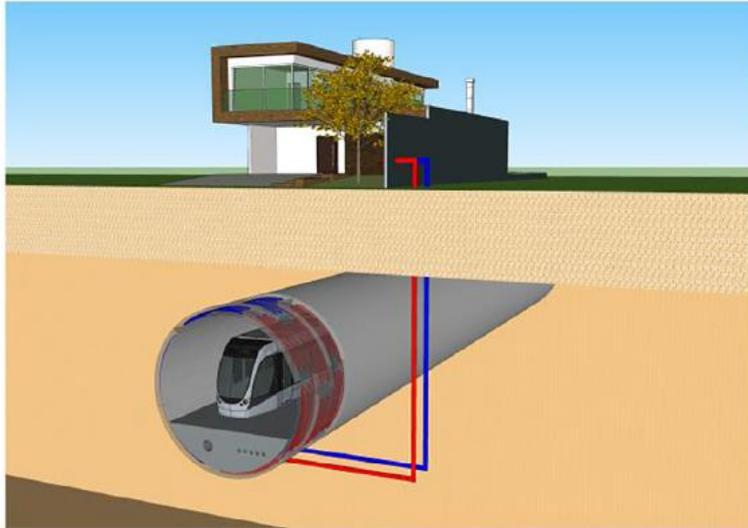


Figura 19. Attivazione termica del rivestimento della galleria e connessione alla pompa di calore (Barla e Di Donna, 2018)

L'efficienza del tunnel energetico è influenzata dalla temperatura dell'aria al suo interno, assieme a quella del terreno circostante. Le condizioni locali (la permeabilità del terreno e il gradiente idraulico possono influenzare anch'essi l'efficienza della geostruttura), come anche le caratteristiche dei tunnel, ne permettono una distinzione in "**freddi**" e "**caldi**" (Figura 20): i primi di solito si sviluppano per brevi distanze e presentano una temperatura interna dell'aria relativamente bassa (15 °C) e costante durante tutto l'anno, con una frequenza di passaggio dei treni tale da non farla aumentare in maniera troppo significativa. Sono strutture di grande diametro interno (10 -12 m) con temperature il cui effetto su quelle del terreno circostante è limitato (in questa categoria rientrano anche i tunnel stradali). I secondi, invece, coprono tratte più estese (ad esempio le linee metropolitane) e sviluppano elevate temperature interne dell'aria: i tunnel urbani in ferrovie sotterranee, infatti, possono raggiungere in estate temperature di 30°C (con un diametro interno di circa 7 m). Il valore non si mantiene costante, ma, a causa della circolazione di treni veloci e delle numerose stazioni, tende ad aumentare andando a scaldare il terreno attorno; anche le frequenti frenate forniscono un contributo ulteriore nella generazione di calore. Diverso è il caso dei tunnel alpini profondi. Nei quali la temperatura interna può crescere fino ai 50 °C a causa delle profondità raggiunte durante lo scavo.

Sono stati suggeriti due metodi per l'attivazione termica del rivestimento di queste geostrutture energetiche: nel caso di *“scavo tradizionale”* (ad esempio con il New Austrian Tunneling method, Figura 21 e 22) le tubazioni di scambio possono essere preventivamente collegate in geotessili non tessuti. Si tratta di tubi in polietilene reticolato ad alta densità fissati alle reti poste tra il rivestimento di prima fase e quello definitivo. Questa tecnologia è stata la prima adottata per i tunnel energetici e ha permesso con facilità di ottenere una pratica installazione in situ (Markiewicz e Adam, 2009).

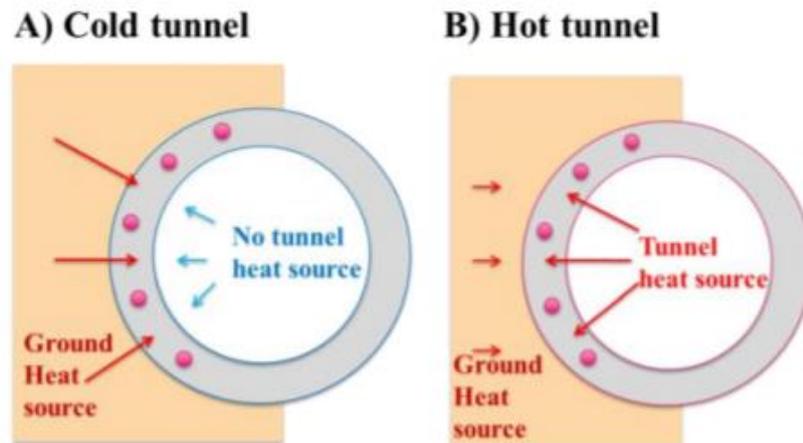


Figura 20. Tunnel "freddi" e tunnel "caldi" (Nicholson, 2013)

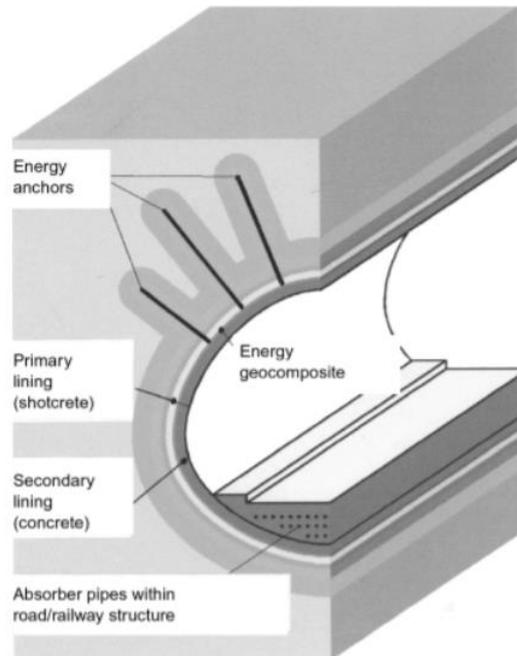


Figura 21. Schema del tunnel energetico Lainzer (Vienna) scavato con il New Austrian Tunneling Method e accompagnato da tiranti scambiatori di calore (Brandl, 2006)



Figura 22. Geotessile con tubi di scambio nel tunnel energetico Lainzer, a Vienna (Brandl, 2006)

Se, invece, lo scavo è **“meccanizzato”**, il rivestimento “a conci” viene prefabbricato in fabbrica e poi posizionato sul posto mediante TBM (Tunnel Boring Machine): i conci saranno dunque preventivamente preparati e ottimizzati per il trasferimento di calore, includendo circuiti idraulici annegati nel calcestruzzo (Barla et al., 2016; Frodl et al., 2010; Nicholson et al., 2014).

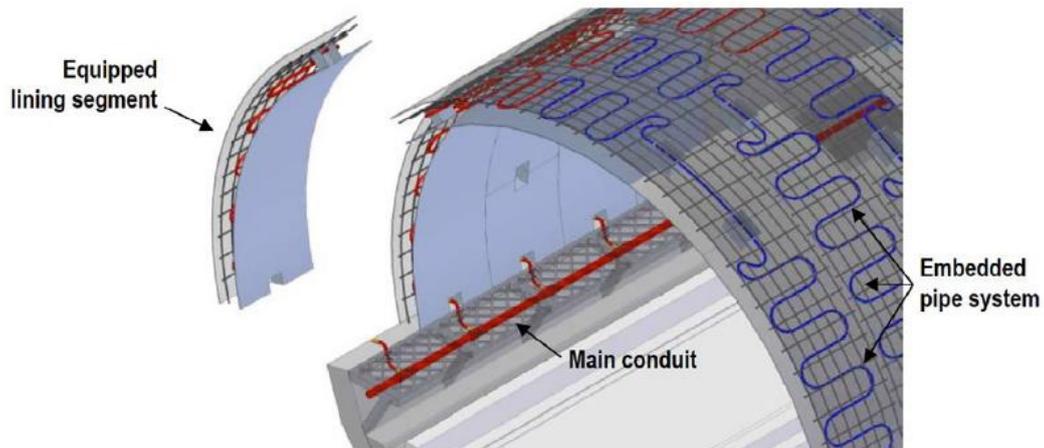


Figura 23. Rappresentazione del rivestimento prefabbricato con conci ottimizzati per lo scambio termico (Barla e Perino, 2014; Barla et al., 2016)

Ad oggi, il numero di tunnel scavati con metodologia TBM ‘full-face’ è in continua crescita, poiché in grado di ridurre i rischi incontrati durante la fase di scavo se il terreno è composto da strati deboli o strati in cui è presente acqua di falda. I tubi scambiatori sono collegati alla gabbia di armatura del conco (Figura 24); nel caso di conci fibro-rinforzati, che invece non necessitano di armatura, si dovranno utilizzare altri metodi di sostegno per le serpentine.

Conci energetici, chiamati ‘Energietübbing’, sono anche stati adottati dalle compagnie Rehau AG&Co. e Zublin AG per la prima volta nel tunnel Jenbach, in Tirolo (Austria), nei quali la serpentina corre parallelamente all’asse del tunnel (vedi Figura 25).



Figura 24. Conco energetico con tubi scambiatori collegati alla gabbia di armatura (Barla et al., 2019b)

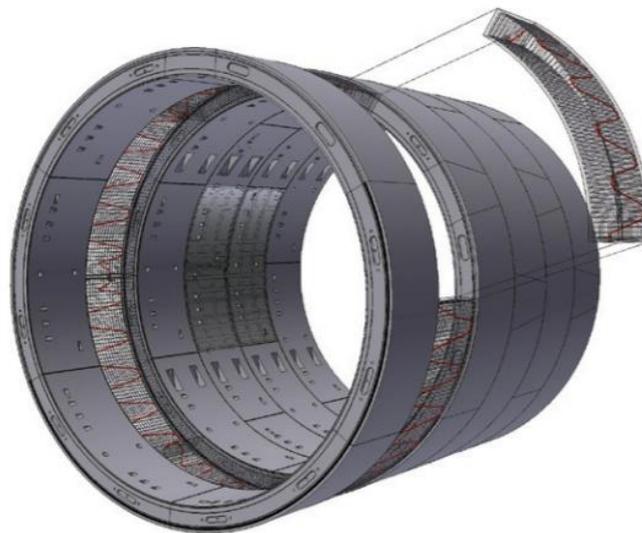


Figura 25. Conco energetico sviluppato dalla Rehau AG & Co e dalla Zublin AG (Franzius e Pralle, 2011)

La serpentina di ogni conco, in cui circola il fluido scambiatore, è collegata a quelli adiacenti attraverso connessioni idrauliche (Figura 26) offrendo, dunque, un rivestimento ad anelli: i conchi saranno dunque uniti in serie di 6 -7 a formare un singolo anello. Anelli successivi saranno posti in parallelo con connessioni tali da permettere la rotazione e movimento dell'anello stesso.



Figura 26. Connessioni dei tubi dei circuiti tra conchi adiacenti, assicurati con nastro isolante (Barla et al., 2019)

La Figura 27 mostra le apposite tasche per la realizzazione dei collegamenti tra tubazioni di mandata e ritorno in un TES (Thermal Energy Segment), sviluppati in Inghilterra. Anche qui i tubi sono inseriti nella gabbia di armatura o nei conci fibro-rinforzati; i tubi di plastica PEX sono di grado A e assicurano una durabilità di 100 anni ad una pressione di 15 bar. Quelle stesse tasche sopracitate, dove si trovano le connessioni meccaniche tra i tubi di un concio con quelli di un altro, permettono a questi ultimi la compressione o l'estensione, nel caso il giunto del collegamento fosse sottoposto a rotazione. La connessione tra due anelli consecutivi, inoltre, deve fare in modo che il concio possa ruotare e, per questa ragione, vengono montati ulteriori tubi di plastica sulla superficie del concio per dare flessibilità e guidare il tunnel (Nicholson, 2013).

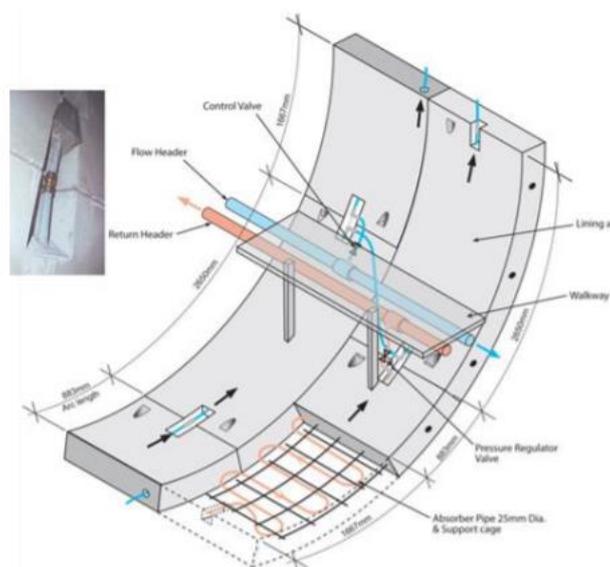


Figura 27. Tasche di collegamento in un Thermal Energy segment (TES, UK), (Nicholson, 2013)

2.4.5 Esempio applicativo della galleria energetica con conci ENERTUN

Il Politecnico di Torino ha studiato di recente l'attivazione termica del tunnel energetico (ENERTUN) per il nuovo tratto di estensione Sud della linea 1 metropolitana di Torino e il suo utilizzo in un sistema di riscaldamento e raffreddamento degli edifici adiacenti. Gli obiettivi principali erano la progettazione e l'ottimizzazione dell'impianto geotermico, la quantificazione del calore estraibile e la valutazione delle conseguenze dovute all'attivazione termica della galleria sul terreno circostante. Il prolungamento a sud è attualmente concluso e coinvolge due stazioni, estendendosi per 1,9 km verso Piazza Bengasi (inquadramento del sito sperimentale in Figura 28).

Il tunnel, scavato con una tecnologia EPB TBM (Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine) e con un diametro interno di 6,8 m ed esterno di 7,4 m, presenta un rivestimento costituito da anelli

prefabbricati in calcestruzzo, ciascuno formato da 7 conci montati dalla TBM stessa e che lavorano a bassa entalpia. Rientra nella categoria dei tunnel freddi, poiché la ventilazione al suo interno è garantita da un discreto numero di pozzi d'ingresso che vi immettono aria esterna. Una schiuma di cemento garantisce il pieno contatto con il terreno circostante e i conci vengono sigillati al fine di renderli impermeabili all'acqua (lo scavo, infatti, ha luogo sotto il livello della falda con una copertura di 21,5 m).

In figura 29 vengono confrontate le geometrie di due conci energetici esistenti: il concio 'Energietübbingand' precedentemente descritto e il concio 'ENERTUN'. A differenza di quello sviluppato dalle compagnie Rehau AG&Co. e Zublin AG, il concio 'ENERTUN' adotta una diversa configurazione dei tubi scambiatori: la direzione principale delle serpentine sarà in questo caso perpendicolare all'asse del tunnel e il circuito di tubi doppio al fine di facilitare lo scambio di calore con il terreno circostante e l'aria interna al tunnel. Grazie ad una geometria innovativa dei tubi (in cui la serpentina di tubi scambiatori di calore sia sviluppata in direzione perpendicolare all'asse del tunnel) è possibile ridurre le perdite di carico e aumentare l'efficienza, specialmente quando il flusso dell'acqua di falda è perpendicolare all'asse della galleria: la diminuzione in termini di perdite di carico è tra il 20% e il 30% per ogni anello del tunnel ENERTUN rispetto ai conci energetici precedentemente descritti (al punto 2.4.4).



Figura 28. Sito sperimentale Enertun e sua collocazione lungo la linea metropolitana 1 di Torino (Barla e Insana, 2020)

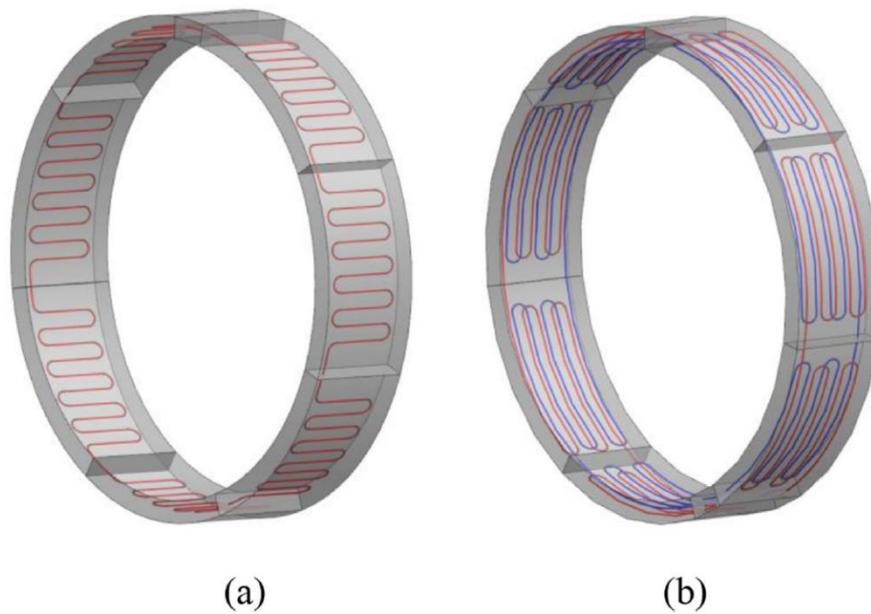


Figura 29. Conci energetici: a) 'Energietübbingand' b) 'ENERTUN' (Ma et al,2021)

- **Concio modulare ENERTUN**

La geometria innovativa prevede l'impiego di conci ENERTUN: si tratta di conci in calcestruzzo armato prefabbricati (spessore compreso tra 30-50 cm a seconda delle condizioni geotecniche del terreno e caratteristiche geometriche della galleria) equipaggiati con serpentine in grado di trasportare liquidi termovettori per il trasferimento di calore. La rete di tubi è in grado di resistere ad alte pressioni e temperature nonché alla corrosione; il loro diametro è variabile tra 15-35 mm con spessore di 1,5-3 mm con una distanza variabile tra 5 e 15 cm dalla superficie dell'estradosso oppure dalla superficie dell'intradosso. I tratti lineari della rete di tubi sono mutuamente spazati di un intervallo variabile tra 20 e 40 cm e il materiale utilizzato è preferibilmente 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.

Esistono tre diverse configurazioni del concio in base al posizionamento della rete di tubi:

- Configurazione Ground: la rete di tubi è posizionata in prossimità dell'estradosso, così da scambiare calore con il terreno circostante (caso b in Figura 30); un dettaglio con la vista esterna ed interna delle serpentine nel concio è mostrata in Figura 32.
- Configurazione Air: le serpentine si trovano in prossimità dell'intradosso e sono predisposte allo scambio di calore con l'aria all'interno del tunnel (caso c in Figura 30); un dettaglio con la vista esterna ed interna delle serpentine nel concio è mostrata in Figura 31.

- Configurazione Ground&Air: prevede un doppio circuito, uno in prossimità dell'estradosso e il secondo in prossimità dell'intradosso, permettendo così lo scambio termico su ambo i lati (caso a in Figura 30).

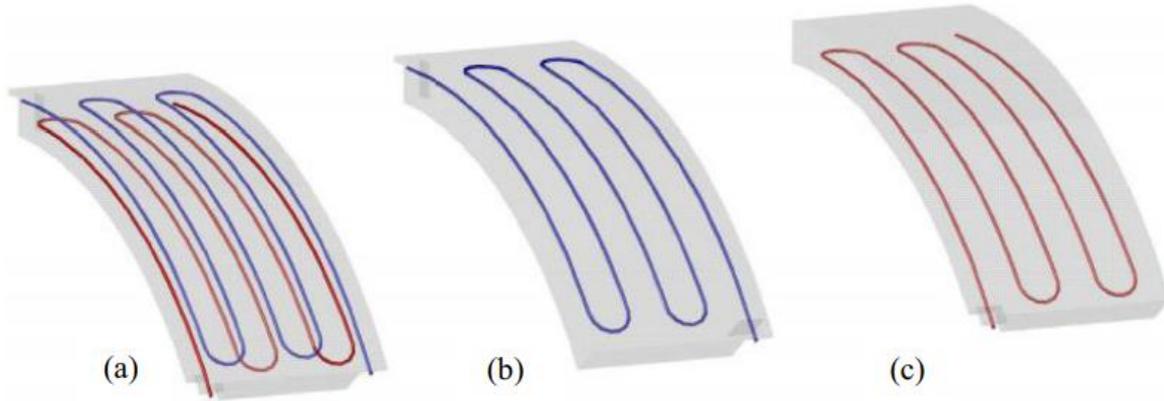


Figura 30. Differenti configurazioni del rivestimento a conci ENERTUN: (a) ground&air, (b) ground and (c) air (Barla e Di Donna, 2018)

A seconda delle esigenze, si può adottare con flessibilità la configurazione più appropriata per ottimizzare lo scambio di calore. Tra i vantaggi di queste applicazioni vi sono: semplicità di fabbricazione e manutenzione, economicità, flessibilità e capacità di adattamento a necessità specifiche, diminuzione delle perdite di carico dell'impianto, riscaldamento invernale e condizionamento estivo degli edifici mediante un sistema energetico rinnovabile e sostenibile, raffreddamento dell'ambiente interno delle gallerie, limitandone il surriscaldamento dovuto al traffico in esercizio e riducendo la ventilazione forzata (grazie all'estrazione del calore interno della galleria e al controllo della sua temperatura), compensazione dei danni ambientali prodotti dalla realizzazione di opere in sotterraneo (grazie all'accoppiamento della costruzione delle infrastrutture necessarie con un sistema di fornitura di energia rinnovabile).

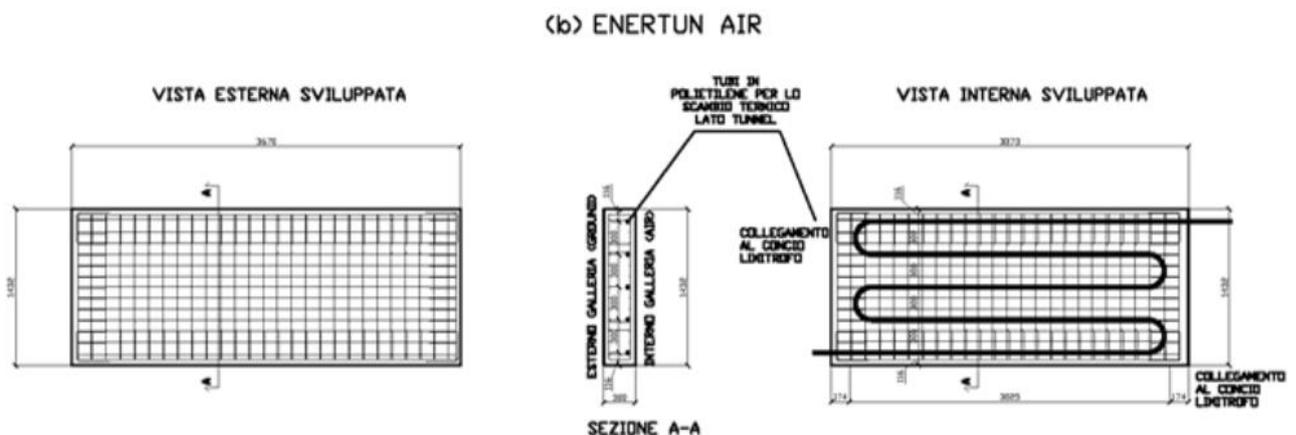


Figura 31. Dettaglio della rete di tubi nel conco modulare in configurazione air

(<https://www.stradeautostrade.it/gallerie-e-tunnelling/conci-energetici-per-il-rivestimento-delle-gallerie/>)

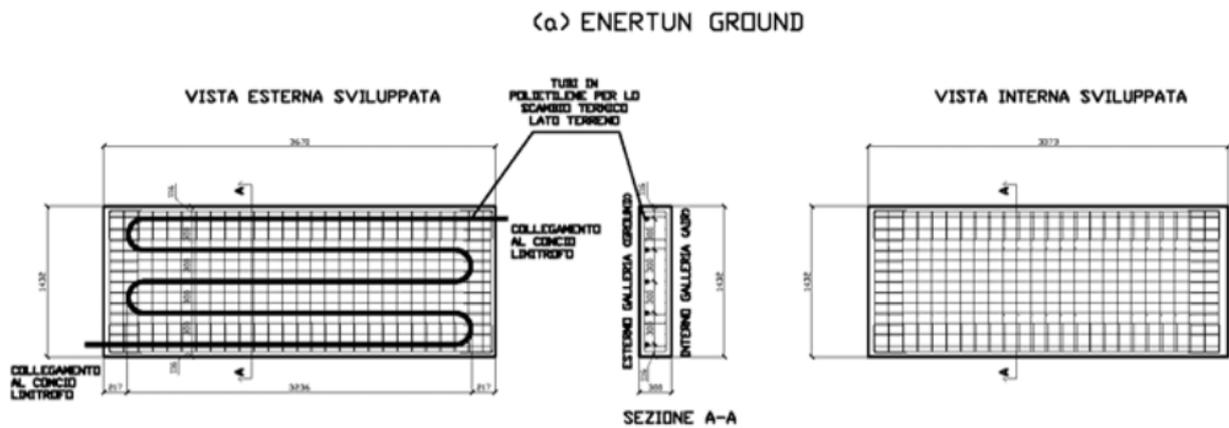


Figura 32. Dettaglio della rete di tubi nel concio modulare in configurazione ground

(<https://www.stradeautostrade.it/gallerie-e-tunnelling/conci-energetici-per-il-rivestimento-delle-gallerie/>)

- Esempi di possibili applicazioni

Il rivestimento a conci prefabbricati ENERTUN può essere utilizzato, nella configurazione GROUND, per il teleriscaldamento e il raffreddamento in aree urbane: in particolare, le gallerie nelle aree urbane offrono un grande potenziale per lo sfruttamento geotermico grazie alla presenza di consumatori nelle immediate vicinanze. Questi tunnel finiranno per essere efficacemente integrati nei sistemi di teleriscaldamento (“*district heating systems*”), poiché si svilupperanno per molti chilometri sotto aree che sono densamente urbanizzate. Se l’attivazione energetica delle gallerie è considerata in una fase iniziale della pianificazione delle aree urbane e nella progettazione delle gallerie, un tale sistema è relativamente facile da integrare nel processo di progettazione, mediante l’uso di simulazioni numeriche che imporranno le opportune condizioni al contorno.

Nelle *gallerie “calde”*, l’attivazione termica del rivestimento può essere adottata per il raffreddamento, sfruttando il calore prodotto internamente (da treni o veicoli in rapido movimento) o il calore del terreno circostante (mediante configurazione AIR). ENERTUN AIR può anche essere adottata nelle *gallerie profonde*, dove il gradiente geotermico del terreno può far sì che la temperatura dell’aria interna aumenti oltre i limiti accettabili: in questi casi, si punterà ad ottenere un risparmio sui costi di ventilazione forzata e raffreddamento. Due esempi di potenziali applicazioni di energia potrebbero essere:

1. Tunnel superficiali (“shallow tunnels”): si può citare nuovamente il caso del tunnel urbano ENERTUN installato nel 2018 e di cui sono stati attivati 2 anelli (per un totale di 12 conci). Si è già descritta l’applicazione e le condizioni nella sezione precedente (vedi 2.3.3), per cui si andranno a mostrare solo i risultati. La realizzazione della linea 1 della metropolitana di Torino ha costituito una grande innovazione per il sistema dei trasporti della città (la linea è entrata in funzione prima delle olimpiadi invernali di Torino 2006). Tra il 2006 ed il 2011 è stato realizzato un primo prolungamento, per consentire il collegamento tra le stazioni di Porta Nuova e

Lingotto, che ha costituito una buona opportunità per testare il funzionamento della tecnologia ENERTUN nel sottosuolo di Torino. La lunghezza totale della linea attualmente in servizio è di 13.4 km con 21 stazioni e il nuovo prolungamento sud (1.9 km con 2 stazioni), ormai concluso, collega la stazione Lingotto a piazza Bengasi. La galleria è realizzata in prossimità del nuovo grattacielo di 220 m di altezza dove trovano sede gli uffici della Regione Piemonte (vedi Figura 33) e l'attivazione termica del rivestimento della tunnel (che può avvenire per una lunghezza di 1350 m) potrà consentire di fornire energia termica alla nuova torre.

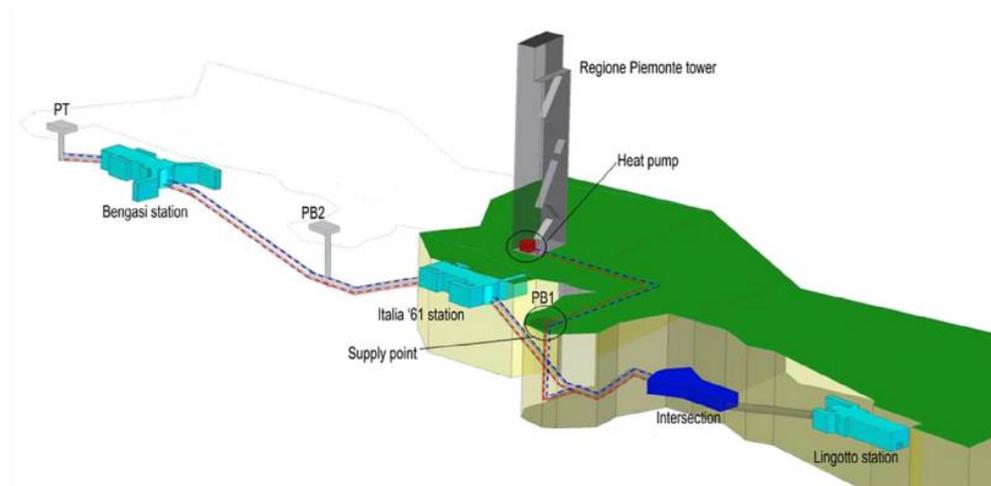


Figura 33. Vista della galleria nell'estensione Sud della Linea 1 della metropolitana di Torino e dell'impianto geotermico proposto connesso alla torre della Regione Piemonte (Barla e Di Donna, 2015)

Dai dati disponibili dalle indagini geotecniche e dalle analisi numeriche eseguite in passato, è stato derivato un modello geotecnico per le condizioni del sottosuolo alla profondità rilevante per lo scavo (Barla & Barla, 2012; Bottino & Civita, 1986). I parametri idraulici e termici dell'acquifero erano noti anche da prove di pompaggio in situ e da dati di monitoraggio effettuato in un'area della città non lontano dalla linea metropolitana considerata (Barla et al., 2015). Le analisi agli elementi finiti TH sono state eseguite per quantificare il potenziale di scambio di calore e nella Tabella 1 vengono mostrati i risultati in termini di potenza scambiabile.

Tabella 1. Quantificazione della potenza termica scambiabile dalle analisi numeriche (Barla e Di Donna, 2018)

Extracted/injected heat in winter and summer.

Season	Total extracted/injected power, Q [kW]	Extracted/injected power per squared meter, Q [W/m ²]	Extracted/injected power per meter of tunnel, Q [W/m]
Winter	1.67	52.76	1193.42
Summer	2.34	73.87	1670.81

L'attivazione termica del rivestimento posto nell'estensione sud del tunnel della Metro Torino si dimostra più favorevole rispetto ad altri casi di studio (Frodl et al., 2010) e ciò è dovuto in maniera preponderante alla presenza di una significativa velocità del flusso dell'acqua di falda agente perpendicolarmente all'asse della galleria, che permette una continua ricarica termica

del terreno, migliorando significativamente l'efficienza del sistema in termini di estrazione e iniezione di calore. Grazie a queste condizioni mostratesi molto favorevoli, il tunnel energetico permetterebbe di scambiare tra 53 e 74 W/m² rispettivamente in inverno e estate. Queste cifre sono in grado di coprire il fabbisogno energetico fino a 1,67 kW in modalità di riscaldamento e 2,34 kW in modalità di raffreddamento, considerando la totale lunghezza dell'infrastruttura (stime numeriche che sarebbero in grado di soddisfare la domanda di riscaldamento e raffreddamento della nuova torre). Nel terreno circostante vi è una variazione al limite di 5 °C della temperatura del flusso di falda a 10 metri di distanza dal contorno del tunnel, del tutto recuperata dopo un ciclo annuale.

1.1 Estrazione e iniezione di calore

Il calore Q (espresso in W) estratto in inverno e immesso in estate può essere calcolato, nota la differenza tra la temperatura di ingresso (imposta) e di uscita (risultante dalla simulazione numerica) del circuito di tubi, con:

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

dove m è la portata di massa (in kg/s) e c_w la capacità termica del fluido. Le temperature di ingresso T_{wi} e di uscita T_{wo} (ottimizzate per una velocità del fluido di 0,4 m/s) sono presentate in Figura 34, per le condizioni invernali ed estive.

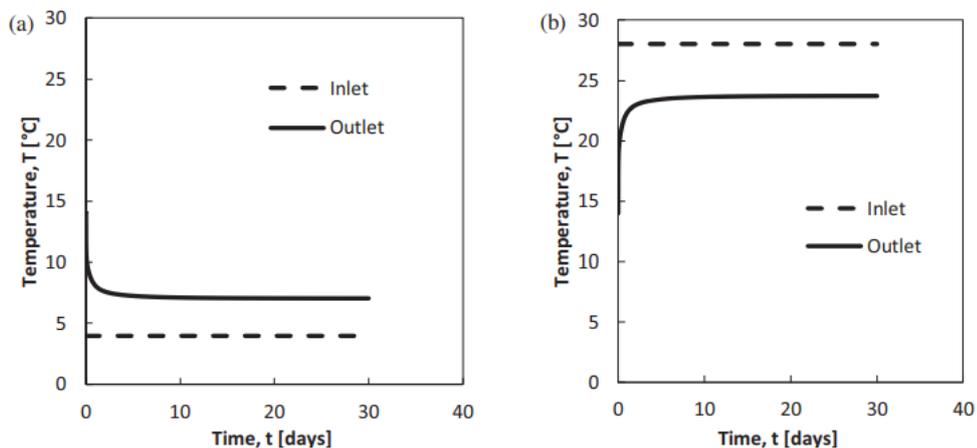


Figura 34. T imposta di ingresso e T d'uscita ottenuta dall'analisi in condizioni invernali (a) e estive (b), (Barla e Di Donna, 2015)

2. Tunnel profondi ("deep tunnels"): per il raffreddamento di queste strutture è stato preso in considerazione il tunnel di base della nuova linea ferroviaria Torino-Lione. La Figura 35 sottostante mostra il profilo longitudinale previsto in termini di temperatura. La tecnologia relativamente economica ipotizzata può essere implementata al fine di evitare una ventilazione forzata, dove la temperatura naturale del suolo dovrebbe essere superiore al limite accettabile

(32 °C), che si sviluppa per diversi chilometri. Per testare l'efficienza del sistema si è, preliminarmente, adottata la modellazione agli elementi finiti TH per la sezione trasversale indicata nella Figura 35: qui il sistema di tubazioni è stato installato all'intradosso del tunnel adottando la configurazione AIR; nella Figura 36, invece, sono riportati i risultati restituiti in termini di temperatura all'interno del tunnel dopo l'applicazione del sistema di raffreddamento geotermico.

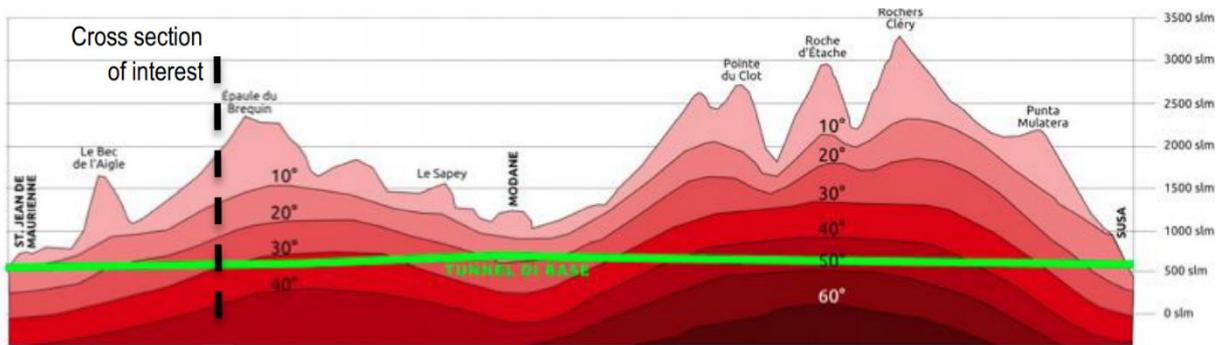


Figura 35. Temperatura predetta a varie profondità per il tunnel di base della Torino-Lione (Barla e Di Donna, 2018)

Il sistema è stato considerato attivo in cicli per migliorare i vantaggi in termini di costi: dopo l'attivazione del primo ciclo, si è spento il sistema e lo si è riattivato dopo un certo tempo, considerando intervalli che permettessero di mantenere la temperatura tra i 25 e i 30 °C.

In confronto ad un sistema standard di ventilazione, in un'analisi preliminare, l'attivazione termica del rivestimento del tunnel consentirebbe un risparmio di costi tra i 10 k€/ (km·anno)⁻¹ e 20 k€/ (km·anno)⁻¹. Il sistema permetterebbe, inoltre, lo sfruttamento termico e il calore estratto potrebbe essere fornito a ipotetici utenti presenti nelle vicinanze.

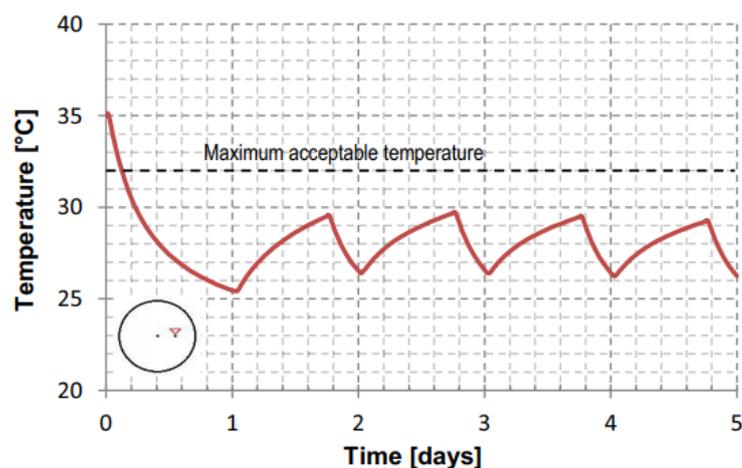


Figura 36. Andamento della temperatura nel tunnel durante i 4 cicli on&off di attivazione del rivestimento (Barla e Di Donna, 2018)

2.5 Influenza della temperatura del terreno nella fase preliminare di design

Il confronto tra la temperatura del terreno in condizioni indisturbate e la temperatura del fluido termovettore che percorre le serpentine rende quest'ultimo un aspetto critico nella fase preliminare di progettazione, poiché influenza la portata del fluido e, quindi, il dimensionamento di ogni singola parte che compone l'impianto geotermico.

Una bassa differenza tra le due temperature permette elevate prestazioni della pompa di calore e ridotti consumi energetici del sistema, ma impone dimensioni rilevanti del sistema di scambio termico con il sottosuolo, rendendo le operazioni di realizzazione del sistema eccessivamente onerose. Al contrario, una grande differenza tra la temperatura del fluido in circolo nelle tubazioni e quella del terreno in condizioni indisturbate consente ovviamente di ridurre le dimensioni del sistema di scambio termico rendendo le operazioni di realizzazione più economiche, ma comporta maggiori influenze sullo stato termico del terreno circostante e generalmente basse prestazioni delle pompe di calore, aumentando i consumi energetici del sistema (Barla e Di Donna, 2016).

Il corretto bilanciamento tra i vari fattori che influenzano la scelta (dimensioni del sistema e prestazioni delle pompe di calore) si ottiene mantenendo entro certi range la differenza della temperatura del fluido uscente con quella del terreno in condizioni indisturbato (Capozza et al., 2012):

$$|T_{wo} - T_g| = 6 \div 11^\circ C, \text{ nel caso di riscaldamento}$$

$$|T_{wo} - T_g| = 11 \div 17^\circ C, \text{ nel caso di raffreddamento}$$

Dove T_g si riferisce alla temperatura del terreno indisturbato, mentre T_{wo} indica la temperatura del fluido uscente dai tubi scambiatori. Il salto termico tra il fluido termovettore all'interno dello scambiatore di calore a terreno deve essere studiato verificando che la portata di fluido che percorre le tubazioni sia tale da garantire che il regime di moto sia di tipo non laminare all'interno degli stessi (numero di Reynolds maggiore di 2300) e che la velocità del fluido stesso non determini eccessive perdite di carico e quindi comporti l'adozione di un sistema di pompaggio eccessivamente energivoro. Questo requisito si raggiunge se ci si mantiene in un range di:

$$|T_{wo} - T_{wi}| = 3 \div 5^\circ C$$

Con T_{wi} pari alla temperatura del fluido entrante.

Questi intervalli rappresentano una base a partire dalla quale si può progettare l'impianto sia dal punto di vista idraulico che geotermico e scegliere la più appropriata pompa di calore.

2.6 Influenza del flusso di falda nello scambio di calore in fase preliminare di design

Oltre alla temperatura del terreno, un altro fattore preponderante nello scambio di calore è, se presente, il flusso di falda. Barla e Di Donna (2016) hanno condotto analisi parametriche per studiare la sua influenza nello scambio di calore, assieme alla conducibilità termica e alla temperatura del terreno. I risultati delle simulazioni si sono, inoltre, trovati in accordo con i risultati sperimentali disponibili in letteratura (Franzius & Pralle, 2011; Lee et al., 2012). Sono stati sviluppati dei grafici per poter fare una prima stima della potenziale energia sfruttabile, in relazione a diverse condizioni del sito e per il caso sia estivo che invernale (Figura 37).

In assenza di flusso di falda, quando lo scambio di calore avviene soprattutto per conduzione, è la conducibilità termica a giocare il ruolo primario tanto che il calore scambiato, se si passa da 0,9 e 3,9 W/(mK), raggiunge più del doppio del suo valore di partenza in entrambi i casi estivo e invernale.

Quando, invece, è presente un flusso di falda, lo scambio termico è il risultato di una combinazione di conduzione e convezione, e la velocità del flusso assume il ruolo più influente nel fenomeno. A titolo d'esempio, con un aumento da 0 a 2 m/d di velocità, il calore scambiato sortisce un aumento da 3 a 8 volte maggiore. Se si è in presenza di flussi di elevata intensità, comunque, bisognerebbe tenere in conto di fenomeni di inquinamento termico.

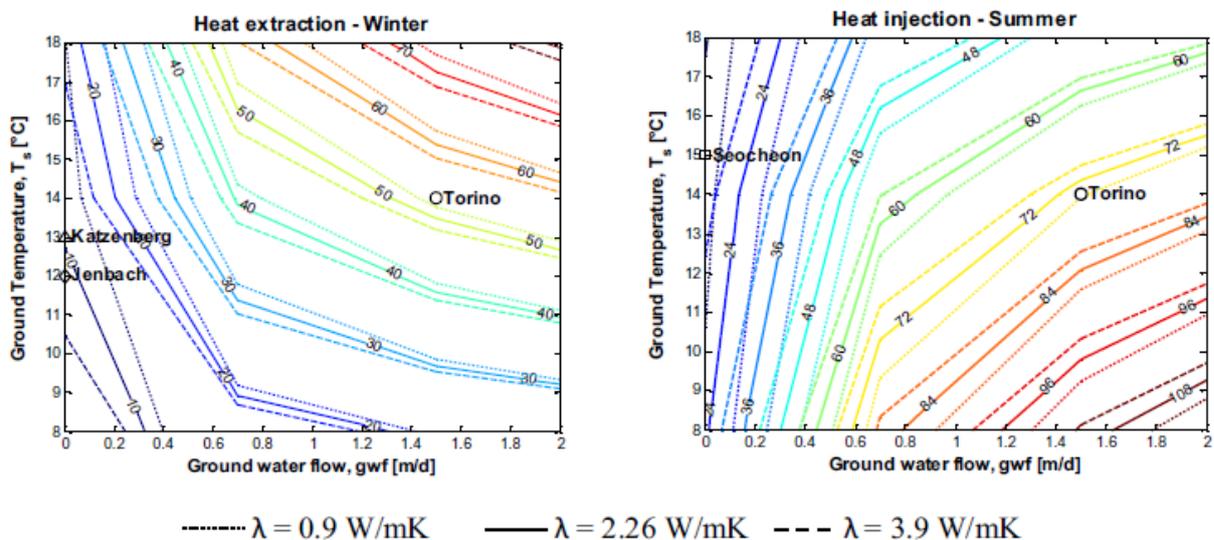


Figura 37. Grafici di design per la stima del calore estratto e immesso (in W/mq) nel caso estivo e invernale, (Barla e Di Donna, 2016)

Nuovi studi sono stati svolti per indagare il ruolo svolto dall'inclinazione del flusso di falda (grazie ai dati sperimentali raccolti durante una campagna lungo l'estensione Sud della ML1 di Torino del 2017-

2018) che hanno portato allo sviluppo di una nuova serie di grafici per la progettazione e valutazione dell'energia sfruttabile (Barla e Insana A., 2020). Nonostante siano state ricavate per il caso specifico del sito di Torino, costituiscono uno strumento applicabile alla maggioranza dei tunnel in ambiente urbano e molto utile per i progettisti interessati a capire se sia o meno conveniente investire in uno studio di fattibilità per l'attivazione termica di un tunnel.

In Figura 38 sono mostrate le situazioni in cui la direzione di falda è o obliqua o perpendicolare all'asse della galleria per il caso sia invernale che estivo, nei quali il flusso termico in W/m^2 è indicato attraverso i diversi range di colori, in base alla temperatura del terreno, alla sua conducibilità termica e alla velocità di flusso di falda. Indipendentemente dall'obliquità del flusso, sono le elevate velocità di flusso e i valori maggiori di conducibilità termica del terreno a garantire i migliori risultati in termini di potenziale di energia sfruttabile, poiché permettono al terreno di ricaricarsi dal punto di vista termico e tornare il prima possibile alle sue condizioni indisturbate. Ovviamente influisce anche il fatto di avere una più alta temperatura del terreno d'inverno e più bassa d'estate. Nel caso di totale perpendicolarità di flusso, la performance energetica si aggira in un intervallo di 10 -110 W/m^2 per il caso estivo e di 10 - 95 W/m^2 per il caso invernale.

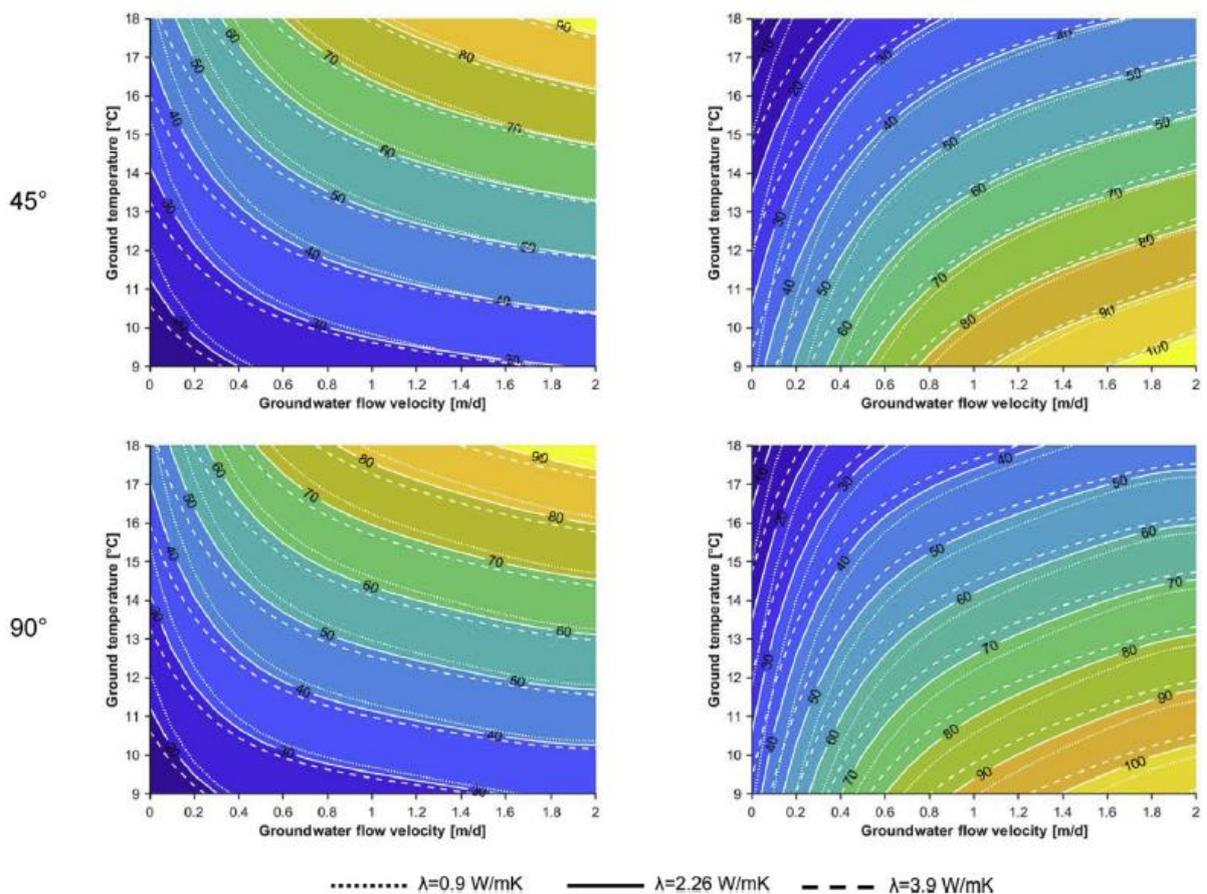


Figura 38. Grafici di progettazione del potenziale geotermico in W/mq (caso invernale a sinistra, estivo a destra) per una direzione di flusso di falda perpendicolare e di 45° (Barla e Insana, 2020)

Si può notare che da 45° a 90° di inclinazione non si ha un grande miglioramento della performance energetica, che invece avviene nel passaggio da 0° a 45° di inclinazione: se ne può concludere che il potenziale geotermico, dunque, non cresce linearmente con l'angolo di inclinazione.

2.7 Influenza dell'ambiente interno sulla performance dei tunnel energetici

Quando si valuta il potenziale geotermico di un tunnel energetico, è necessario intraprendere una valutazione iniziale non solo delle condizioni del terreno, ma anche dell'ambiente della galleria e delle proprietà termiche del rivestimento in calcestruzzo.

L'efficienza termica di un tunnel energetico è quindi fortemente dipendente dalle condizioni del terreno che lo circonda, come anche dalla temperatura dell'aria al suo interno. Soprattutto va indagato lo scambio termico con l'aria, la quale è più suscettibile a variazioni soprattutto a causa delle attività che avvengono all'interno del tunnel (traffico dei veicoli, possibili lavori ecc. portano ad un aumento della temperatura dal suo valore iniziale) e che portano ad un'alterazione del flusso termico.

Non bisogna dimenticare nemmeno il materiale di cui è costituito il rivestimento che, come detto in precedenza, agisce a suo volta come scambiatore di calore con le serpentine in esso annegate. Sono state effettuate negli ultimi anni una serie di simulazioni numeriche per opera di diversi autori (Zhang et al., 2017) per valutare gli effetti dell'ambiente interno al tunnel, mostrando come lo scambio termico tra i tubi scambiatori e il terreno venga notevolmente enfatizzato dalla ventilazione interna al tunnel.

Anche Ma et al. (2021) si sono occupati di approfondire la relazione tra le condizioni ambientali e la velocità con cui il calore è trasmesso tra gli elementi del circuito. Innanzitutto per quantificare l'efficienza termica del tunnel energetico e studiare gli effetti dovuti all'ambiente circostante hanno proposto e comparato due diversi approcci numerici, elaborando diagrammi di progettazione (in modalità di raffreddamento e riscaldamento) per la stima dell'efficienza termica media e distinguendo i contributi dovuti ai diversi componenti della geo-struttura energetica, come anche il contributo del rivestimento in calcestruzzo, anche lui agente assieme alle sue caratteristiche termiche.

Dei quattro meccanismi che contribuiscono allo scambio di calore nel tunnel energetico, situato sotto falda (trasferimento di calore per convezione e conduzione nel terreno circostante saturo, per conduzione nel rivestimento a conci, per convezione tra il fluido termovettore e le serpentine, per convezione tra l'aria interna e il rivestimento in calcestruzzo) si pone l'attenzione sull'ultimo, per il quale l'equazione di scambio termico può essere espressa come:

$$q^T = h_t(T_l - T_a)$$

Dove:

- h_t (W/m²K) pari al coefficiente di trasferimento di calore per convezione, legato alla velocità del flusso dell'aria interna all'interfaccia e alla scabrezza della superficie del rivestimento. La sua influenza è data dalle condizioni interne di ventilazione e traffico dei mezzi;
- T_l , T_a (K) pari alle temperature sulla superficie del rivestimento e dell'aria interna rispettivamente. Il valore della temperatura dell'aria interna sarà quello soggetto ad oscillazioni stagionali (Figura 40);
- q^T (W/ m²) è la componente del flusso termico normale all'interfaccia.

Per visualizzare come e dove agiscono, nel complesso, i quattro meccanismi sopracitati (convezione e conduzione) per lo scambio di calore nel tunnel energetico ed attorno ad esso, si riporta in Figura 39 lo schema fornito da Rotta Loria al '2nd International Conference on Energy Geotechnics (ICEGT 2020)'.

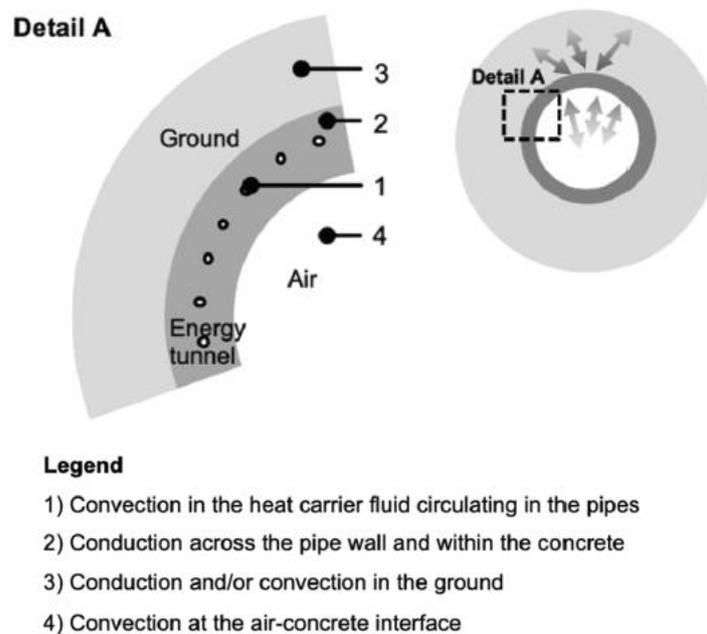


Figura 39. Possibili meccanismi di scambio di calore in un tunnel energetico sotterraneo (Rotta Loria, 2020)

2.7.1 Risultati di Analisi Numeriche sulla performance dei tunnel energetici e conclusioni

Le analisi numeriche condotte da Ma et al. (2021) per valutare la performance termica dei conchi energetici nei tunnel energetici sono state effettuate su di un modello la cui geometria e condizioni geologiche erano le stesse della sezione della Linea 1 della metropolitana di Torino. Grazie ai risultati estrapolati, si è potuto capire meglio il meccanismo di trasmissione di calore di una galleria energetica

al variare delle condizioni ambientali al suo interno. Si è inoltre considerato il terreno circostante come del tutto sommerso da falda e, di conseguenza, saturo.

Per simulare le condizioni di maggiore consumo di energia e flusso termico si sono presi i valori di temperatura misurata in inverno (dicembre-febbraio) ed estate (giugno-agosto), come mostrato in Figura 40. E due approcci numerici sono stati introdotti e validati per calcolare l'efficienza di scambio termico del modello: il primo (più veloce), denominato approccio 'locale', ha tenuto in considerazione uno scambio di calore nelle sole zone concentrate attorno ai tubi scambiatori (modellati mediante buchi inseriti nella mesh del rivestimento), il secondo (più lento), denominato 'globale', ha considerato il gradiente di temperatura e le proprietà termiche di ogni zona del dominio. È stato, quindi, il secondo approccio globale l'unico in grado di considerare il calore scambiato per ogni singola componente e di distinguere separatamente i contributi di scambio termico associati alla conduzione e convezione.

I due aspetti fondamentali, come mostrato dall'equazione scritta precedentemente dello scambio termico per convezione, che più influenzano il flusso termico all'interfaccia tra il rivestimento prefabbricato e l'ambiente interno sono ovviamente il valore T_a dell'aria interna e il coefficiente di trasferimento del calore; un ruolo non marginale però è anche assunto dal rivestimento stesso, o meglio dal materiale calcestruzzo e le sue proprietà termiche.

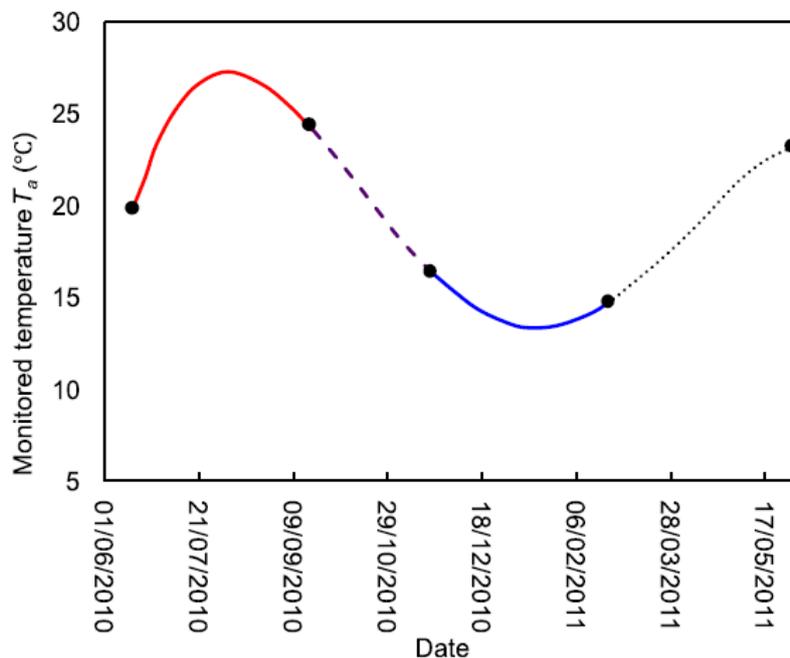


Figura 40. Oscillazione stagionale della temperatura nel tunnel (Ma et al., 2021)

Essendo il terreno circostante alla geo-struttura energetica saturo, non si è tenuto in conto di un flusso idraulico negli strati porosi; per il coefficiente h_t si è assunto un range tra 0-25 W/m²K, mentre la T_a si è fatta variare a partire dal suo valore iniziale meno tre gradi ($T_0 - 3^\circ\text{C}$) incrementandola di 1°C fino

ad avere ($T_0 + 3^\circ C$). Il range che la è andata a coprire durante il periodo di studio, per entrambe le modalità, è mostrato in Figura 41.

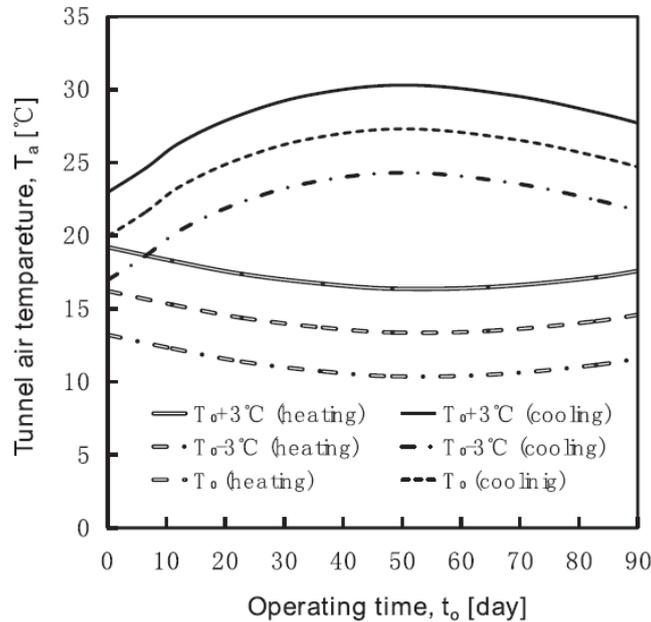


Figura 41. Range di variazione dell'aria interna al tunnel durante le simulazioni numeriche (Ma et al., 2021)

Si è potuto valutare che le condizioni ambientali interne del tunnel giocano un ruolo cruciale nelle prestazioni termiche della galleria energetica e la variazione media della potenza termica è sicuramente dipendente dalla differenza di temperatura tra l'aria del tunnel T_a e quella del fluido termovettore circolante nei tubi T_f (Figura 42).

D'estate la potenza termica assume valori più grandi se si parte da una temperatura dell'aria interna più bassa, perché cresce la differenza tra quest'ultima e quella del fluido circolante nelle serpentine; nella stagione invernale, in modo specchiato, la potenza termica media verrà incrementata per valori iniziali dell'aria interna del tunnel energetico più alti (così da aumentare la differenza di temperatura $T_f - T_a$). Sicuramente, in entrambi i casi ('cooling/heating mode') si deduce che al crescere del coefficiente di scambio termico h_t , cresce il valore della potenza termica media.

In Figura 43, invece, si sono indagati gli andamenti dell'efficienza termica con la differenza di temperatura tra l'aria interna e il fluido termovettore: si è potuta affermare l'esistenza di una relazione non lineare tra il coefficiente di scambio termico h_t e la potenza termica e una che diviene lineare tra l'efficienza termica e la differenza di temperatura tra l'aria del tunnel e il fluido circolante.

Per una prima stima dell'efficienza termica di una galleria energetica sono stati elaborati dei grafici di pre-dimensionamento; questi diagrammi sono validi per quei tunnel che presentano differenze di temperatura e condizioni ambientali simili al caso trattato nel modello delle simulazioni numeriche.

2 - Energia geotermica

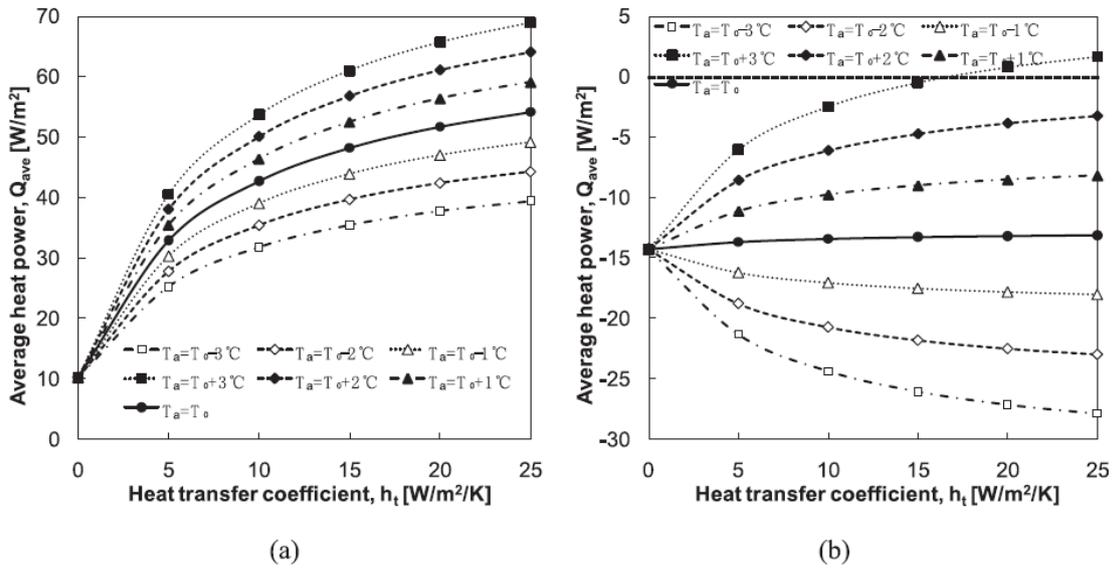


Figura 42. Variazione del coefficiente di scambio termico sulla potenza termica media: a) stagione invernale (heating), b) stagione estiva (cooling) (Ma et al., 2021)

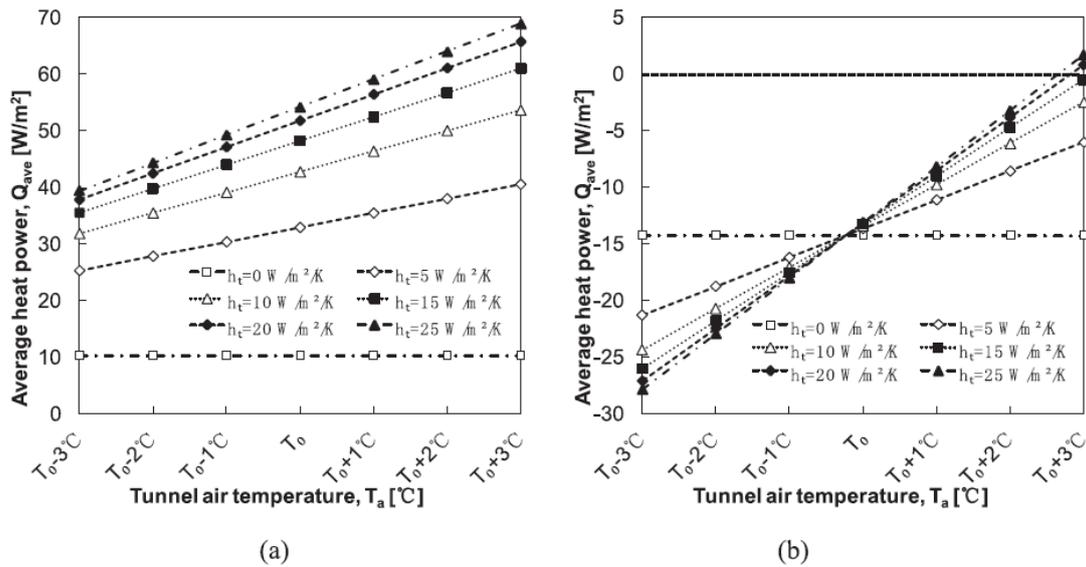


Figura 43. Potenza termica media al variare della temperatura interna del tunnel: a) stagione invernale (heating), b) stagione estiva (cooling) (Ma et al., 2021)

Come si vede in Figura 44, i grafici restituiscono zone di colore diverso che rappresentano i range di potenza termica media in W/m² al variare delle condizioni ambientali, ovvero temperatura interna dell'aria e coefficiente di scambio termico. Non si tiene in considerazione la velocità dell'acqua di falda presente nel terreno attorno al rivestimento.

Le condizioni interne dell'ambiente della galleria non solo influenzano lo scambio di calore tra l'aria interna e il sistema geotermico in opera, ma influenzano anche la quantità di energia che viene scambiata con il terreno; non hanno alcun impatto, invece, sul volume di terreno coinvolto nello scambio di

calore. L'area di terreno con la massima velocità di flusso termico (quindi la più performante) si trova di solito tra i 3,5 e i 4 m dalla superficie interna del rivestimento.

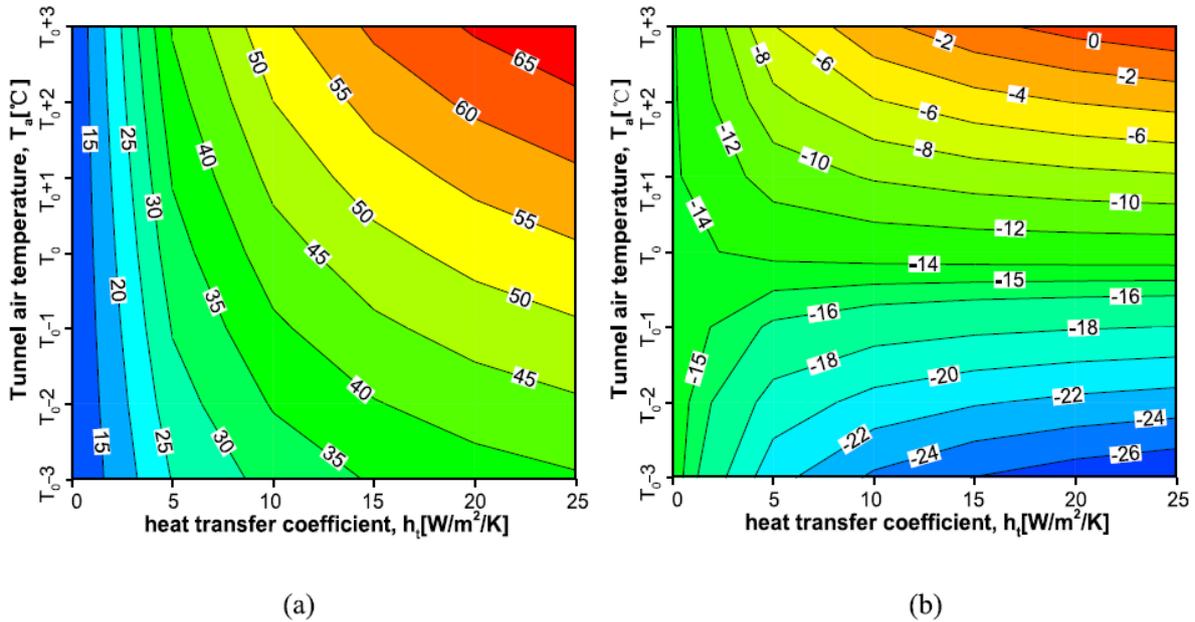


Figura 44. Grafici di pre-dimensionamento: a) stagione invernale (heating), b) stagione estiva (cooling) (Ma et al., 2021)

Nella stagione invernale, lo scambio di calore avviene principalmente con la zona interna della galleria (quindi per convezione tra l'interfaccia del rivestimento e l'aria interna). In quella estiva, la maggior parte dello scambio avviene invece nel terreno.

Si ricorda che le simulazioni numeriche erano state svolte con due tipologie di approcci, di cui una globale per poter distinguere i contributi allo scambio di calore dovuti ad ogni singolo componente del sistema geotermico. I risultati vengono mostrati nei grafici mostrati nelle Figure 45 e 46.

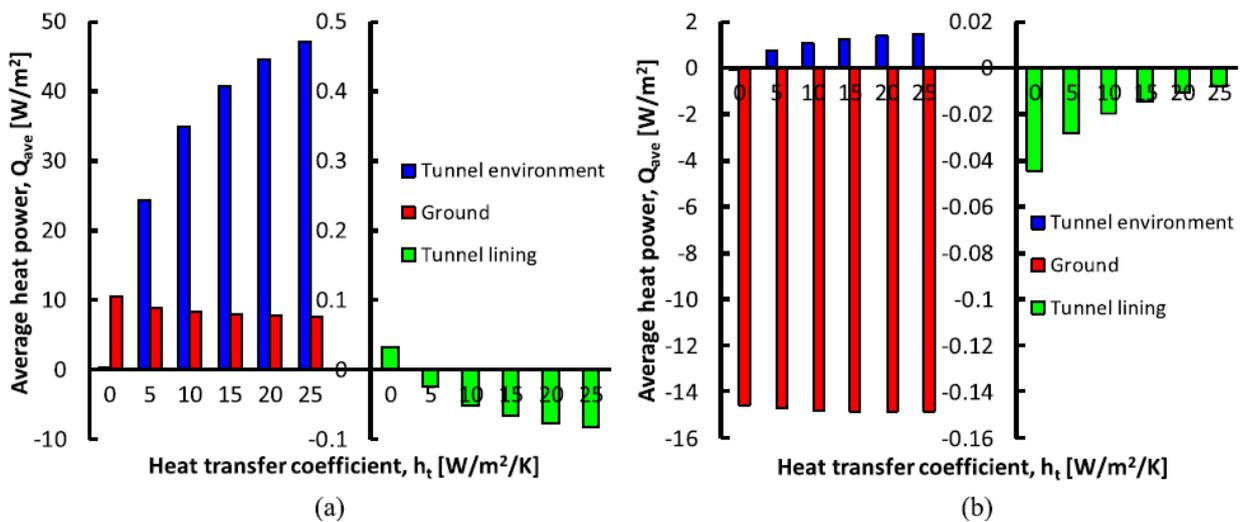


Figura 45. Contributo di ogni componente del sistema geotermico allo scambio di calore al variare del coefficiente di scambio termico: a) stagione invernale (heating), b) stagione estiva (cooling) (Ma et al., 2021)

Nella Figura 45 (a) è evidente come il calore scambiato tra l'aria dell'ambiente interno e la parete interna del rivestimento ('tunnel environment') dia il maggior contributo di scambio termico nel sistema geotermico durante la stagione invernale. I valori negativi di potenza termica nelle altre parti del rivestimento ('tunnel lining') sono dovuti al fatto che, essendo i coefficienti di scambio termico positivi, il calore viene estratto dall'ambiente interno del tunnel ('heating'), facendo crescere il valore di temperatura del rivestimento stesso.

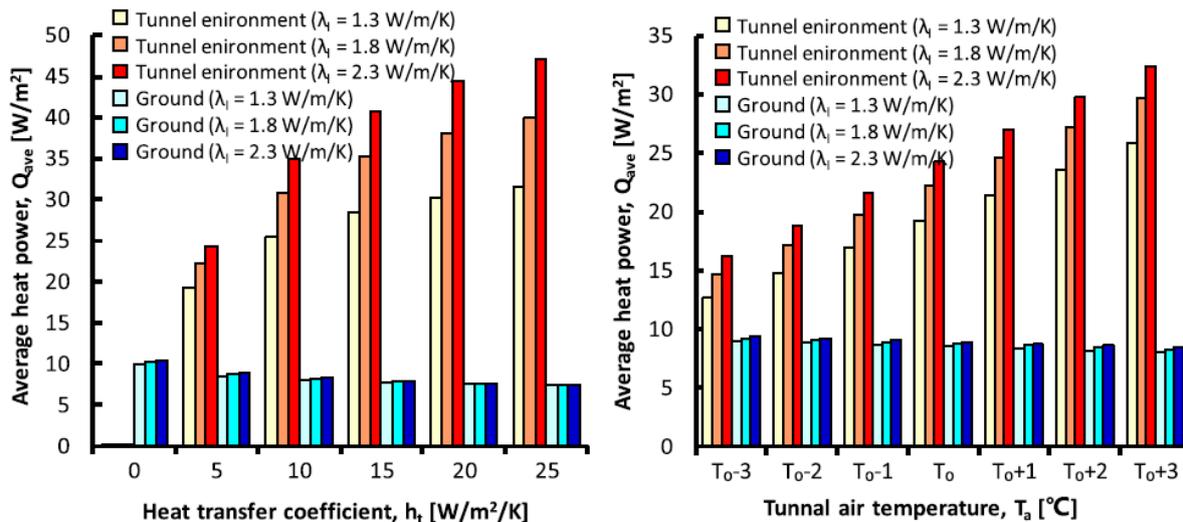


Figura 46. Contributo di ogni componente del sistema geotermico allo scambio di calore per fissati valori di conduttività termica del rivestimento contro: a) coefficiente di scambio termico, b) temperatura interna dell'aria (Ma et al., 2021)

Poiché il rivestimento è ciò che fa da tramite tra l'ambiente interno della galleria e i tubi scambiatori, il flusso di calore al confine aria interna-rivestimento sarà altamente influenzato anche dalle proprietà termiche del calcestruzzo di cui è fatto.

Per capire meglio il ruolo che gioca (o meglio che le sue proprietà termiche giocano) nella performance energetica del tunnel, ne sono stati studiati gli effetti mediante analisi parametriche. In Figura 46 viene mostrato come varia l'efficienza energetica del tunnel per ogni componente del sistema geotermico per tre distinti valori della conduttività termica del rivestimento, rispettivamente $\lambda_t = 1.3, 1.8, 2.3$ W/mK, sia in funzione del coefficiente di scambio termico (caso a), sia in funzione della temperatura dell'aria interna del tunnel (caso b).

Dato che l'influenza delle condizioni ambientali interne sull'efficienza energetica è più pronunciata durante la stagione invernale, entrambi i grafici in Figura 46 si riferiscono alla modalità di riscaldamento (e si mostrano in accordo con i risultati della Figura 45 a)): come già dedotto dai risultati in Figura 42 e 43, i grafici ribadiscono la relazione non lineare dell'efficienza energetica della galleria con l'aumento del coefficiente di trasferimento del calore e la relazione lineare, invece, della medesima efficienza energetica con l'aumento della differenza tra la temperatura dell'aria interna e del fluido termovettore.

Per quanto riguarda la conduttività termica del rivestimento, dai grafici si nota come il suo cambiamento porti un incremento o una diminuzione della velocità di scambio termico in ogni singola componente del sistema geotermico: al crescere dei valori di conduttività termica (λ_l) del rivestimento del tunnel, l'effetto delle condizioni dell'ambiente interno sulla performance energetica della geo-struttura viene notevolmente facilitato. In conclusione, durante i mesi più freddi, si può raggiungere un massimo miglioramento della performance del 40% e 21%: valori ricavati per il massimo coefficiente di scambio termico h_t e la massima temperatura interna dell'aria rispettivamente. Di conseguenza, come si era già accennato, per garantire una migliore stima degli effetti delle condizioni ambientali del tunnel sulla sua performance energetica non si possono tralasciare le proprietà termiche del materiale di cui sono fatti i conci.

Ciononostante alcuni dei risultati ricavati e di cui si è parlato per stimare il potenziale di scambio termico non possono essere ritenuti di validità generale, poiché vincolati alle caratteristiche della zona dove è installato il tunnel energetico, come anche alle condizioni di lavoro. Quindi, all'inizio della progettazione si dovrebbero eseguire studi più dettagliati riguardo tutti questi specifici aspetti.

2.7.2 Altre influenze nello scambio di calore (geometria, scabrezza, velocità del flusso d'aria interno)

Anche Peltier et al. (2019) hanno approfondito l'influenza di più fattori sull'efficienza energetica dei tunnel energetici: nello specifico hanno indagato come *diverse forme* della sezione trasversale, *velocità* del flusso d'aria interna e diverse *scabrezze* della superficie interna del rivestimento contribuiscano sul fenomeno di trasferimento di calore per convezione all'interno del tunnel, fornendo anche una relazione tra il coefficiente di scambio termico per convezione e la velocità media del flusso di aria. Quest'ultima potrebbe essere sfruttata in fase di progettazione per problemi di flusso d'aria interno non isotermico.

Nella maggior parte delle gallerie sotterranee, indipendentemente dal fatto che si considerino strutture convenzionali o energetiche, il trasferimento di calore per convezione causato dal flusso d'aria interno, avente una temperatura diversa rispetto a quella della superficie interna delle pareti del rivestimento, avviene sempre. Sotto queste condizioni, il flusso d'aria all'interno del tunnel rappresenta un problema non isotermico (ovvero il flusso mostrerà gradienti di temperatura e sarà completamente delimitato da una superficie).

Tutti i problemi non isotermici di flusso interno, che coinvolgono la circolazione di fluidi newtoniani come l'aria (cioè fluidi in cui le tensioni viscosive derivanti dal loro flusso sono linearmente proporzionali in ogni punto alla velocità di deformazione locale), sono caratterizzati dallo sviluppo dei cosiddetti strati limite di velocità e temperatura (Peltier et al.,2019).

Lo sviluppo degli strati limite porta alla creazione di due tipi di regioni nella direzione longitudinale del flusso, quindi entrante/uscente nella superficie della parete: le regioni di ingresso (termico e idrodinamiche) e le regioni di flusso termico e idrodinamico indisturbato. L'importanza di queste regioni è dovuta al fatto che queste implicano lo sviluppo delle cosiddette lunghezze d'ingresso idrodinamico e termico: queste lunghezze sono influenzate dalle caratteristiche della superficie che delimita il flusso (quindi dalla scabrezza della parete del tunnel e dal suo profilo di temperatura), dalle condizioni di flusso (ad esempio se laminare o turbolento) e dalla forma della sezione trasversale (circolare, a ferro di cavallo o cut-and-cover, adottate nelle analisi numeriche e mostrate in Figura 47) sulla quale si verifica il flusso (Peltier et al.,2019).

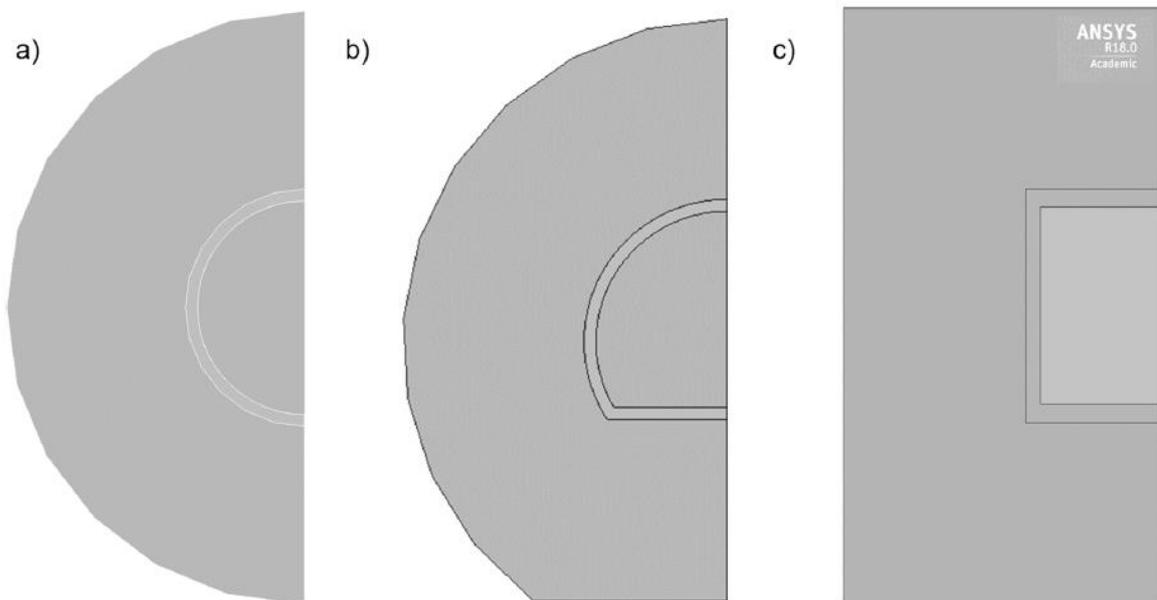


Figura 47. Forme delle sezioni adottate nelle simulazioni: a) circolare, b) a ferro di cavallo, c) Cut-and-cover (Peltier et al.,2019)

Nelle regioni d'ingresso, i campi di temperatura e velocità del fluido in movimento variano con la distanza, ma fuori da queste zone, i campi di temperatura e velocità non cambiano più in funzione della distanza.

Lo sviluppo degli strati limite termici e di velocità, come anche il significato delle regioni d'ingresso e di flusso indisturbato, sono di cruciale importanza per valutare il meccanismo di trasferimento di calore per convezione nei problemi non isotermici di flusso interno.

La ragione di ciò risiede nel fatto che il fenomeno di scambio termico per convezione, tra una superficie e un fluido in movimento, è funzione della velocità del fluido stesso (mediante il coefficiente di trasferimento di calore per convezione) e della differenza tra la temperatura della superficie e la temperatura indisturbata del fluido, secondo la relazione:

$$q_{conv} = h_c(T_s - T_{\infty})$$

Con:

- h_c pari al coefficiente di trasferimento di calore per convezione (W/m^2K);
- T_s che rappresenta la temperatura della superficie (K);
- T_∞ pari alla temperatura del fluido indisturbato (K).

La relazione specifica che lega il coefficiente h_c alla velocità del fluido sarà meglio descritta al paragrafo 4.2.2.

Pertanto, data la dipendenza dei valori dei campi di temperatura e velocità del fluido in movimento dalla distanza, in funzione dello sviluppo degli strati limite, la variazione di questi due fattori può indurre cambiamenti marcati nel processo di scambio termico per convezione.

I risultati ottenuti sono rilevanti per le applicazioni innovative dei tunnel energetici e possono aiutare nel contesto delle analisi termoidraulica e della loro progettazione. Riassumendoli:

- Le lunghezze di ingresso negli strati limite termici e idrodinamici in gallerie sotterranee, caratterizzate da un flusso d'aria in condizioni turbolente, differiscono le une dalle altre: la lunghezza d'ingresso termica è sempre maggiore di quella idrodinamica.
- La forma della sezione trasversale delle gallerie influenza lo sviluppo dello strato limite termico, mentre non influenza lo sviluppo dello strato limite di velocità; inoltre in queste simulazioni la superficie interna del rivestimento è stata assunta liscia. Le sezioni a ferro di cavallo e circolari mostravano risultati simili in termini di lunghezze d'ingresso nello strato limite termico, mentre per quella in cut-and-cover si aveva una maggiore variazione del coefficiente di trasferimento di calore per convezione lungo la direzione longitudinale del tunnel (Figura 48).

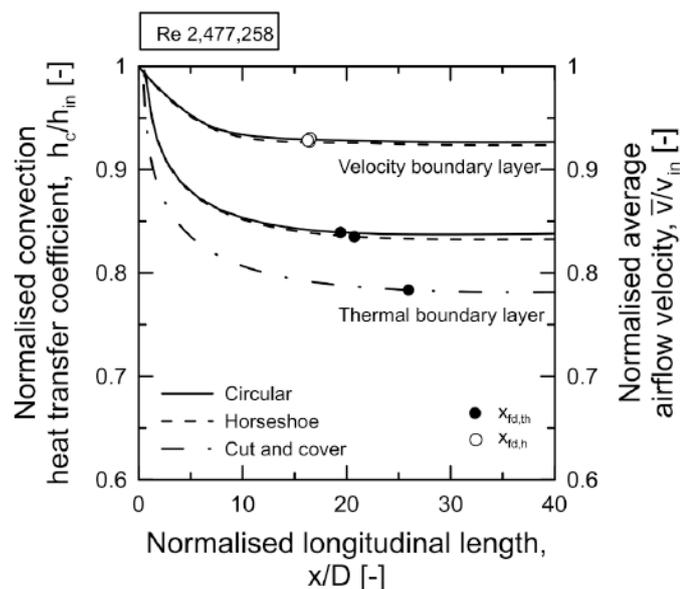


Figura 48. Sviluppo degli strati limite termici e di velocità per sezioni di 3 diverse forme (Peltier et al., 2019)

- La velocità del flusso d'aria in ingresso influenza lo sviluppo dello strato limite termico, mentre non influenza lo sviluppo dello strato limite di velocità. Per velocità di flusso più elevate, che in Figura 49 sono mostrate dai valori del numero di Reynolds (crescente con la velocità di flusso), si leggono valori maggiori del coefficiente di trasferimento di calore per convezione, senza alcun impatto degno di nota sul significato stesso di lunghezza di ingresso termico. I risultati della Figura 49, inoltre, sono stati ricavati considerando un modello per la sezione trasversale la cui forma è circolare e il cui coefficiente di scabrezza sia nullo.

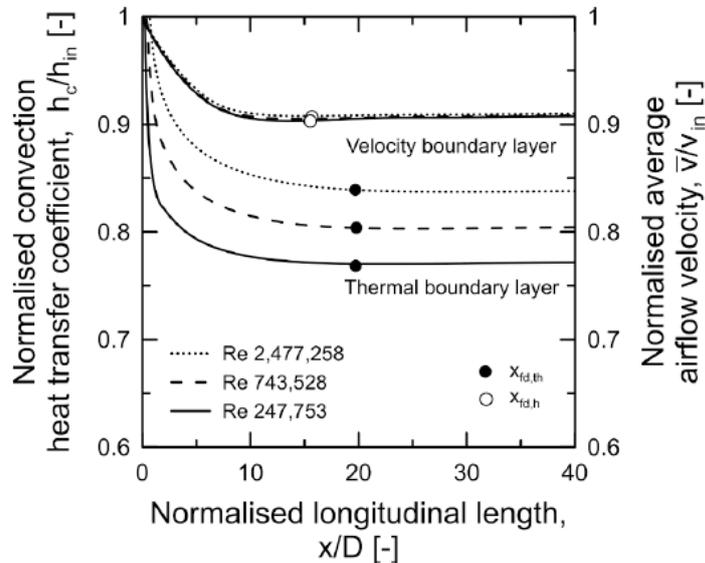


Figura 49. Sviluppo degli strati limite termici e di velocità per diversi valori del numero di Reynolds (Peltier et al., 2019)

- La rugosità della/e parete/i del tunnel influenza lo sviluppo di entrambi gli strati limite termici e di velocità: infatti le superfici ruvide tipicamente causano un accorciamento delle regioni d'ingresso in confronto alle superfici lisce. Di conseguenza, rispetto ai tunnel aventi pareti lisce, quelli le cui superfici sono più scabre saranno caratterizzati da regioni più lunghe di pieno sviluppo che presentano un coefficiente di trasferimento di calore per convezione h_c costante. L'aumento della scabrezza della parete porta anche ad avere valori più alti di questo ultimo parametro (h_c) e si potrebbe trarre vantaggio da quest'ultimo aspetto per migliorare lo sfruttamento di energia nel caso specifico dei tunnel energetici.

I risultati mostrati in Figura 50 sono stati ottenuti per superfici i cui valori di scabrezza k_s sono assunti pari a 0,2,8 e 11 mm e un tunnel di sezione circolare con un numero di Reynolds pari a 2,477,258 (ovvero $v_{in} = 5$ m/s del flusso d'aria in ingresso).

- Sono state ricavate relazioni tra il coefficiente di convezione h_c e la velocità media del flusso d'aria v_{in} , che si sono mostrate in stretto accordo con altre correlazioni identificate in letteratura per tunnel sotterranei. Suddette relazioni presentano una forte dipendenza del coefficiente di scambio termico per convezione h_c dalla scabrezza della parete che delimita il flusso interno.

In Figura 51 si riporta la relazione che sussiste tra h_c e v_{in} , ottenuta dai risultati delle simulazioni numeriche per 4 diversi valori di scabrezza k_s , e il suo confronto con i dati disponibili dalla letteratura. Questa ha rivelato come non solo il coefficiente di scambio per convezione cresca con l'aumento della velocità del flusso interno, ma anche con la scabrezza delle pareti interne del tunnel: ciò porterà anche ad un aumento della velocità di scambio termico, indipendentemente dalla modalità (raffreddamento o riscaldamento). E tutti questi aspetti potrebbero essere tenuti in considerazione per migliorare lo sfruttamento di energia nel caso di gallerie energetiche.

La leggera discrepanza con i valori identificati in letteratura (che mostrano maggiori valori del coefficiente di scambio) può essere dovuta al fatto che gli autori citati in Figura 51 avevano estrapolato i loro risultati con riferimento a problemi di flusso esterno e non andando a distinguere, nel coefficiente di scambio termico h_c , le influenze dovute al trasferimento di calore per irraggiamento: ciò potrebbe produrre una sovrastima del calore scambiato.

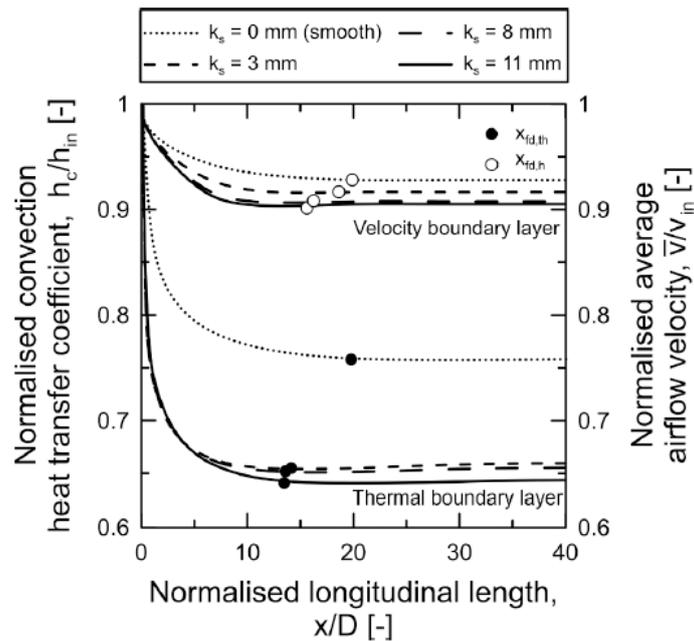


Figura 50. Sviluppo degli strati limite termici e di velocità per diversi valori di scabrezza della superficie (Peltier et al., 2019)

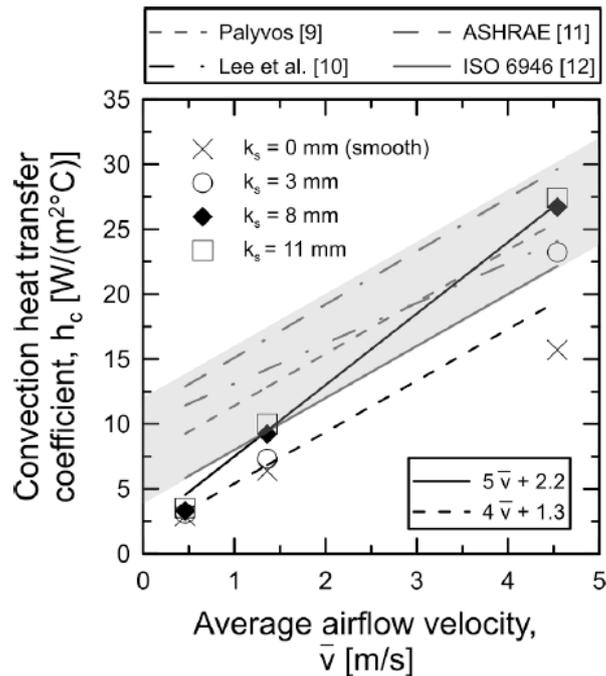


Figura 51. Relazione tra il coefficiente di scambio termico per convezione e velocità di flusso d'ingresso per diversi valori di scabrezza della superficie (Peltier, et al., 2019)

Le zone in cui sono state indagate (zona di strato limite d'ingresso o di pieno sviluppo) queste relazioni sono di poca influenza sulla relazione tra il coefficiente di scambio h_c e la velocità d'ingresso v_{in} .

Le leggere discrepanze visibili in Figura 52 sono considerate trascurabili, tanto da poter concludere che, fintanto non vi siano perturbazioni negli strati limite termici e di velocità lungo la direzione longitudinale del tunnel (ad esempio, dovuti a cambiamenti nella forma della sezione trasversale del tunnel, o nella condizioni termiche, o nella rugosità della/e parete/i interna), i valori del coefficiente di trasferimento di calore per convezione sono adatti a descrivere il fenomeno complessivo di scambio termico dovuto ai flussi d'aria interni ai tunnel sotterranei (Figura 52). In conclusione, non viene influenzata dalla zona dello strato limite nemmeno la quantità media di energia che può essere raccolta nelle gallerie energetiche.

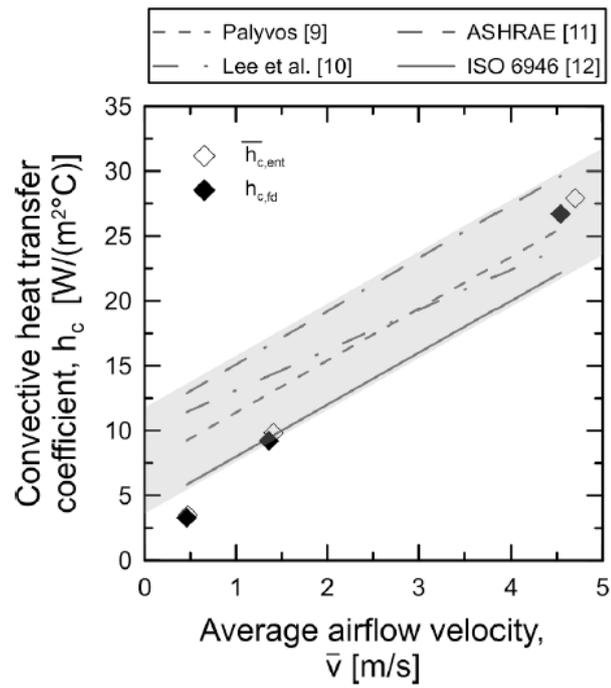


Figura 52. Relazione tra il coefficiente di scambio termico per convezione e velocità di flusso d'ingresso per strati limite d'ingresso e pieno sviluppo (Peltier et al., 2019)

3. IL CASO STUDIO DELLA GALLERIA DI BASE DELLA TORINO-LIONE

I governi italiano e francese hanno deciso di avviare la costruzione di una nuova linea ferroviaria per il collegamento Torino-Lione, parte essenziale del Corridoio Mediterraneo che collegherà Algeciras (Spagna) con Budapest (Ungheria). Il progetto consiste, innanzitutto, nella realizzazione di un tracciato idoneo al traffico merci transalpino, destinato in particolare a limitare il traffico stradale in queste aree sensibili dal punto di vista ambientale.

Il collegamento si estenderà per 270 km (Figura 54) e avrà inoltre una grande rilevanza per il trasporto dei passeggeri, poiché collegherà le reti ad alta velocità italiane e francesi riducendo pertanto i tempi di percorso tra due importanti regioni frontaliere, ovvero il Piemonte e la Savoia.

In Figura 54 sono evidenti le tre sezioni principali della nuova Torino-Lione:

- la sezione ferroviaria nazionale italiana (estremità Est) e francese (estremità Ovest);
- la sezione centrale transnazionale, che rappresenta la sezione più innovativa.

La sezione transfrontaliera della linea ferroviaria Torino-Lione si estende per 65 km tra Susa/Bussoleno in Piemonte e Saint-Jean-de-Maurienne; la sua costruzione è stata assegnata a TELT ed è cofinanziata dall'Unione europea (40%), dall'Italia (35%) e dalla Francia (25%).

L'elemento principale dell'opera è il tunnel di base del Moncenisio (Figura 53), che permette di attraversare le Alpi alla quota di pianura abbattendo tempi e costi del trasporto di beni e persone: è composto da due gallerie gemelle estese per 57,5 km (12,5 in territorio italiano e 45 in territorio francese) con una pendenza inferiore allo 0,12% e una copertura a volte maggiore di 2000 m. Il tunnel collega le stazioni internazionali di Saint-Jean-de-Maurienne e Susa, punti di connessione alle rispettive linee nazionali in Francia e in Italia ed è dotato di quattro accessi, aree di servizio ferroviario e pozzi di ventilazione.

3 - Il caso studio della galleria di base della Torino-Lione

L'opera è classificata tra le infrastrutture più importanti e complesse attualmente in costruzione nel mondo. La società Lyon Turin Ferroviare (LTF Sas), filiale di Réseau Ferré de France (RFF) e di Rete Ferroviaria Italiana (RFI), veniva designata come committente degli studi e dei lavori geognostici della sezione internazionale - tratta comune ad Italia e Francia, che comprendeva il tunnel di base del Moncenisio.

I lavori si è stimato durino 9 anni e la nuova linea dovrebbe entrare in funzione nel 2030.

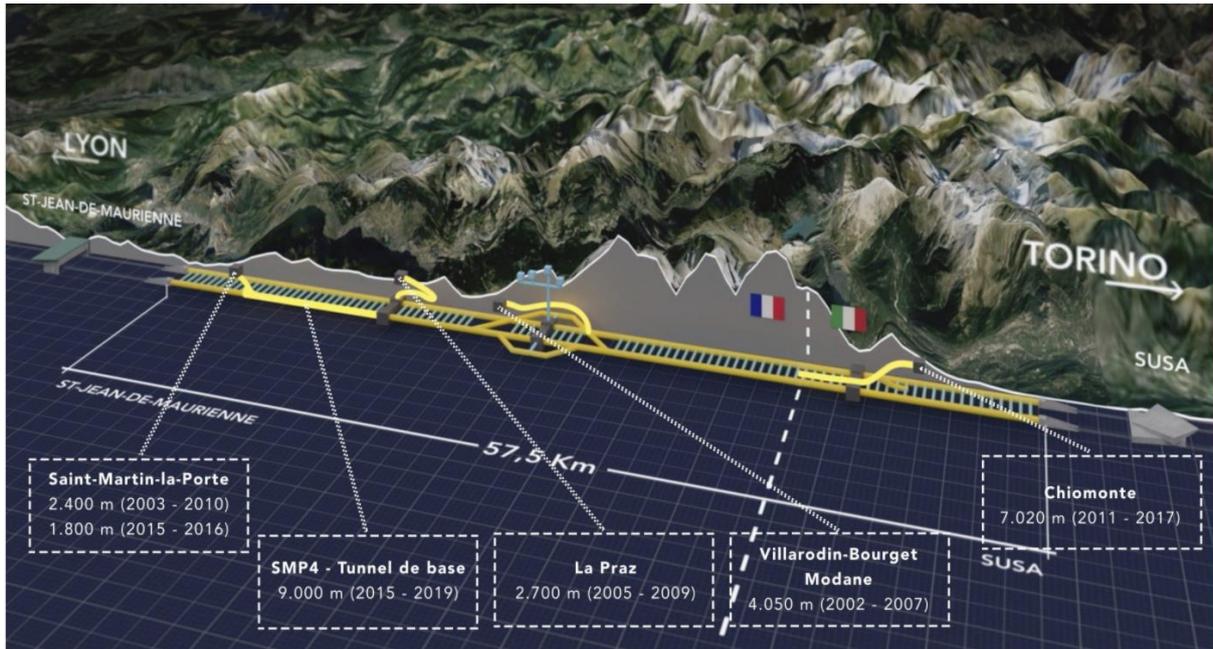


Figura 53. Inquadramento dell'infrastruttura sotterranea (<https://www.telt-sas.com/it/la-sezione-transfrontaliera/>)

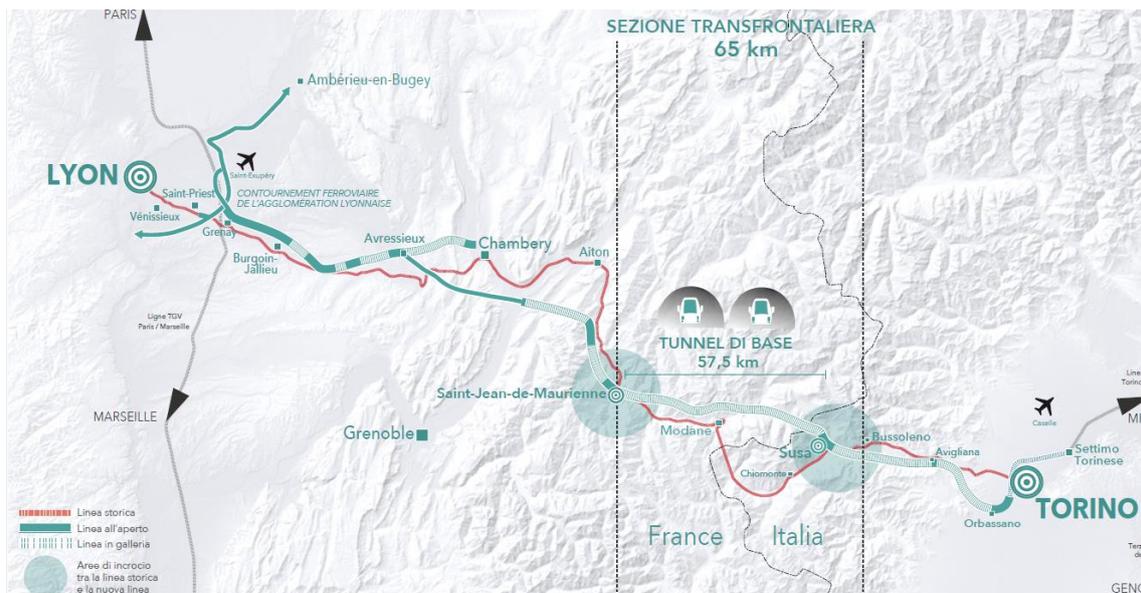


Figura 54. Inquadramento della sezione transfrontaliera nella linea ferroviaria Torino-Lione

(<https://impenia.com/en/media/news-article/impenia-wins-large-tunnelling-project-in-france-lot-3-of-the-lyon-turin-base-tunnel/>)

3.1 Caratteristiche geometriche

Il tunnel è progettato per una velocità nominale (velocità del percorso) di 250 km/h e una velocità operativa di 220 km/h. La pendenza longitudinale massima è di 12,5 ‰, che si riduce nelle zone di stazione a un massimo di 2 ‰, con la lunghezza dei binari di passaggio o di soccorso di almeno 750 m. Il carico assiale è di 25 tonnellate/asse, il sistema di azionamento elettrico è di circa 2x25 kV.

Le due gallerie a binario unico (Figura 55) hanno una distanza variabile tra 30 e 80 m, un diametro interno utilizzabile di 8,70 m e un diametro di 8,40 m. Ogni 333 m, un ramo di collegamento di apertura disponibile larga 4,30 m e alta 2,93 m, connette i marciapiedi di evacuazione delle due canne ferroviarie.

Il tunnel, le cui caratteristiche sono descritte nella Tabella 2 (dal “Progetto definitivo –Ventilazione generale del Tunnel di Base” firmato da LTF, 2013), sarà scavato utilizzando sia metodi convenzionali che meccanizzati (con TBM, “Tunnel Boring Machine”), a seconda delle condizioni geomeccaniche valutate. In Tabella 3, invece, sono riportate le caratteristiche termiche assunte per il calcestruzzo.

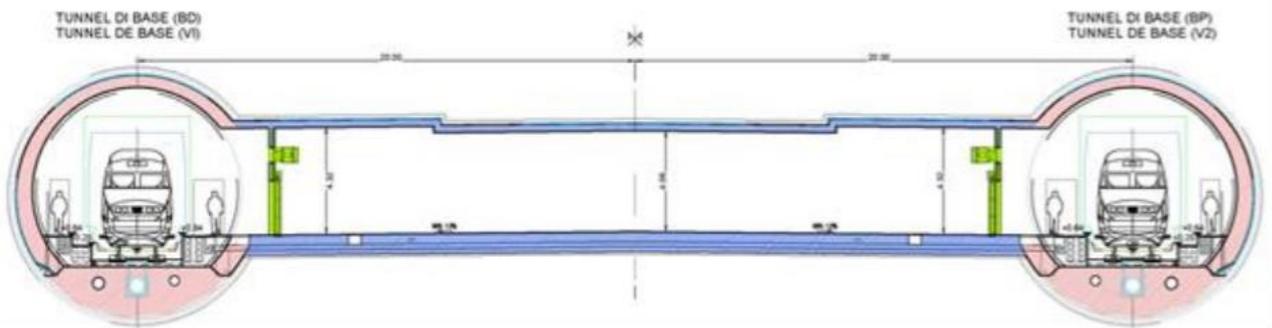


Figura 55. Tipica sezione trasversale del tunnel di base (Bufalini et al., 2017)

Tabella 2. Principali caratteristiche geometriche del tunnel di base. La pendenza positiva si riferisce al transito nel senso Ovest-Est, ovvero Francia –Italia (LTF, 2013)

Parametri del tunnel		Valore
Lunghezza		57'517 m
Sezione		43 m ²
Perimetro		26.4 m
Coefficiente di attrito		0.00625
Pendenze medie	Imbocco coperto lato Francia – St. Martin la Porte	+0.70 ‰
	St. Martin la Porte – La Praz	+0.64 ‰
	La Praz – Avrieux	+0.55 ‰
	Avrieux – Clarea	-0.85 ‰
	Clarea – Imbocco lato Italia	-1.03 ‰

Tabella 3. Proprietà termiche del calcestruzzo (LTF, 2013)

Densità (kg/m ³)	Conducibilità termica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Capacità termica (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
2'400	1.60	920

Il tunnel di base ha tre siti di sicurezza sotterranei, direttamente collegati al livello della strada dai pozzi di accesso di La Praz, Villarodin-Bourget / Modane e La Maddalena (uno schema generale del Tunnel di base con indicazione dei pozzi di a ventilazione è mostrata in Figura 56). Questi siti, in caso di difficoltà, dovranno essere punti di arresto per il treno.

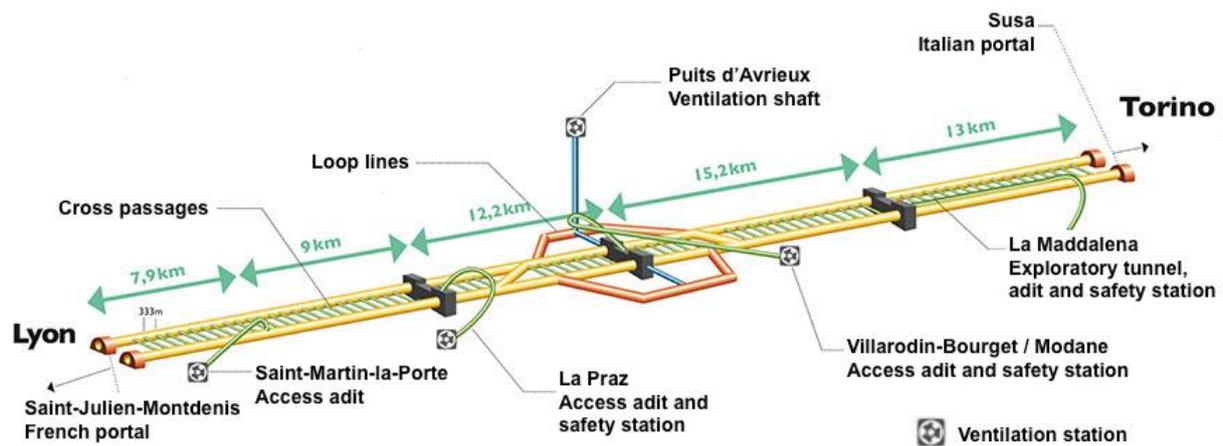


Figura 56. Schema generale dell'infrastruttura italo-francese: Tunnel di base e di by-pass Bussoleno

(https://twitter.com/Tunnel_Talk/status/1412830229756846081)

3.2 Condizioni geologiche e idrogeologiche

Per studiare le caratteristiche degli ammassi rocciosi alla profondità del futuro tunnel ferroviario, e quindi determinare il modo migliore con cui effettuare lo scavo, sono stati eseguiti 65 km di sondaggi in zone distinte, oltre a 260 km di indagini geofisiche e alcuni lavori preliminari.

3.2.1 Contesto Geologico del tunnel di Base

La galleria di base incontrerà diverse tipologie di terreno lungo il suo tracciato, tra cui terreni granulari sciolti (depositi alluvionali, depositi glaciali), formazioni di masse rocciose complesse (scisti arenacei, scisti ricchi di carbone), terreni in evoluzione (anidriti), masse rocciose ad alta resistenza (mica scistosa e gneiss) o abrasive (quarzite).

Attraversando l'asse della catena alpina, da ovest a est, il tunnel sarà sottoposto a coperture sopra i 1000 m fino a quasi 2500 m sotto il Massiccio d'Ambin e incontrerà i diversi complessi geologici di seguito elencati:

1. Zona Ultra Dauphinois (Flysch du Cheval Noir) con un conoide a St. Julien Mt. Denis;
2. Area Sub-Briançonnais (Massiccio della Croix de Tete): rocce carbonatiche e solfatiche;
3. Zona del Sub-Briançonnais Houiller: arenaria, scisti e carbone;
4. Zona interna del Briançonnais (Massiccio della Vanoise): rocce carbonatiche e principalmente silicee;
5. Zona Falda dei Gessi (Gesso): rocce carbonatiche e silicee come base dell'area zona piemontese (Zone Piemontaise Unité supérieure, Figura 57);
6. Zona Briançonnais interno (Massiccio d'Ambin, Clarea e Complesso d'Ambin): con rocce silicee prevalentemente, ma anche metamorfiche per il Massiccio d'Ambin;
7. Zona della dorsale tettonica;
8. Depositi quaternari della valle del Cenischia;
9. Area piemontese (unità di Puys-Venaus e bassa Valle di Susa-Valli di Lanzo-Mt. Orsiera): calcare.

Un modello geologico e geomeccanico di riferimento è stato sviluppato per identificare i metodi più idonei da adottare per la fase di scavo, i principali rischi geologici e le misure di mitigazione e gestione. L'attenzione è stata dedicata alle condizioni geologiche critiche come le faglie e le zone gravemente fratturate, le anomalie delle alte temperature, la presenza di minerali rigonfianti o solubili, ecc. (Bufalini et al., 2017).

Per valutare al meglio la successione del terreno lungo il percorso e per anticipare le possibili difficoltà tecniche che si potrebbero incontrare durante lo scavo, numerose campagne di ricognizione sono state effettuate dall'inizio degli anni '90: queste campagne di ricognizione, possono essere suddivise nel tempo in 4 fasi, dal 1990 al 2006 (Gabalda, 2008).

WNW

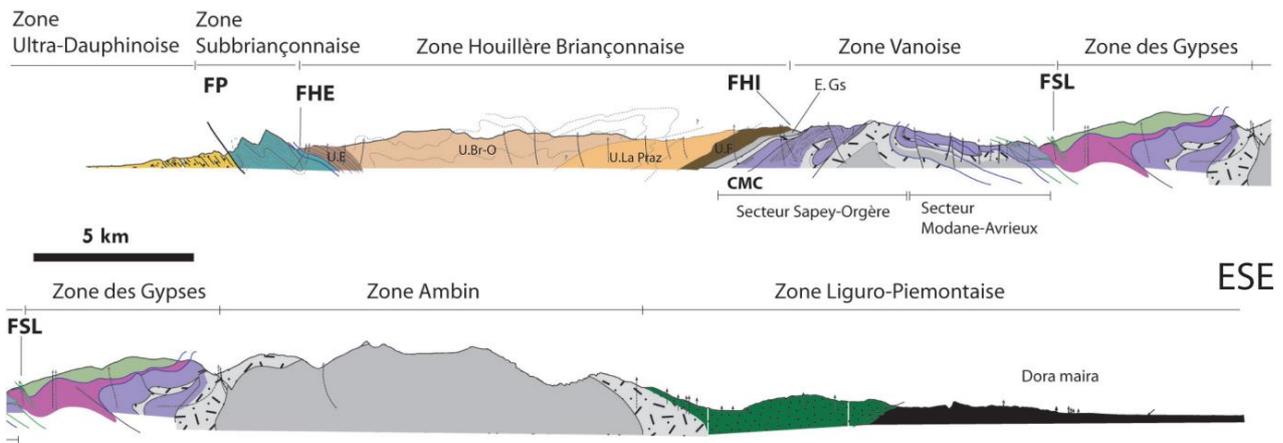


Figura 57. Sezioni geologiche semplificate del tunnel di base e legenda (Gabalda ,2008)

3.2.2 Interferenze di falda e metodologie di Scavo

Sono state eseguite indagini idrologiche per valutare l'interferenza prevista con le falde acquifere, come l'ingresso d'acqua nella galleria e i possibili impatti sulle risorse idriche, sui corsi d'acqua superficiali e sui fiumi.

Sulla base degli studi di caratterizzazione idrogeologica, le diverse litologie previste lungo il tracciato della galleria sono state suddivise in complessi idrogeologici, ciascuno caratterizzato da un comportamento idrologico omogeneo (ovvero un unico tipo di permeabilità mantenuta entro un intervallo di variazione abbastanza stretto). Il grado di permeabilità è stato assegnato agli ammassi rocciosi tenendo conto delle fratture: in altre parole, lungo le zone di faglia e le zone di intensa fratturazione, il metodo di costruzione adottato doveva essere in grado di evitare l'afflusso di acqua nella galleria. In Figura 58 sono indicate le varie metodologie di scavo adottate per ogni tratta del tunnel di base.

3 - Il caso studio della galleria di base della Torino-Lione

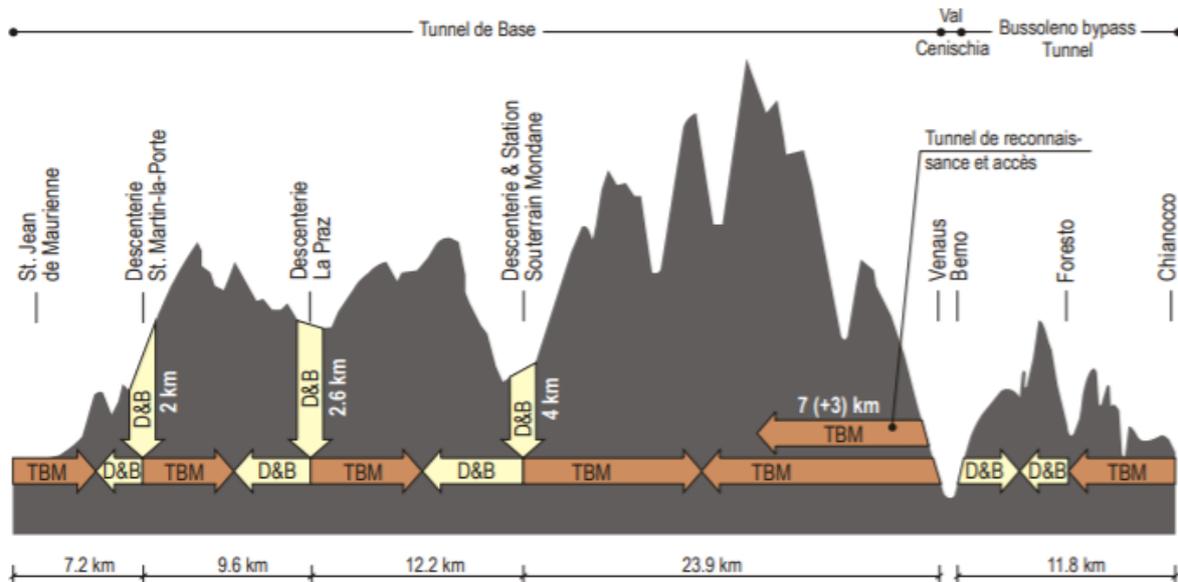


Figura 58. Metodo di scavo per le sezioni del Tunnel di base e il Tunnel bypass Bussoleno (TBM e “a mezza sezione”)

(LTF, Final report 2006)

- Tunnel di base:

La costruzione del tunnel di base sarà divisa in 4 sezioni, corrispondenti ai punti di attacco di otto facce del tunnel. In più vi saranno dei lavori specifici per la stazione di emergenza a Modane (Tabella 4). In realtà il portale a Venaus è stato poi spostato, a causa dell'opposizione ai lavori, a Chiomonte.

Tabella 4. Sezioni del tunnel di base e estensioni (LTF, Final report 2006)

Sezione di Tunnel	Lunghezza (m)
Sezione A: St Jean de Maurienne - St Martin de la Porte	7,167
Sezione B: St Martin de la Porte - La Praz	9,550
Sezione C: La Praz - Modane	12,208
Sezione D: Modane - Venaus	23,863
Modane Caverne Spazio tecnico sotterraneo	-

Le discenderie sono tre sul versante francese: Villarodin-Bourget/Modane (4 km), La Praz (2,48 km) e Saint-Martin-La-Porte (2,4 km); sul lato italiano vi è quella a Chiomonte, il tunnel esplorativo “La Maddalena” (7,02 km). In totale rappresentano circa 18 Km di gallerie funzionali sia per la costruzione e la manutenzione del tunnel di base sia come uscita di sicurezza. Più in particolare le discenderie hanno rappresentato 4 fronti di indagine differenti e necessari a valutare i principali ostacoli geologici e le soluzioni più efficienti per la costruzione

del tunnel di base: la valorizzazione dei materiali di scavo al cantiere di Villarodin-Bourget/Modane, la gestione delle acque in gallerie a La Praz, le convergenze della roccia a Saint-Martin-la-Porte e lo scavo meccanizzato a Chiomonte. A Saint-Martin-La-Porte, in Savoia, si è concluso il 23 settembre 2019 lo scavo dei primi 9 km del tunnel di base. Questa attività si è svolta nella zona geologica più delicata del massiccio alpino, con frequenti formazioni carbonifere.

- Tunnel by-pass di Bussoleno:

Il Tunnel di by-pass di Bussoleno è diviso in due sezioni con dei punti di attacco al portale ovest (Berno), al portale est (Chianocco) e all'accesso centrale (Foresto).

In Figura 59 è indicato lo stato di avanzamento dei lavori rispetto all'anno 2017: le tre discenderie (lato Francia) erano state tutte concluse già nel 2010, mentre i lavori per il cunicolo geognostico della Maddalena erano stati portati a termine solo l'anno precedente, nel 2016.

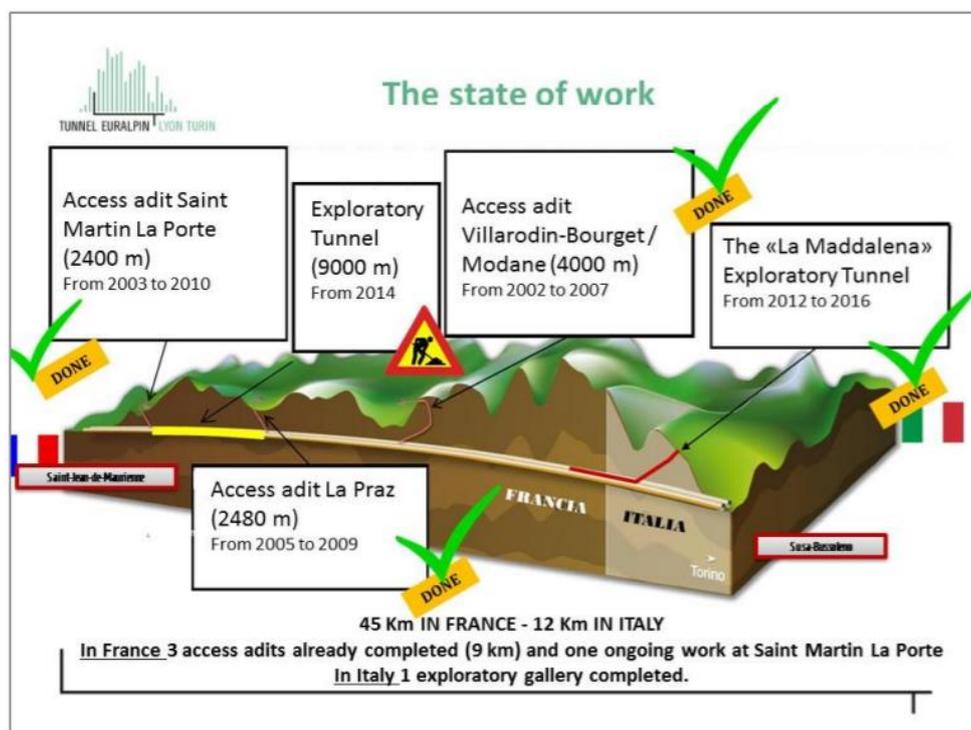


Figura 59. Stato dei lavori al 2017: Discenderie (lato Francia) e galleria geognostica (lato Italia), (Bufalini et al., 2017)

Ad eccezione dei primi 350-400 m sul lato Susa, la galleria di base sarà scavata con una **TBM** ('slurry shield'), in grado di creare una contropressione al fronte superiore alla pressione idrostatica delle acque sotterranee, al fine di impedire l'ingresso dell'acqua nella galleria. Immediatamente dietro lo scudo TBM, si devono adottare guarnizioni integrate al rivestimento per renderlo impermeabile lungo tutto il perimetro della galleria, quando la pressione dell'acqua è inferiore a 10 bar. Questo è il caso di tutti i

primi 6 km di lunghezza della galleria di base sul lato italiano (Bufalini et al., 2017). In Figura 60 viene mostrata invece la TBM adottata per quei 9 km della tratta sud del tunnel tra Saint-Martin e La Praz.

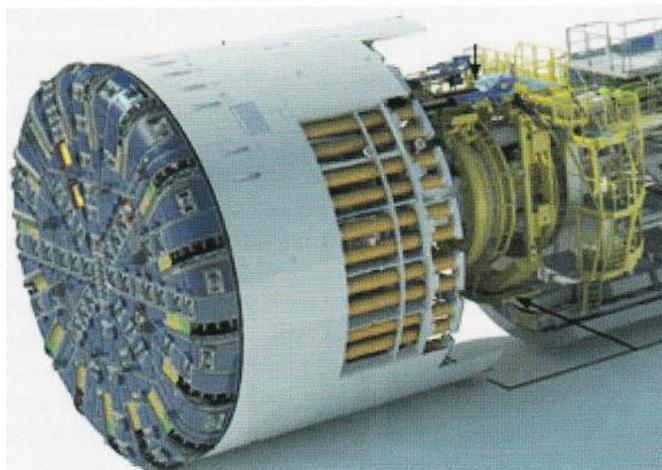


Figura 60. TBM adottata per i 9 km del tunnel sud di base tra Saint-Martin-La-Porte e La Praz (Barla et al., 2017)

Dove viene adottato lo **scavo convenzionale** (ad esempio l'imbocco sul lato Susa, i collegamenti tra le gallerie, lo scavo delle aree di sicurezza, alcuni tratti di galleria sul lato francese), vi sarà un preliminare campionamento sistematico al fine di rilevare, prima dello scavo, l'eventuale presenza di acqua in circolo. In questo caso, sono previste iniezioni di impermeabilizzazione previste per ridurre al minimo le interferenze temporanee. Una membrana impermeabilizzante a tutto tondo lungo il perimetro della galleria deve essere installata il più vicino possibile al fronte di avanzamento della galleria.

I possibili scenari di sfruttamento del potenziale geotermico sono stati valutati per le acque presenti nella galleria lungo il tratto non impermeabilizzato e le portate d'acqua ai portali (sia potabile che da utilizzare come risorsa termica) sono state stimate. Le temperature delle acque sul lato italiano sono tra i 29 e i 31°C e possono raggiungere i 36 °C, mentre quelle al lato francese sono leggermente più "fresche". Un modello numerico geotermico realizzato durante le fasi precedenti del progetto (Brino et al., 2008) è andato ad assegnare una specifica conducibilità termica e gradiente geotermico ad ogni unità geologica attraversata dal tunnel; inoltre, il progetto è stato differenziato termicamente in sezioni omogenee.

Nella Tabella 5 sono riportati il gradiente geotermico e l'intervallo di temperatura prevista all'altezza del tunnel di base (dal punto alto al portale italiano). Questi valori diminuiscono per la presenza di acqua che scorre lungo le zone di taglio dalla superficie alla porzione profonda dell'ammasso roccioso. Gli afflussi d'acqua sono previsti principalmente dove si intercettano faglie e zone di deformazione (Torri et al., 2014).

L'esperienza acquisita durante lo scavo dei tre pozzi di accesso sul lato francese e del cunicolo esplorativo sul lato italiano, ha fornito misurazioni dell'acqua effettivamente drenata, che è risultata essere più bassa del previsto. Ciò è risultato molto utile per valutare l'effettivo impatto dello scavo sulle risorse idriche, che si è rivelato basso.

Tabella 5. Gradienti geotermici per le unità tettoniche incontrate dallo scavo e range di temperature attese all'altezza del tunnel di base (Torri et al., 2014)

Tectonic Unit	Geothermal gradient (°C/km)	Temperature at tunnel elevation (°C)
Gypsum Nappe	20–30	22–31
Ambin Massif	25–33	21–47
Tectonic fault zone	16	12–22
Piemontese Nappe	17–25	10–20

Si nota in particolare dalla Tabella 5 che il contributo delle acque sotto il Massiccio dell'Ambin (le cui temperature stimate raggiungono i 47°C) rappresenta una risorsa, in quanto calde e potabili, e il loro isolamento e captazione potrebbe quindi essere sfruttato a fini energetici e idropotabili.

La valutazione delle portate delle temperature delle venute d'acqua nel Tunnel di Base è descritta nella relazione idrogeologica del Progetto Preliminare (doc n° C3B_0046_00-03-02- 10-01_Relazione idrogeologica di sintesi_B) fornito dalla Regione Piemonte.

3.3 Condizioni termiche

Allo stesso modo, la temperatura all'altezza della struttura è un parametro importante da determinare per identificare le aree in cui potrebbero essere necessari sistemi di raffreddamento.

Grazie ai grafici termici realizzati in tutti i pozzi, i gradienti geotermici sono ben noti e la modellazione termica per conduzione è stata effettuata, tenendo conto degli effetti topografici e del raffreddamento superficiale che può esistere a causa della circolazione dell'acqua. Così, i primi modelli hanno dimostrato che la temperatura alla roccia dovrebbe essere superiore a 40°C dopo qualche chilometro sotto il massiccio d'Ambin, fino a raggiungere un massimo di 47-48°C nella parte scavata tra rocce metamorfiche dove si raggiungono coperture di 2000 m (Torri et al. 2014).

Gli studi di geotermia sono stati condotti con lo scopo di attribuire alle differenti formazioni geologiche attraversate dalle gallerie, valori specifici di conduttività termica, eventualmente anisotropi, sulla base delle misure effettuate nei carotaggi. Il dettaglio del modello geotermico è fornito nella documentazione specifica fornita dal sito della Regione Piemonte (“C3B_0062_00-06-01-10-01_Modello Geotermico_B” (regione.piemonte.it)).

In questa fase sono stati analizzati i dati a disposizione per la tratta di competenza ovvero a partire dal punto alto del Tunnel di Base posto in territorio francese alla pk 34+170 verso la tratta italiana, ovvero compreso il Tunnel dell’Orsiera. Si tratta dei dati rilevati all’interno di 14 sondaggi (disponibili in Tabella 6, dal Piano di Gestione Emergenze fornito dalla Regione Piemonte) di cui 10 realizzati in asse con il Tunnel di Base e 4 realizzati nel tratto della media Valle di Susa all’interno dei litotipi che saranno scavati per il Tunnel dell’Orsiera, ma sul versante opposto.

Tabella 6. Temperature estrapolate alla quota della galleria (dal sito della Regione Piemonte)

Unità Tettonica	Codice sondaggio	opera	Pk approssimata	Temperatura
			Proiezione sull'asse del tunnel	[°C]
Massiccio d'Ambin	F12	Tunnel di Base	34+250	18.3
	F67		35+000	20.5
	F31		35+550	22
	F30bis		39+500	33
	F16		42+500	43
	S4		52+000	31
Zona a Scaglie Tettoniche	S5		53+900	21.5
	S12		55+400	11.5
Zona Piemontese	S8		59+300	18.5
	S9		60+000	16
Massiccio Dora Maira	S11	Tunnel dell'Orsiera	-	11
	S10			16.5
	S25			10
	S17			11.5

In particolare, per ogni sondaggio sono state estrapolate le temperature relative alla quota delle opere (Tabella 6): le temperature ricavate sono quindi state riferite alle tratte relative alla profondità ed alla temperatura registrata in corrispondenza di tale profondità; questi dati sono poi stati elaborati separatamente per ogni singolo sondaggio.

Per quanto riguarda il Tunnel dell'Orsiera, non ci si è potuti riferire che ai dati registrati nei sondaggi presenti lungo il versante sinistro dello stesso settore della Valle di Susa. Tali dati sono stati utilizzati al fine di una valutazione qualitativa delle condizioni termiche dell'ammasso roccioso.

Per quanto riguarda il Massiccio d'Ambin, come detto nel paragrafo precedente, i gradienti termici individuati presentano valori che variano tra 25° e 30°C/km; i gradienti termici, così come le temperature a quota tunnel, risentono in particolare della presenza di flussi idrici più o meno circolanti in grado di mettere in "contatto termico" il massiccio con l'atmosfera. È dunque evidente che un contesto con presenza di fasci di fratturazione e, talvolta, carsismo implichi variazioni di gradiente da un punto ad un altro a seconda della distanza dalle linee di flusso, determinando anomalie locali.

Di seguito è riportato uno stralcio del profilo termico specifico (Figura 61, dal "Modello Geotermico" fornito dalla Regione Piemonte) per l'attraversamento del Tunnel di Base sotto il massiccio d'Ambin, ricavato dalla modellizzazione del contesto termico rilevato per le unità tettoniche interessate dallo scavo delle opere. I risultati della modellizzazione ben si accordano con le misure di temperatura eseguite nei sondaggi, permettendo quindi di definire un profilo geotermico previsionale lungo il tracciato del tunnel.

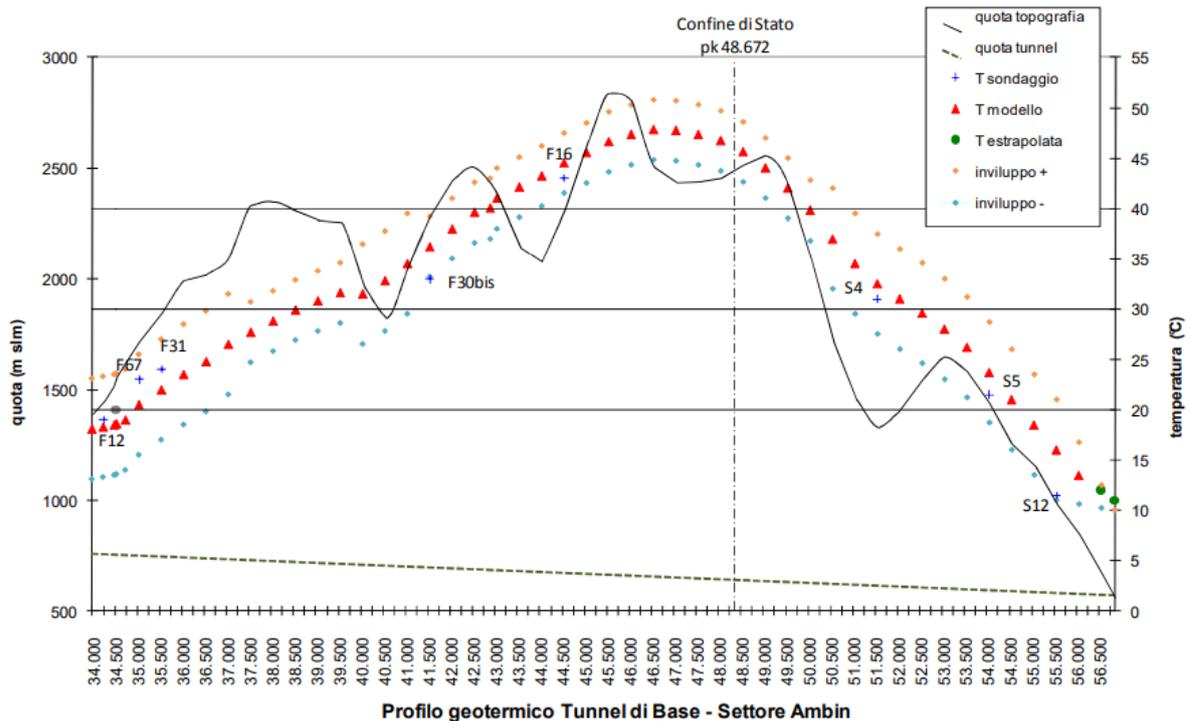


Figura 61. Profilo geotermico previsionale del tunnel di base ("Modello Geotermico" nel Progetto Definitivo disponibile al sito della Regione Piemonte)

Il profilo geotermico previsionale del tunnel di base (Figura 61) ha inizio dalla progressiva 34+000 (punto alto 34+170) fino alla pk 56+000 (ovvero prima della Zona Piemontese, vedi Tabella 6): è esclusa la tratta di attraversamento del fondovalle Cenischia in terreni sciolti e il tratto che si sviluppa lungo il

versante sinistro della Val Cenischia nei calcescisti della Zona Piemontese a basse coperture fino all'imbocco di Susa, pk 60+900 circa.

Il profilo mostra che, a partire dal lato italiano della galleria, la temperatura della roccia a quota tunnel raggiungerà i 30°C alla pk 51+000 circa e che culminerà a circa 48°C nel cuore del massiccio d'Ambin (pk 46.5 circa); nel complesso la temperatura dovrebbe superare i 30°C per più di 14 km (tra le pk 39 e pk 53 circa), e i 40°C per 7 km di tunnel (tra le pk 42 e pk 49 circa).

Per quanto riguarda il Tunnel dell'Orsiera, le coperture più ridotte non dovrebbero determinare condizioni di criticità per quanto concerne le temperature: si stima che la temperatura delle acque drenate non dovrebbe superare i 18 °C, solo indicativo in mancanza di misure dirette ("Modello Geotermico" fornito dalla Regione Piemonte).

3.4 Cunicolo esplorativo de "La Maddalena" (Chiomonte)

Chiomonte, in Val Susa, è il maggiore cantiere italiano della Torino-Lione e sito d'interesse strategico nazionale. Secondo la variante al progetto definitivo approvata dal CIPE a marzo 2018, in seguito allo Studio di sicurezza affidato al Consorzio Nazionale Interuniversitario per i Trasporti e la Logistica (NITEL), i lavori principali per la realizzazione del tunnel di base in Italia partiranno dal cantiere di Chiomonte (anziché da Susa come inizialmente previsto), per garantire la sicurezza di maestranze e cittadini. Nel 2020 è stato avviato l'allargamento del cantiere per le opere pededeutiche.

La galleria geognostica è stata completata il 19 febbraio 2017 ed è stata realizzata per conoscere la struttura della montagna in cui passerà la nuova linea, via d'accesso italiana al cantiere del tunnel di base; lo scavo è avvenuto prevalentemente in modalità meccanizzata, utilizzando la TBM Gea.

Gli obiettivi del Cunicolo Esplorativo de La Maddalena, erano legati alla necessità di conoscere puntualmente, prima dello scavo delle gallerie del Tunnel di Base, le caratteristiche ed il comportamento conseguente allo scavo meccanizzato dell'ammasso roccioso della tratta in territorio italiano fino al sito di Clarea, con particolare riguardo al massiccio d'Ambin, la conoscenza del quale non era ancora ritenuta esaustiva ai predetti fini. Gli obiettivi principali legati alla realizzazione dell'opera riguardavano il riconoscimento geologico, geotecnico ed idrogeologico (dal documento "Elaborati Generali", TELT, 2020):

- La verifica del comportamento dell'ammasso roccioso allo scavo sotto alte coperture;
- Il test a scala ridotta dello scavo meccanizzato;
- L'indagine degli aspetti geotermici;
- La valutazione delle possibili venute d'acqua.

L'imbocco del cunicolo esplorativo (Figura 62) si trova a La Maddalena, nel comune di Chiomonte (Torino), ad un'altezza di 670 m sul livello del mare; il tunnel è lungo circa 7 km, con un diametro di 6,30 m e una pendenza variabile lungo la sua lunghezza. I primi 1.500 m sono in salita; il punto più basso è a 4.100 m di catenaria.

A partire dai 3.500 m dell'interasse, il tunnel si trova tra le due canne del futuro tunnel di base. I lavori di scavo sono iniziati alla fine del 2012 e i primi 200 m sono stati completati con metodi convenzionali; si è poi continuato nel 2013, con il passaggio ad una macchina TBM. Durante lo scavo sono state eseguite indagini geologiche, idrologiche e geomeccaniche, tra cui perforazioni, prove in situ e di laboratorio, indagini geofisiche, monitoraggio di deformazioni e sollecitazioni con l'obiettivo principale di indagare il massiccio dell'Ambin soprattutto sotto la copertura massima (anche superiore a 2000 m) del Tunnel di base del Moncenisio.

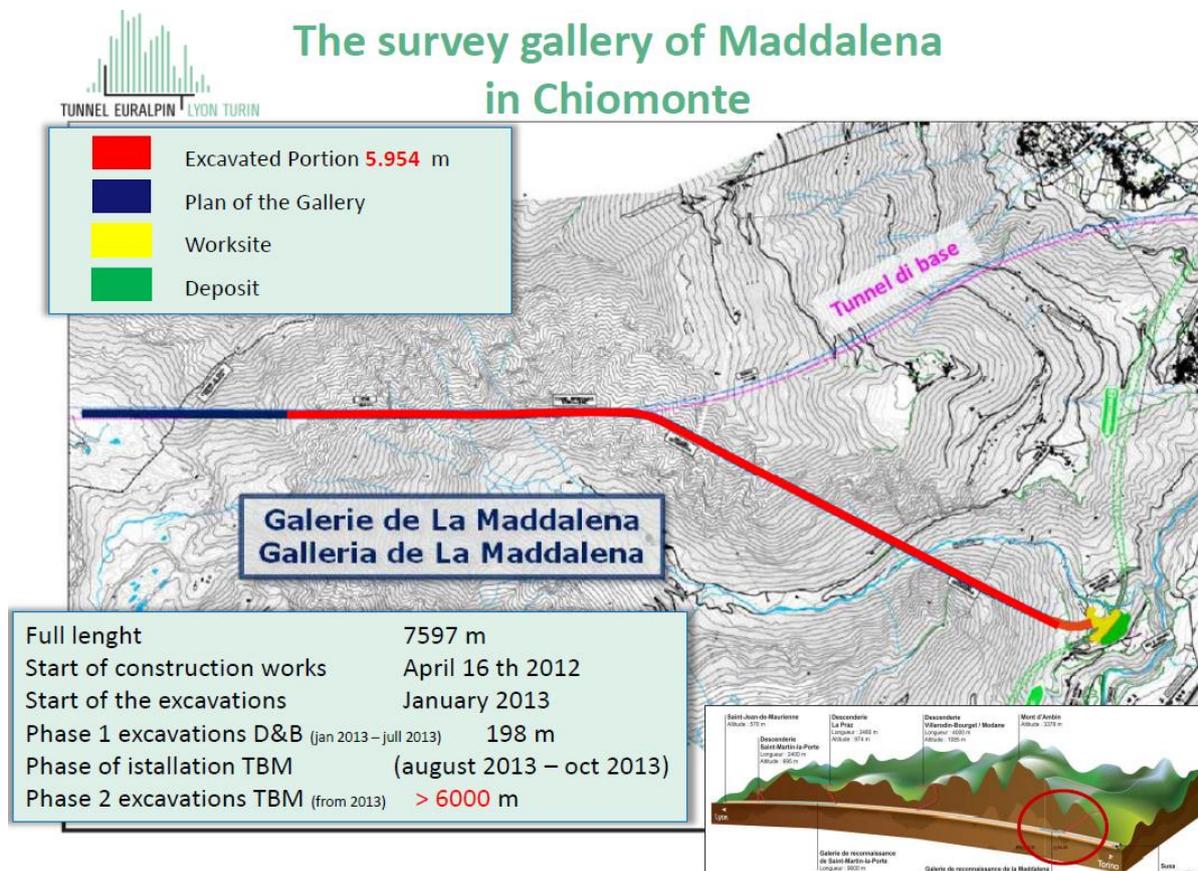


Figura 62. Galleria geognostica de “La Maddalena” (Bufalini et al., 2017)

Il tunnel sarà utilizzato durante la costruzione della galleria di base e verrà completato e dotato di tutte le attrezzature necessarie per la ventilazione e le funzioni di sicurezza del tunnel stesso, quando diventerà operativo nel 2029.

3.5 Lo studio condotto da TELT sull'energia estratta dal tunnel di base

Condotto tra il 2017 ed il 2018 nel quadro di una convenzione tra TELT e Politecnico di Torino, lo studio ha confermato che la risorsa geotermica resa disponibile dalle acque incontrate durante lo scavo del tunnel di base del Moncenisio è una fonte energetica pulita e rinnovabile che può diventare un'importante opportunità per i territori coinvolti dai lavori della Torino-Lione, attraverso l'attivazione di progetti di valorizzazione a uso potabile ed energetico: il calore in galleria è una fonte inesauribile per diverse finalità, prima fra tutte il teleriscaldamento, con un potenziale stimato tra i 2.000 e i 10.000 kW. Tali attività produttive ipotizzate contribuirebbero anche a ridurre le emissioni inquinanti nelle regioni interessate.

I dati hanno evidenziato che la geotermia è una risorsa che deve fare i conti con le distanze: la sua efficacia è infatti legata alla lontananza tra il punto di produzione e quello di utilizzo, proprio per questo è il territorio immediatamente limitrofo che può beneficiare delle ricadute positive. Nello studio sono state approfondite e valutate diverse ipotesi di impiego della risorsa geotermica sia nella fase di lavori sia in quella di esercizio.

3.5.1 Casi internazionali

Dal confronto fra le portate attualmente sfruttate a scopo geotermico in gallerie già realizzate e gli scenari previsti per il tunnel di base del Moncenisio nella Tabella 7 è emerso come in tutti gli scenari valutati la risorsa disponibile sia superiore sia per quantità sia per temperatura ai casi internazionali di successo nell'impiego di questa fonte energetica.

Tabella 7. Confronto fra scenari di tunnel esistenti e quelli previsti per il tunnel di base del Moncenisio (TELT, 2021)

TUNNEL	PORTATA (l/s)	T (°C)
Tunnel di base Torino-Lione (Scenario 2)	379.5	27.8/29.1
Tunnel di base Torino-Lione (Scenario 4)	309.5	29.7
Tunnel di base Torino-Lione (Scenario 1)	243.2	29.1/31.1
Tunnel di base Torino-Lione (Scenario 3)	205	31.5
Galleria san Gottardo	112	17
Galleria della Furka	90	16
Galleria di base del Lotschberg	70	16/18
Galleria Hauenstein	42	19
Galleria Mappo-Morettina	16	16
Galleria di Ricken	12	12

3.5.2 I diversi scenari

In avvio dello studio, la disponibilità di risorsa geotermica è stata valutata considerando diversi scenari, a seconda delle ipotesi sulle portate e la temperatura dell'acqua. La portata disponibile è risultata compresa tra 205 kg/s e 379,5 kg/s, che può essere valorizzata grazie a un rivestimento impermeabilizzato della galleria per convogliare le acque in una canalina di raccolta.

Nell'ipotesi di uno sfruttamento massimizzato della risorsa, quindi con acque fino a 20°C di temperatura, le potenze disponibili sarebbero in grado di alimentare 1.500 abitazioni. Tale potenza termica, tra i 9,3 e i 14,4 MW, è stata ricavata sulla base di una media pesata ottenuta dalle temperature minima e massima di ciascuna venuta.

A fronte di queste disponibilità e su base tecnico-economica, si sono valutate alcune soluzioni di utilizzo a Susa e a Chiomonte, tenendo conto di possibili effetti di scala. Gli scenari analizzati (Tabella 8) di seguito corrispondono a:

1. Uno scenario di disponibilità termica nominale, per il quale si è considerata la potenza termica minima individuata nella fase 1, pari a 9,3 MW;
2. Uno scenario di disponibilità media, per il quale si è considerato una riduzione della potenza disponibile di circa un terzo rispetto a quella nominale;
3. Uno scenario di disponibilità bassa, per il quale si è considerato una riduzione della potenza disponibile di circa due terzi rispetto a quella nominale.

Tabella 8. Scenari di disponibilità di risorsa geotermica analizzati (TELT, 2021)

SCENARIO	1	2	3
Disponibilità della risorsa	Nominale	Media	Bassa
Potenza termica disponibile [MW]	9,3	5,9	3,2

- **Zona SUSÀ**

A Susa sarà collocato il portale est del tunnel di base, dal quale potranno essere raccolte le acque, per caduta, per la messa a disposizione ai fini dello sfruttamento della risorsa. Le ipotesi analizzate in fase progettuale considererebbero l'alimentazione di una piscina comunale, di aree ferroviarie e di una rete di teleriscaldamento.

- **Zona CHIOMONTE**

Chiomonte ospiterà il cantiere per lo scavo del tunnel di base lato Italia e, dal portale della galleria, saranno pompate tutte le acque provenienti dallo scavo fino alla conclusione dei lavori. Sono quattro le tipologie di impieghi per le quali è stata considerata la risorsa geotermica: zona cantiere,

teleriscaldamento, serre per orto-floricoltura, serre idroponiche) tutte collocate nel perimetro del cantiere e nell'abitato. Per la **zona di cantiere** una prima ipotesi analizzata e del tutto percorribile, dal momento che la potenza termica richiesta è di circa 280 kW (largamente inferiore a quella disponibile dalla risorsa in tutti gli scenari esaminati) coinvolge il riscaldamento di edifici quali: spazio visitatori, Promenade di Colombano, edifici di cantiere e il Museo archeologico. Rispetto a un impianto di riscaldamento tradizionale, l'impiego di quello geotermico consentirebbe un risparmio di energia primaria di circa 264 MWh/anno, con conseguente riduzione delle emissioni di CO₂ (circa 57t/anno). Per l'impiego ai fini del **teleriscaldamento**, la potenza termica da fornire in condizioni di progetto per l'alimentazione degli edifici è complessivamente di circa 3200 kW, quindi soddisfatta dalla disponibilità della risorsa geotermica per solo i primi due scenari; nel terzo scenario potrebbe rendersi necessaria una piccola integrazione. Dal punto di vista energetico e ambientale, il teleriscaldamento risulta vantaggioso, presentando una riduzione di energia primaria di circa 835 MWh/anno e di 128 t/anno di CO₂ rispetto ad un convenzionale riscaldamento a caldaia. Nell'ipotesi di alimentare **serre** per attività agricole nell'area limitrofa al cantiere di Chiomonte, la soluzione richiederebbe una tubazione principale e una rete di distribuzione secondaria, entrambe necessarie a coprire una domanda di energia stimabile in 227 kWh/m². I costi sarebbero particolarmente contenuti grazie alla possibilità di ricorrere a tubazioni in polietilene (diametro di 10 cm) con un risparmio di almeno il 50% rispetto all'alternativa con pompa di calore.

Sicuramente un principio fondamentale del progetto "Nuovo collegamento ferroviario Lione-Torino" è quello di ridurre al minimo il drenaggio dell'acqua indotto dai lavori sotterranei. Questo è pensato al fine di ridurre:

- Gli impatti sulle risorse idriche;
- I problemi creati dall'afflusso di acqua durante lo scavo e l'utilizzo della galleria (Torri et al., 2014).

3.6 Effetto della circolazione interna dei treni

La temperatura interna già stimata dal modello geotermico al capitolo 3.3 può subire variazioni a causa della eventuale circolazione interna dei mezzi quando il tunnel diventerà operativo, come anche dei sistemi di ventilazione che saranno predisposti nella sezione dell'infrastruttura.

L'azienda LTF (attuale TELT) ha redatto uno studio nel 2013 sugli eventuali flussi di aria indotti dal passaggio dei treni e dei mezzi al fine di valutare effetti di quest'ultimi sulle condizioni termiche interne alla sezione della galleria.

Si ricorda che il tunnel è connesso anche alla superficie attraverso 3 discenderie (St. Martin, La Praz e Modane), 2 pozzi (Avrieux e Val Clarea) e 1 galleria (Maddalena) e sarà equipaggiato con ventilatori presenti nei condotti di ventilazione per una portata totale di:

- 400 m³/s per la discenderia di La Praz;
- 300 m³/s per la discenderia di St. Martin;
- 2 x 400 m³/s (flusso doppio) per il Pozzo di Avrieux;
- 400 m³/s per il Pozzo di Val Clarea.

In regime di normale esercizio, per la canna Francia → Italia sono aperti soltanto i condotti di ventilazione delle discenderie di La Praz e di Val Clarea, mentre per la canna Italia → Francia sono aperti i condotti dei pozzi di Avrieux e della discenderia di St. Martin la Porte; è prevista una circolazione mista di treni passeggeri (massimo 2 treni/ora), di treni merci (massimo 11 treni/ora) e treni di Autostrade Ferroviarie AF (massimo 3 treni/ora), per la sola canna Francia → Italia.

3.6.1 Flusso d'aria interno alla galleria

Sono tre i fenomeni che inducono un flusso interno alla sezione trasversale diverso da zero: l'effetto pistone dovuto al movimento dei treni, l'effetto termico e le contro-pressioni (intendendo la differenza di pressione residua tra i due portali del tunnel dopo aver sottratto la componente naturale, dovuto alle eventuali differenze di altitudine).

Concentrandosi solamente sul primo di essi, si può affermare che l'effetto pistone, dovuto al movimento dei treni dentro la galleria, è una funzione della velocità di spostamento dei treni e del loro rapporto di bloccaggio (0,20/0,25 per i treni passeggeri ad alta velocità TGV Réseau/Duplex, 0,25 per i treni merci, 0,36 per i treni di Autostrade Ferroviarie). Quest'ultimo viene definito come il rapporto tra la sezione trasversale del veicolo e la sezione trasversale libera del tunnel.

- *Effetto Pistone per Un Singolo Treno*

Nella Figura 63 viene illustrato come l'effetto pistone influisce sulla velocità dell'aria all'interno del tunnel, quando un solo treno è presente nello stesso (le tre linee distinguono le diverse categorie di treni).

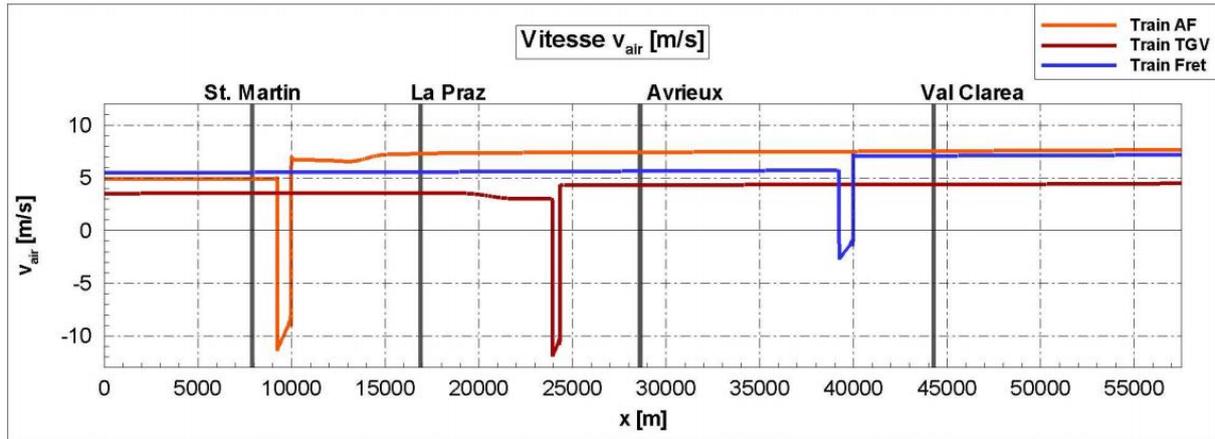


Figura 63. Conseguenze dell'effetto pistone sulla velocità all'interno del tunnel (singolo treno in circolazione) per i 3 tipi di treno (AF a 120 km/h, TGV a 220 km/h e treni merci a 120 km/h), LTF (2013)

Per comparare gli effetti dei 3 treni e meglio stimare l'entità delle perdite, i pozzi sono stati considerati chiusi. A causa della sua forma aerodinamica e per il suo rapporto di bloccaggio ridotto, il treno passeggeri ad alta velocità e a doppia trazione TGV induce le perdite di carico e spostamenti d'aria più deboli rispetto agli altri treni, sebbene il TGV si sposti con una velocità di 220 km/h rispetto ai treni merci e di solo 120 km/h rispetto ai treni Autostrade Ferroviarie (AF). Le correnti indotte dal passaggio di un TGV è pari a circa 4 m/s per il Réseau e 5,5 m/s per il Duplex, ed è prossimo a 7 m/s per un treno merci, mentre è circa 8 m/s per un treno AF.

- **Effetto Pistone per Più Treni**

In Figura 64 è mostrata la velocità dell'aria interna indotta dal passaggio di più treni (2, 8 o 11 l'ora, secondo il programma di esercizio).

Se vi è la circolazione di 2 treni l'ora (2 treni merci), la velocità dell'aria nel tunnel a valle del treno è di circa 8 m/s, senza considerare gli effetti termici o gli effetti dovuti alle contropressioni; tuttavia questa velocità può subire variazione in funzione della posizione del treno e dello stato del pozzo (aperto o chiuso). Se circolano 8 treni l'ora (1 TGV, 3 treni AF e 4 treni merci), la velocità dell'aria può arrivare localmente a 14 m/s e risultati molto simili sono stati ottenuti anche nel caso circolino 11 treni l'ora (2 TGV di cui 1 Duplex, 4 treni AF e 5 treni merci).

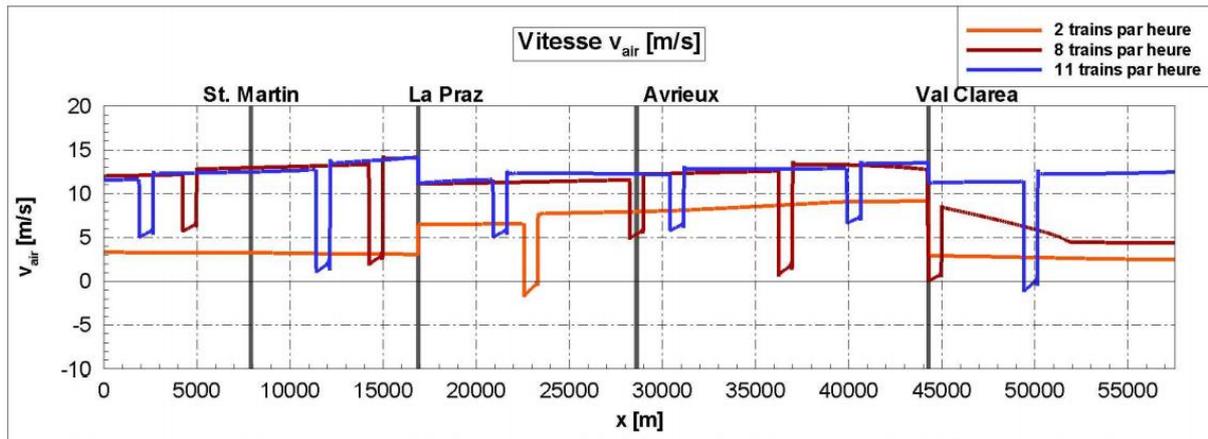


Figura 64. Conseguenze dell'effetto pistone sulla velocità all'interno del tunnel per i tre scenari di traffico orario definiti nel piano di esercizio: 2 treni l'ora (2 treni merci), 8 treni l'ora (AF, TGV, merci, AF, merci, AF, merci, merci) e 11 treni l'ora (AF, TGV-Rés, TGV-Duplex, AF, merci, merci, merci, AF, merci, merci, AF): tunnel Francia → Italia (LTF 2013)

- **Effetti Termici**

Le differenze di temperatura tra l'interno del tunnel e l'ambiente esterno può essere ugualmente una causa di moto del flusso d'aria. Per il tunnel Francia → Italia, i pozzi di La Praz e di Val Clarea (quest'ultimo situato nella zona più calda del tunnel) sono aperti, mentre quelli di St. Martin e di Avrieux sono chiusi.

Nel caso in cui la temperatura esterna sia 0°C, senza alcun treno in circolazione, il flusso può raggiungere una velocità prossima ai 3 m/s nella direzione verso l'Italia tra il portale lato Francia e il pozzo di La Praz (aperto) e molto più bassa fino al pozzo di Val Clarea (aperto). Nella direzione della Francia, dal portale italiano al pozzo di Val Clarea la velocità del flusso è prossima ai 4 m/s (Figura 65).

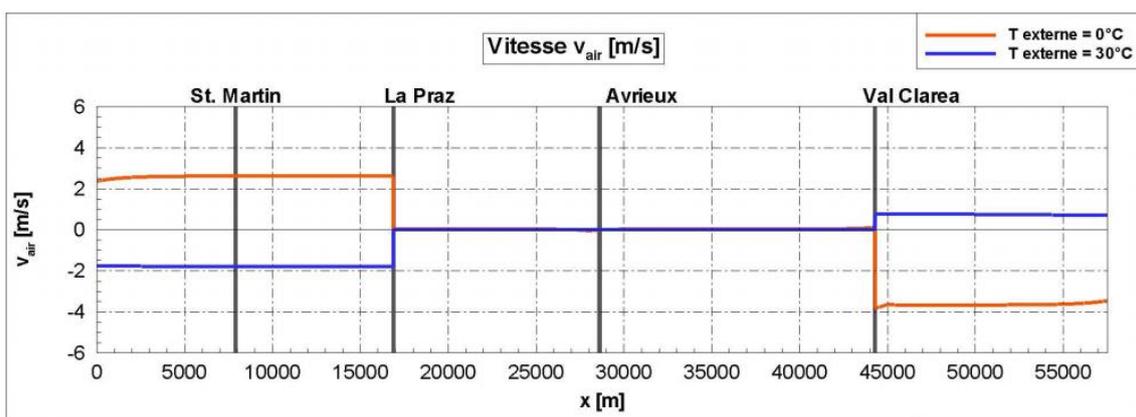


Figura 65. Flusso d'aria generato dalle differenze di temperatura tra l'interno del tunnel e l'esterno (0 e 30 °C). Tunnel Francia → Italia (LTF, 2013)

- Contropressione

La contro-pressione (differenza di pressione tra i portali, al netto della differenza di pressione naturale) è in egual modo una causa di flusso d'aria, come si evince dalla Figura 66. In funzione dello stato di apertura dei pozzi, una contro-pressione variabile tra -1000 Pa e $+1000$ Pa può generare una corrente d'aria con velocità variabili tra circa $+5$ m/s e -6 m/s.

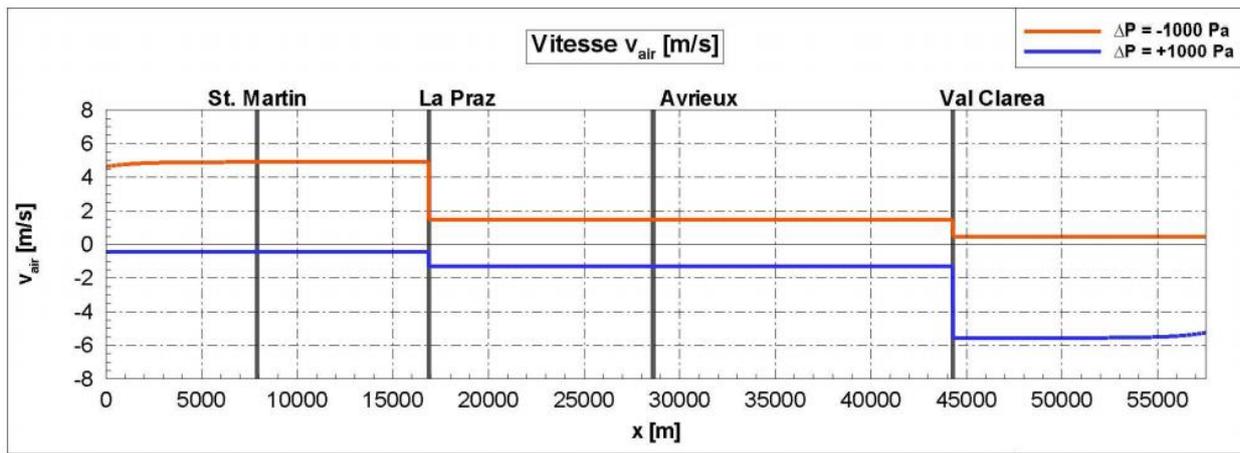


Figura 66. Flusso d'aria generato da una contro-pressione tra $+1000$ Pa e -1000 Pa; la temperatura dell'aria ai portali del tunnel e alla sommità dei pozzi è fissata uguale e pari a 10 °C. Tunnel Francia → Italia. (LTF, 2013)

4. LA MODELLAZIONE NUMERICA

ACCOPPIATA TERMO-IDRAULICA

Con l'avvento dei primi calcolatori, nasce nella comunità scientifica l'intento di risolvere complessi problemi reali per via numerica: una delle principali famiglie di metodi risolutivi è oggi rappresentata dal metodo agli elementi finiti, lo stesso implementato nel software di calcolo FEFLOW (che sarà adottato nelle simulazioni).

In questo capitolo si faranno riferimenti al metodo degli elementi finiti ed ai suoi step principali; si parlerà del problema accoppiato (nello specifico TH), mostrando le equazioni che ne fanno parte e distinguendo le grandezze che lo governano. Infine si introdurranno gli aspetti generali del codice di calcolo agli elementi finiti FEFLOW ("Finite Element subsurface FLOW simulation system"), utilizzato per la modellazione numerica e l'esecuzione delle analisi.

4.1 Cenni sul metodo degli elementi finiti

Alla base dell'analisi agli elementi finiti (FEA), tecnica di simulazione al computer adottata nelle analisi di tipo ingegneristico, vi è il metodo agli elementi finiti (FEM, "*Finite Element Method*").

Con l'espressione **metodo degli elementi finiti** si intende un metodo di risoluzione numerica idoneo a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali parziali riducendo quest'ultime a un sistema di equazioni algebriche.

Solitamente il metodo FEM è implementato nella risoluzione in forma discreta e approssimata di equazioni alle derivate parziali (o PDE) quando il dominio mostra una forma complessa, o quando è variabile, o quando l'accuratezza richiesta alla soluzione non è omogenea sul dominio (si può richiedere maggiore accuratezza in prossimità delle zone critiche) e quindi non risulta possibile trovare una soluzione analitica in forma chiusa.

Il metodo agli elementi finiti abbraccia una posizione dominante nel panorama delle tecniche numeriche di approssimazione, tanto da rappresentare il nucleo della maggior parte dei codici di analisi automatici disponibili in commercio, benché il FEM competa con altre strategie numeriche di simili caratteristiche (metodo delle differenze finite FDM, metodo degli elementi al contorno BEM, metodo dei volumi finiti FVM, ecc.) in ambiti specifici.

Tutti i programmi che impiegano il metodo degli elementi finiti per l'analisi strutturale sono dotati di una libreria di elementi finiti (FE) monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali per facilitare la modellazione di una struttura e geometria reale. In generale, il metodo degli elementi finiti è quello d'elezione per tutti i tipi di analisi di meccanica strutturale (per esempio per il calcolo della deformazione e tensione di corpi rigidi), mentre va in crisi per quei casi dove è necessaria una discretizzazione del problema in un numero di celle o nodi tale da comportare un onere computazionale troppo elevato. Inoltre, le equazioni assunte, che si vedranno più nel dettaglio al paragrafo 4.2.1, presuppongono condizioni di compatibilità per gli spostamenti ai nodi comuni ad elementi adiacenti: di conseguenza vi è l'impossibilità di rappresentare strappi di materia o separazione di elementi. La risoluzione del problema viene ridotta all'analisi di una o più variabili attraverso una serie di step successivi (paragrafo 4.1.1).

Per fare un confronto, il metodo alle differenze finite (FDM, "Finite Difference Method") rappresenta una soluzione alternativa alla risoluzione delle equazioni differenziali alle derivate parziali. A differenza degli elementi finiti, che offrono il vantaggio di rappresentare geometrie complesse o irregolari (come ad esempio i tubi ad U circolari in un dominio rettangolare), le differenze finite riescono solo a gestire domini semplici (Capozza, 2012); si basano, inoltre, sulla discretizzazione delle equazioni differenziali, fornendo leggi di variazione delle variabili in gioco che saranno determinate in corrispondenza dei nodi di griglie regolari nelle tre dimensioni (che schematizzano la reale geometria del problema). Per entrambi i metodi è necessaria l'introduzione nel problema di opportune condizioni iniziali e al contorno per ottenere la risoluzione delle equazioni nelle tre coordinate spaziali (x,y,z) e nel tempo t , ma in generale, è dimostrato che i metodi FEM sono generalmente superiori a quelli FDM in termini di stabilità della soluzione nel risolvere i problemi di advezione-conduzione (dalle 'Linee guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore' di Capozza, 2012).

4.1.1 Discretizzazione del dominio e step successivi

Per risolvere il problema reale, il codice di calcolo FEFLOW utilizza un metodo ad elementi finiti (FEM): il metodo si applica a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita molto varia e di dimensioni contenute: nel continuum (numero infinito di gradi di libertà), ogni singolo elemento finito viene considerato un campo di integrazione numerica di caratteristiche omogenee. La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è la

discretizzazione attraverso la creazione di una *'mesh'* (si passa ad un modello discreto con un numero finito di gradi di libertà) composta da primitive (elementi finiti) di forma codificata (triangoli e quadrilateri per domini 2D, tetraedri e esaedri per domini 3D). I risultati sono, infatti, direttamente legati alla dimensione degli elementi discretizzati: tanto più si riduce la dimensione, tanto più cresce la precisione del modello. Ad aggravarsi, però, sarà il tempo computazionale richiesto, ragione per cui, nella pratica comune, si fa molta attenzione a raggiungere il giusto equilibrio tra una dimensione della mesh che sia abbastanza accurata e un tempo di analisi funzionale, che non comporti un inutile sovraccarico di calcoli.

Una volta discretizzato il dominio del problema, si identifica la variabile primaria incognita che sarà valutata ai nodi e, in seguito, sull'intero dominio: è questa variabile a rappresentare la soluzione (di solito si adotta lo spostamento per i problemi meccanici, la temperatura per i problemi termici, ecc.) dei calcoli del metodo agli elementi finiti.

L'andamento della variabile primaria può essere espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette funzioni di forma (*shape functions*): di solito ci si riferisce a funzioni polinomiali nelle quali il grado del polinomio determina il numero di coefficienti che identificano la soluzione. Se si è scelto, ad esempio, lo spostamento come variabile primaria, si possono ricavare i campi di deformazione e tensione: la sua formulazione tridimensionale (nelle coordinate spaziali x,y,z) potrà dunque essere espressa come segue:

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

Dove H è la sopracitata funzione di forma, che permette di scrivere il campo di spostamenti in ogni elemento in funzione dei valori ottenuti su ogni nodo della mesh $[u]_e$. Nella sua forma originaria, e tuttora più diffusa, il metodo agli elementi finiti viene utilizzato per risolvere problemi poggianti su leggi costitutive di tipo lineare. Tipici i problemi di sforzi - deformazioni in campo elastico (o la diffusione del calore all'interno di un corpo materiale) per cui si ottengono prima le deformazioni $[\varepsilon]$ dalla derivazione degli spostamenti e poi le tensioni $[\sigma]$ attraverso le leggi costitutive:

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

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

Dove [B] e [C] rappresentano la matrice di deformazione e la matrice della legge costitutiva rispettivamente; la matrice [B] sarà composta dalle derivate prime della matrice di forma [H].

Per poter scrivere le equazioni che governano il singolo elemento, si devono ricavare le matrici di rigidità di ognuno di essi, $[k]_e$, attraverso l'uso del Principio dei Lavori Virtuali:

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

E grazie ad essa, dopo una combinazione con gli spostamenti nodali noti, si è in grado di ricavare le forze esterne $[X]_e$ ai nodi agenti sul singolo elemento:

$$[X]_e = [k]_e [u]_e$$

Queste equazioni locali si possono assemblare così da potere estendere quanto detto a tutto il dominio, ottenendo un unico grande sistema di equazioni (equazioni globali) da risolvere. Le soluzioni saranno sui nodi nella forma:

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

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

Dove $[R]$ rappresenta il vettore delle forze esterne agenti in ogni nodo, il vettore degli spostamenti $[u]$ nodali del dominio nel suo complesso e $[K]$ la matrice globale di rigidità estesa a tutto il dominio (la si è infatti ottenuta sommando le matrici di rigidità di ogni elemento) e non più limitata al singolo elemento.

Si devono assegnare le condizioni al contorno, così da ridurre il numero di incognite del problema (che altrimenti supererebbero il numero delle equazioni risolutive); solo con queste informazioni aggiuntive nel sistema trovato in precedenza si possono ricavare le soluzioni ai nodi e ricostruire l'intero campo tenso-deformativo. Dalla risoluzione del sistema lineare globale si ricava il valore della variabile in ogni nodo del dominio discretizzato e, grazie alle funzioni di interpolazione, queste soluzioni nodali consentono di estendere la soluzione in modo continuo sulla totalità del dominio.

4.2 Le equazioni alla base del problema accoppiato THM e TH

Dai primi anni '80, con lo sviluppo di importanti settori di studio ingegneristici quali l'estrazione di energia geotermica (a medio o elevate profondità), lo smaltimento mediante lo stoccaggio sotterraneo dei rifiuti residui delle centrali nucleari, l'iniezione sotterranea profonda di rifiuti pericolosi, l'estrazione dai giacimenti di petrolio e gas, lo stoccaggio sotterraneo di gas naturale, i problemi termo-idromeccanici (THM) accoppiati in rocce e terreni hanno iniziato ad essere un settore di particolare interesse scientifico. In tali scenari, è inevitabile che il campo termico, meccanico e campo idraulico si influenzino a vicenda (Figura 67).

In un mezzo multifase un cambiamento nel campo delle temperature può indurre deformazioni e stress termici, cambiamenti della viscosità dinamica del fluido presente nei pori e della densità di flusso. E alla fine sia la resistenza che la densità del mezzo poroso possono essere alterate (Zhang e Cheng, 2017). Il fenomeno della convezione può cambiare la distribuzione del campo di temperatura, come anche la pressione dell'acqua contenuta nei pori e di conseguenza inevitabilmente il campo meccanico. La deformazione causata dagli stress addizionali potrà anche modificare il coefficiente di permeabilità e le proprietà termiche dei mezzi multifase, influenzando così sia il campo idraulico che termico.

L'approccio accoppiato THM è tanto più importante nei problemi di geotermia superficiale, in quanto si è visto nella definizione stessa di geostruttura energetica la compresenza di fenomeni meccanici e termici: quando si vanno a combinare le pompe di calore con le parti dell'edificio sotterranee (come pali, diaframmi, ecc.) e con le strutture sotterranee (come gli ancoraggi delle gallerie) queste ultime non supporteranno più solo le forze trasmesse, ma saranno anche utilizzati come scambiatori di calore. In tali condizioni, il problema accoppiato THM nella roccia e nei terreni agirà sull'efficienza operativa del sistema delle pompe di calore, ma soprattutto, sotto i cicli perenni di riscaldamento/raffreddamento, potrà anche influenzare negativamente la sicurezza delle componenti sotterranee e delle fondazioni (specialmente per le fondazioni in argilla morbida, in cui si può verificare il rammollimento del terreno e l'accumulo di deformazioni termiche e pressioni interstiziali). La valutazione di tutti questi effetti è alla base dello studio THM.

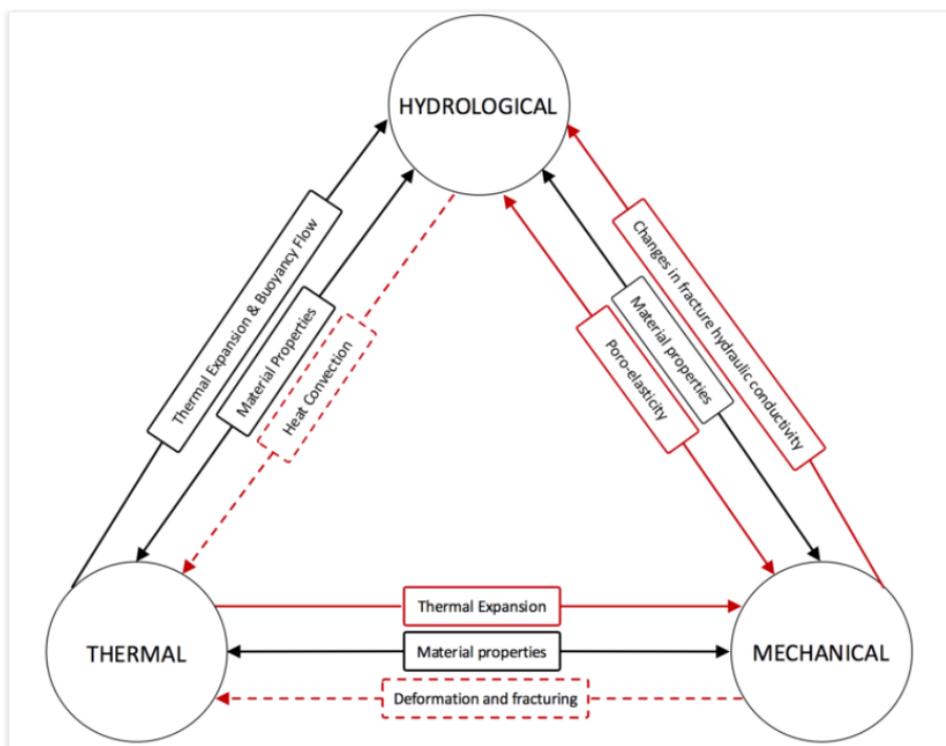


Figura 67. Processi termo-idro-meccanici accoppiati (Joulin, 2019)

Esistono già molti modelli THM che tengono in conto in maniera completa del flusso multifase nei mezzi porosi sia in scala macroscopica che microscopica, considerando gli effetti di interfaccia tra le fasi presenti. Seguendo gli studi di Biot, il primo a indagare la teoria poroelastica, molti ricercatori hanno studiato una varietà di problemi quasi-statici e dinamici e analizzato i comportamenti di accoppiamento THM di mezzi saturi. Questi studi erano basati su ipotesi di bassa temperatura, incomprimibilità, equilibrio termico di fasi solide e fluide, comportamento elastico lineare della fase solida, flusso di calore non convettivo, assenza di cambio di fase dei fluidi e proprietà costanti del materiale. Sono state, inoltre, elaborate soluzioni analitiche per questi casi di accoppiamento in quei materiali le cui proprietà risultano essere costanti: le classiche leggi di Fourier e Darcy ne sono alla base, rispettivamente per il flusso di calore o di fase liquida (Weizhong et al., 2009).

I mezzi porosi incontrati in molti settori ingegneristici sono da considerarsi insaturi; vi sono stati sviluppi recenti relativi a queste tipologie di terreno, in parte realizzati mediante esperienze di laboratorio, in parte grazie a simulazioni numeriche. E un approccio comunemente usato per la modellazione del flusso d'acqua nel mezzo insaturo è l'approccio del continuo (Weizhong et al., 2009).

La natura del sistema è complessa: il trasferimento di calore, umidità e aria nel mezzo deformabile e non saturo coinvolge l'interazione di tre processi differenti (termico, meccanico e fluido) e tre fasi differenti (solida, liquida e gassosa). Inoltre, l'acqua potrebbe essere presente non solo come fase liquida, ma anche come vapore acqueo: questo cambiamento di fase potrebbe avvenire durante il processo stesso a causa di variazioni di temperatura e carichi agenti. E' dunque molto difficile stabilire un modello matematico completo, che includa tutti i possibili processi accoppiati e vanno introdotte ipotesi semplificative quali piccole deformazioni, densità costante dello scheletro solido (assunto incompressibile, con la parte porosa ad essere la sola deformabile), il vapore acqueo viene ignorato (così che non si potranno avere cambiamenti di fase della fase liquida in quanto la pressione della fase gassosa è relativamente elevata e le variazioni di temperatura basse), la velocità dello scheletro solido viene ignorata e, infine, tra due fasi differenti si assume vi sia equilibrio termico locale (Weizhong et al., 2009).

Ai fini della presente tesi è possibile ridursi ad un approccio termo-idraulico (TH) che consideri i flussi idraulici e quelli termici, trascurando lo studio meccanico, che dovrebbe essere inglobato nel caso si volessero studiare le deformazioni e tensioni indotte nel sistema. E' necessario scrivere le equazioni matematiche per la soluzione del problema termo-idraulico:

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

Le prime due sono legate all'aspetto idraulico del problema, mentre la terza si legherà ai fenomeni di scambio termico.

4.2.1 Processo Idraulico

Le *equazioni di conservazione della massa*, per un terreno bifase saturo si possono scrivere come segue, rispettivamente per la fase liquida e solida:

$$\begin{aligned} -\nabla(n\rho_w v_w) &= \frac{\partial(n\rho_w)}{\partial t} \\ -\nabla[(1-n)\rho_s v_s] &= \frac{\partial[(1-n)\rho_s]}{\partial t} \end{aligned}$$

Dove:

- v_i rappresenta la velocità del fluido o dello scheletro solido (m/s);
- ρ_i è la densità di acqua o scheletro solido (kg/m³);
- t rappresenta il tempo (s), mentre n sta per la porosità del terreno [-];
- $\nabla, \frac{\partial}{\partial t}$ sono operatori matematici, rispettivamente rappresentano divergenza e derivata parziale.

Sotto l'ipotesi di fluido incompressibile, l'equazione della fase liquida diviene:

$$-\nabla(nv_w) = \frac{\partial(n)}{\partial t}$$

Se si aggiunge anche l'incompressibilità dello scheletro solido:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$$

Con ε_v pari alla deformazione di volume. Dunque si avrà:

$$-\nabla(v_i) = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$$

Suddetta equazione lega la variazione che il fluido subisce nel volume di terreno considerato a seguito di fenomeni di consolidazione o rigonfiamento, che si manifestano con variazioni di deformazioni. Se la si combina con la *legge di Darcy* che descrive il moto del fluido nel mezzo bifase:

$$v_i = -K \cdot \nabla h_i$$

Con:

- K pari alla conducibilità idraulica del mezzo poroso (coincidente con la velocità del fluido, per un gradiente idraulico unitario) (m/s);

- h_i pari al carico idraulico totale o quota piezometrica (m) espressa come somma tra la quota geometrica z e il rapporto tra la pressione e il prodotto dell'accelerazione gravitazionale con la densità del fluido $\frac{p}{g\rho_w}$.

Dopo averle messe assieme, si avrà:

$$\nabla(K \cdot \nabla h_i) = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$$

A causa della non omogeneità dei mezzi porosi, di solito la conducibilità idraulica (o permeabilità) è un tensore che mostra una variabilità spaziale e un comportamento direzionale (che causa, inoltre, condizioni di anisotropia): è il caso di falde acquifere con stratificazione orizzontale. Però, sotto l'assunzione di permeabilità isotropa, K assume una forma scalare (come la porosità n).

- **CONDUCIBILITA' IDRAULICA**

Il flusso della sola fase fluida nel mezzo poroso è descritta solitamente dalla legge di Darcy, la quale esprime la dipendenza del campo di velocità di Darcy con il gradiente del carico totale. Ovviamente, anche nel caso di geo-strutture energetiche (tunnel per il caso in esame) abbinate a circuiti di tubi scambiatori di calore con fluido termovettore, la fase liquida fa riferimento al solo liquido che circola nel terreno. La permeabilità assoluta K , contenuta nelle equazioni precedenti, rappresenta la capacità del mezzo poroso di essere attraversato dai fluidi; essa lega il gradiente di pressione alla portata attraverso due costanti: la viscosità del fluido ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) e la permeabilità/conduktività idraulica del mezzo poroso (quest'ultima usata comunemente quando la legge di Darcy è espressa in termini di quota geometrica z).

$$K = k_h \frac{\rho_f g}{\mu_f}$$

E' una proprietà dei terreni e, dunque, viene misurata in laboratorio.

- **POROSITA'**

La porosità n viene definita come il rapporto tra il volume dei vuoti V_v e il volume totale V . È una grandezza scalare e adimensionale che identifica la percentuale di vuoti nel volume di materiale poroso studiato.

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

4.2.2 Processo di Trasferimento di Calore

Si devono distinguere tre contributi presenti nel fenomeno dello scambio termico, dovuti rispettivamente al meccanismo di conduzione, convezione e irraggiamento (quest'ultimo di scarso interesse per il nostro campo di applicazione).

La **convezione** è quel meccanismo di trasporto dell'energia termica dovuto al movimento macroscopico delle particelle del fluido: all'interno di un mezzo poroso saturo, come il terreno, sarà associato al movimento della falda acquifera, per nulla trascurabile.

In un sistema termo-dinamico in cui la fase solida non si muove, lo scambio termico per convezione avviene solamente con la fase liquida la quale immagazzina calore e lo trasporta attraverso la legge:

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

Dove:

- c_w è il calore specifico del fluido [J/(kg·K)];
- ρ_w è la densità del liquido (kg/m³);
- v_i rappresenta la velocità del fluido (m/s);
- q_{conv} è il flusso termico trasferito per convezione (W/ m²);
- ΔT sta per la differenza di temperatura (K).

La **conduzione**, invece, è il meccanismo principale di trasferimento di energia termica che avviene senza essere accompagnato da scambio di materia: il calore piuttosto si diffonderà attraverso un solido, liquido o gas attraverso la trasmissione di energia tra le molecole attigue. Il fenomeno avviene quando due corpi a diversa temperatura entrano in contatto e sarà strettamente legato alla conducibilità termica λ .

Il flusso di potenza termica può essere descritto dalla legge di Fourier come segue:

$$q_{cond} = -\lambda \cdot grad(T)$$

Con:

- λ pari alla conducibilità termica (W/m·K) e il cui significato sarà descritto più nel dettaglio nel paragrafo seguente;
- q_{cond} pari al flusso termico trasferito per conduzione (W/m²);
- $T(x,y,z,t)$ che rappresenta il campo scalare delle temperature funzione del tempo e dello spazio, all'interno del volume di terreno considerato.

La legge di Fourier esprime la diretta dipendenza tra il flusso di calore e il gradiente/differenza di temperatura all'interno di un corpo: maggiore il gradiente, maggiore la quantità di calore che fluirà dalle regioni a temperatura maggiore verso quelle a temperatura minore (II Principio della Termodinamica). Poiché il flusso termico sarà diretto nel verso delle temperature decrescente, nell'equazione vi è il segno negativo.

Si può ora scrivere l'**equazione di conservazione dell'energia** che tiene in conto di entrambi i processi di trasferimento di calore e del termine legato all'accumulo di energia in regime transitorio, come:

$$\lambda \cdot \nabla^2(T) + c_w \rho_w v_i \nabla(T) - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

Dove:

1. $c\rho \frac{\partial T}{\partial t}$ si riferisce all'accumulo di calore nel volume di riferimento (J/m^3s), con:
 - $c\rho$ si riferisce alla capacità termica del terreno (J/m^3K) e si potrà scomporre con riferimento alle due fasi presenti, scrivendo $c\rho = nc_w \rho_w + (1 - n)\rho_s c_s$; il pedice (w) si riferisce alla fase liquida, mentre il pedice (s) alla fase solida e n indica la porosità.
 - $\frac{\partial T}{\partial t}$ è la derivata della temperatura rispetto al tempo (K/s).
2. $\lambda \cdot \nabla^2(T)$ è il termine associato alla conduzione (J/m^3s), con:
 - λ conduttività del terreno (W/mK) che si può scrivere distinguendo le due fasi presenti come $\lambda = n\lambda_w + (1 - n)\lambda_s$.
3. $c_w \rho_w v_i (\nabla T)$ è associato alla convezione (J/m^3s).

4.2.3 Condizioni al Contorno

La trattazione matematica del problema del trasferimento di calore non è ancora completa. Per risolvere le equazioni differenziali alle derivate parziali, infatti, sono richieste anche le condizioni iniziali e al contorno, in quanto le equazioni scritte al paragrafo 4.2.1 e 4.2.2 riguardano tutto il dominio delle temperature (e pressioni).

Fissato l'istante temporale ($t = 0$), le condizioni iniziali possono essere interpretate come una fotografia del campo delle temperature; le condizioni al contorno (che fanno riferimento alla zona di confine esterno del dominio considerato), invece, variano nel tempo e distinguono tre casi:

- Dirichlet (1° tipo): vengono specificati i valori (temperatura o pressione ad esempio) che la soluzione deve assumere su certe regioni del dominio; per i problemi termo-

idraulici ciò significa avere zone con temperature e carichi idraulici noti che siano funzione del tempo.

- Neumann (2° tipo): vengono specificati i valori che la derivata temporale prima normale, uscente dal contorno del dominio, della soluzione (densità del flusso di calore o del flusso idraulico) deve assumere ai bordi del dominio.
- Cauchy (3° tipo): equivale all'imposizione di una condizione del 1° tipo e, allo stesso tempo, del 2° tipo; specifica dunque i valori della soluzione sui bordi del dominio e i valori della sua derivata prima normale a tale regione.

A causa delle difficoltà matematiche, le soluzioni analitiche delle equazioni saranno sicuramente assicurate per i problemi 1-D (dove le equazioni dipenderanno da una singola coordinata) e i casi più semplici. Per quelli 2-D o 3-D i problemi possono essere risolti in specifiche circostanze, combinando le soluzioni ottenute per i casi monodimensionali (Brandl, 2006).

4.3 Parametri significativi per la progettazione di una galleria energetica

Il processo di trasferimento di calore nel terreno è molto complesso in quanto composto da diversi meccanismi quali la conduzione, la convezione, la vaporizzazione, la condensazione, lo scambio ionico, il congelamento e lo scongelamento. La maggior parte del trasferimento di calore avviene per conduzione (ragione per cui il parametro termico più importante sarà la conduttività termica λ) e in secondo luogo per convezione nei terreni non congelati (Brandl, 2006). La radiazione solitamente agisce con effetti trascurabili. Infine, anche il congelamento e lo scongelamento possono contribuire trasferendo una quantità di calore significativa, ma, poiché questo ciclo può causare danni alle strutture, deve essere evitato.

Nel caso specifico dei tunnel energetici si avrà uno scambio termico per convezione se si guarda il fluido che circola nelle serpentine installate nel rivestimento (e nel terreno se è presente una falda in movimento) o per conduzione nel caso di scambio di calore tra il terreno (mezzo poroso) e il rivestimento (calcestruzzo) e le pareti dei tubi scambiatori a contatto col rivestimento (Bidarmaghz e Narsilio, 2018).

Come già detto, nella maggior parte delle regioni europee, a profondità comprese tra 10-15 m e 50 m, la temperatura nel terreno assume valore costante (all'incirca 10-15 °C) e questo aspetto è di interesse nella trattazione delle condizioni al contorno per fondazioni e strutture profonde (Figura 68).

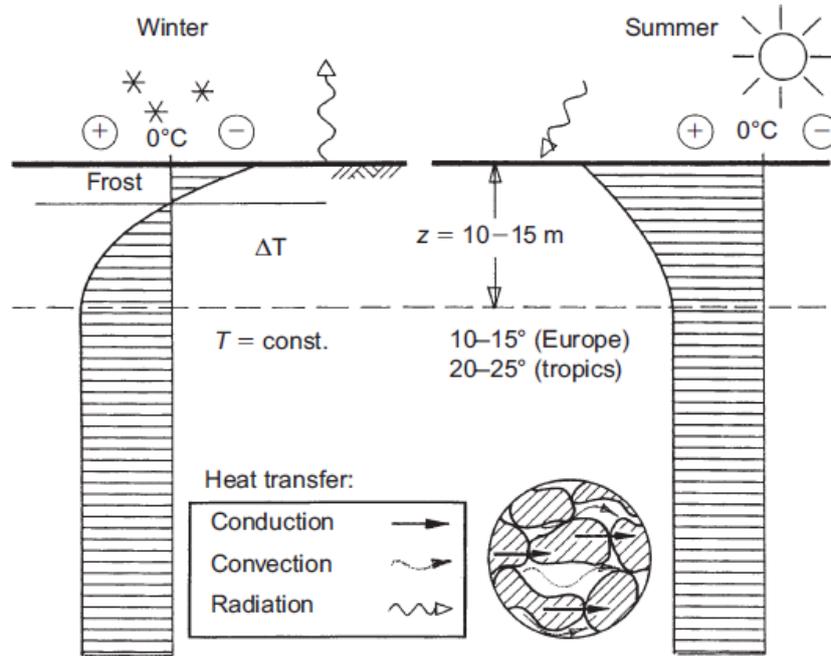


Figura 68. Trasporto di calore per profondità maggiori di 15 m (Brandl, 2006)

Quando si parla dell'utilizzo di strutture sotterranee per l'estrazione di energia geotermica è necessario evidenziare che alcune tipologie di terreni o rocce hanno proprietà migliori di altre. Al fine di generare 1 kW di calore in presenza di terreno saturo è necessaria una struttura sotterranea in calcestruzzo con un'area di scambio termico pari a circa 20 m^2 ; in presenza di una sabbia asciutta, invece, è necessario un'area di scambio termico pari a circa 50 m^2 (Brandl, 2006). Questo perché la capacità termica (e dunque la capacità di trasferire energia) cresce con il contenuto di acqua del terreno, mentre diminuisce in caso di congelamento. Ciononostante, non bisogna concludere che la falda sia sempre un elemento favorevole nei problemi di scambio termico: piuttosto la sua influenza sul caso in esame sarà stabilità a seconda delle finalità di utilizzo dell'energia.

Un mezzo ad elevata permeabilità e avente una falda ad elevato gradiente idraulico rappresenta la condizione ideale se si vuole adoperare l'energia scambiata per il singolo fine di raffreddamento o riscaldamento. Se, invece, ci si trova nella condizione in cui la struttura debba svolgere un'attività doppia di riscaldamento (nella stagione invernale) e raffreddamento (in quella estiva), le condizioni ottimali saranno raggiunte in presenza di un mezzo a ridotta permeabilità e con una falda a ridotto gradiente idraulico: in questo modo il terreno riesce a manifestare la funzione di serbatoio di accumulo, immagazzinando calore durante l'estate e cedendolo durante l'inverno.

Parametri termo-dipendenti sono la già citata **conduttività (o conducibilità) termica** λ (W/mK), la **densità del mezzo** ρ (kg/m³) e la **capacità termica** c (in J/kgK e anche lei, assieme a λ , molto significativa), che si possono trovare accoppiate nell'equazione che descrive le proprietà termiche del terreno e della falda:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Dove a rappresenta la **diffusività termica** (cm²/h), caratteristica intrinseca del corpo in grado di descrivere la propagazione di un flusso termico in condizioni non stazionarie. Va nominato anche il **coefficiente di porosità n** come fattore geotecnico da cui dipende il trasferimento di calore. Per quanto riguarda gli altri termini:

- λ mette in relazione la velocità di trasmissione del calore, per conduzione, con il gradiente di temperatura: esprime, dunque, l'attitudine del mezzo a trasmettere calore. E' fortemente dipendente dal contenuto di acqua e dalla densità del terreno: di conseguenza, anche il contenuto mineralogico del terreno e le proprietà chimiche dell'acqua contenuta nei pori andranno ad influenzarla. Confrontando alcuni valori esemplificativi di conduttività termica, poiché $\lambda_{acqua} = 0,57 \text{ W/mK}$ e $\lambda_{ghiaccio} = 2,81 \text{ W/mK}$ si può dedurre che il fenomeno di congelamento fa aumentare di molto la conduttività termica del terreno.
- c definisce la quantità di energia che il materiale deve scambiare per unità di massa e per una variazione di temperatura di 1 K. Fondamentale per soluzioni non stazionarie, è una proprietà non influenzata dalla microstruttura del terreno. Di solito, la si può ottenere dalla combinazione delle capacità termiche specifiche delle fasi che compongono il sistema, ognuna pesata sul proprio volume/ rapporto in volume.

$$c = c_s x_s + c_w x_w + c_a x_a \quad \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Nella formula sovrastante i pedici si riferiscono alla fase solida, liquida e gassosa rispettivamente, i termini c_i alle loro capacità termiche specifiche (assunte costanti per la fase solida e liquida), mentre i termini x_i rappresentano i volumi specifici ($x_s = 1 - n$; $x_w = nS$ e $x_a = n(1 - S)$, con n pari alla porosità del terreno e S pari al grado di saturazione).

Tale quantità può essere determinata in laboratorio e, come visto in precedenza per la conducibilità termica λ , essendo $c_{acqua} = 4186 \text{ J/kgK}$ e $c_{ghiaccio} = 1884 \text{ J/kgK}$, la capacità termica specifica del terreno diminuirà in caso di congelamento, mentre aumenterà con il contenuto di acqua.

- Avendo parlato della capacità termica specifica (o calore specifico) c , sembra naturale completare la trattazione definendo anche la capacità termica C , ad essa naturalmente associata. Mentre il calore specifico c è una grandezza specifica di ogni sostanza, la capacità termica C si focalizza su un corpo di massa m non necessariamente unitaria. Essa può essere definita come prodotto della capacità termica specifica c e la massa m del corpo o, equivalentemente, come

rapporto tra il calore Q scambiato dal corpo e la differenza di temperatura ΔT a seguito della cessione o assorbimento di quel calore. Si misura in J/K e rappresenta la quantità di calore necessario per elevare di un grado la temperatura di un corpo.

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

In condizioni di breve termine, è solo la componente liquida ad entrare in gioco nello scambio termico; a lungo termine, invece, possono avvenire fenomeni di consolidazione o riduzione di volume (per carichi esterni agenti o per eccessive sottrazioni/perdite di calore) e gli effetti sulle componenti solide del terreno non saranno più trascurabili: bisogna tenere conto che ci potrebbero essere cambiamenti nella partizione delle singole componenti nel volume complessivo del solido.

I valori di conducibilità termica, per problemi complessi, andrebbe assegnata sulla base di test di laboratorio (in condizioni stazionarie e non) o in sito (il Thermal Response Test si è mostrato essere sufficientemente adeguato) nei quali una porzione di terreno viene sottoposta ad un gradiente di temperatura. Nel caso, invece, si debba fare un design preliminare di strutture energetiche complesse o di sistemi convenzionali geotermici, la si può ottenere con sufficiente accuratezza dai diagrammi mostrati in Figura 69, tenendo in considerazione il contenuto di acqua, la densità di saturazione e la tessitura del terreno.

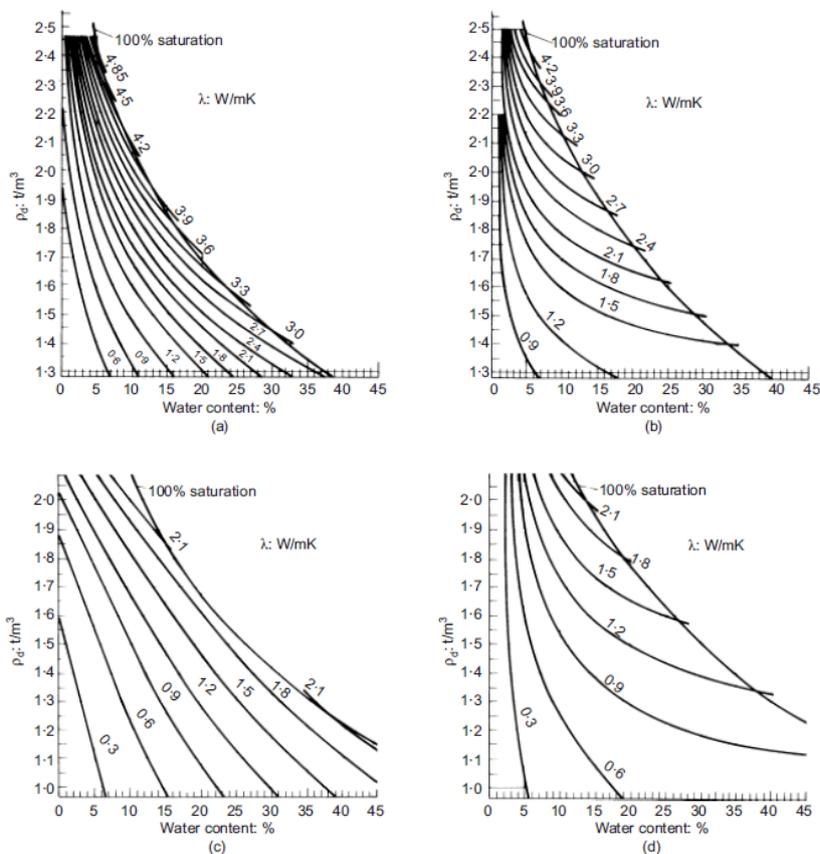


Figura 69. Conducibilità termica vs densità secca e contenuto d'acqua per un terreni: a) a grana grossa ghiacciati, b) a grana grossa non ghiacciati, c) a grana fine ghiacciati, d) a grana fine non ghiacciati (Jessberger e Jagow-Klaff, 1996)

4.4 Analisi numerica e generalità del codice di calcolo

FEFLOW

Nel valutare gli effetti delle acque sotterranee sugli scambiatori di calore a circuito chiuso il dettaglio della modellazione dei tubi a U è un fattore importante nell'impostazione di un modello di simulazione. La temperatura del fluido di scambio è influenzata dai carichi termici transitori e dai processi di trasferimento di calore nel sottosuolo nell'intorno della perforazione.

Numerosi sono i codici disponibili in commercio e per lo svolgimento di questo caso studio è stato adottato il software FEFLOW. Questo programma di calcolo è in grado di simulare il flusso delle acque sotterranee, il trasferimento di massa e calore nello spazio e per mezzi porosi multifase e fratturati. È stato sviluppato nel 1979 dall' Institute for Water Resources Planning and Systems Research Inc. di Berlino, recentemente diventato parte del DHI Group.

Attraverso un'analisi agli elementi finiti, il programma va a risolvere l'equazione di flusso delle acque sotterranee in condizioni sature e insature, così come il trasporto di massa e calore, permettendo di analizzare i flussi termici e idraulici mediante un approccio termoidraulico accoppiato. Con queste capacità è possibile analizzare problemi legati al flusso di falda ed alle interazioni con le opere sotterranee in condizioni complesse e molto varie: pertanto si presenta soprattutto indicato per affrontare aspetti termoidraulici nei problemi di ingegneria geotecnica. Risulta essere particolarmente performante anche in altri campi quali il trasporto di inquinanti con densità variabile (rilevante in particolare nella simulazione di trasporto della fase miscibile degli idrocarburi) e nello studio dell'idrodinamica dei pozzi, anche quando questi sono sottoposti ad elevate condizioni di stress.

Con riferimento al trasporto di calore, il codice consente un approccio completo allo studio della risorsa geotermica, offrendo in particolar modo una serie di funzionalità specifiche per impianti sia a ciclo aperto che a ciclo chiuso in fase di progettazione, gestione ed ottimizzazione.

Grazie a questo codice di calcolo si possono simulare complessi e multidimensionali sistemi fisici, evitando l'eccessiva semplificazione che si ha nei modelli analitici, così da ricavare risultati che possono essere fedelmente confrontati con le situazioni reali. In questa tesi è stato adottato il software agli elementi finiti FEFLOW® anche per via della maggiore libertà che i programmi FEM garantiscono sulla scelta delle zone di infittimento dei nodi nel momento in cui si va a discretizzare il dominio e si va a rappresentarlo con una certa mesh.

È, inoltre, dotato di avanzate capacità di simulazione, al punto che è anche possibile imporre condizioni al contorno dinamiche, facendo variare le condizioni al contorno nel nodo/elemento stesso in funzione dell'andamento dell'analisi: funzionalità particolarmente utile per la simulazione di opere in gallerie o lavori in cava.

5. STUDIO NUMERICO DELL'ATTIVAZIONE TERMICA DELLA GALLERIA DI BASE

Nel presente capitolo ci si occuperà della descrizione delle principali funzionalità del programma FEFLOW per poi spiegare come si è costruito il modello, la discretizzazione del dominio e scelta della mesh, gli elementi del software adottati per le serpentine, le condizioni iniziali e di contorno imposte e le proprietà dei materiali assegnate a tutti gli elementi (terreno, fluido, rivestimento, malta, isolante e aria presente nell'ambiente interno alla galleria) ed, infine, le variabili analizzate e il tipo di analisi da effettuare. La sua interfaccia grafica (GUI) permette di costruire un modello georiferito, simulando il trasporto di calore o di massa a partire da dati spaziali esistenti; dopo aver aggiunto le opportune condizioni al contorno e svolto le simulazioni necessarie, si procederà infine all'interpretazione dei risultati.

Con l'utilizzo di modelli numerici vi è un'inevitabile crescita del numero di parametri da inserire in input, poiché è possibile tenere in conto della loro variabilità spaziale; figurano, allora, risultati che sono variabili non solo nel tempo, ma anche nello spazio (a fronte, ovviamente, di un aumento dei tempi di elaborazione dei dati e di calcolo).

5.1 Geometria del modello

Innanzitutto si è utilizzato il software di disegno AutoCAD per la costruzione della geometria del modello, che può venire salvata in un file formato DXF e importata in FEFLOW (come si vede dalla Figura 72). Il codice ad elementi finiti, infatti, offre la possibilità di importare mappe e file esterni (formato. shp, .pnt, .pli, etc.), nonché di creare manualmente la geometria del problema dopo che si è scelta la tipologia di progetto che si vuole impostare (vedi Figura 70 e 71).

Se si volesse creare manualmente la geometria del problema (tramite l'opzione 'Manual domain Setup') si dovrebbe cliccare sul comando "Add Polygons" così da definire un'area chiusa e circoscritta in cui poter generare la mesh.

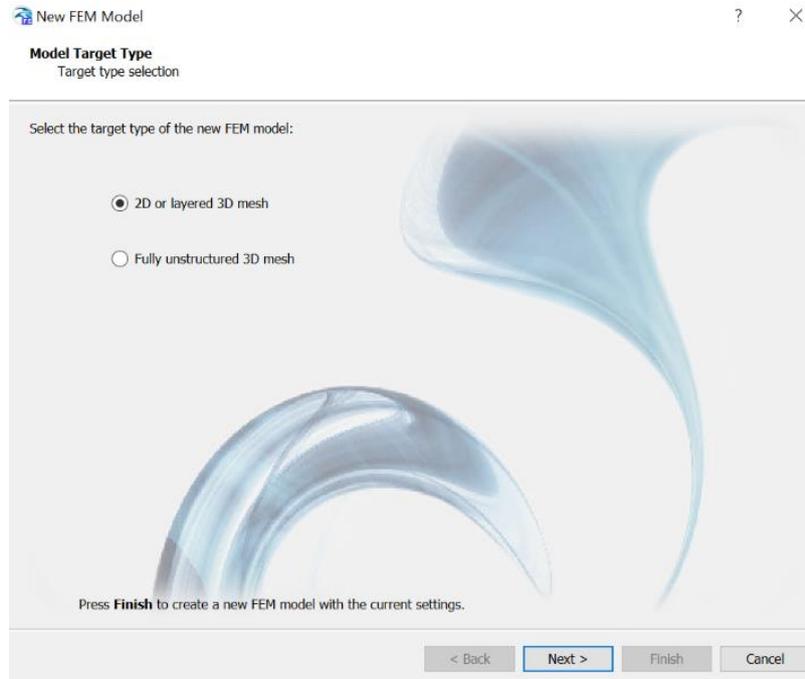


Figura 70. "New Project" in FEFLOW

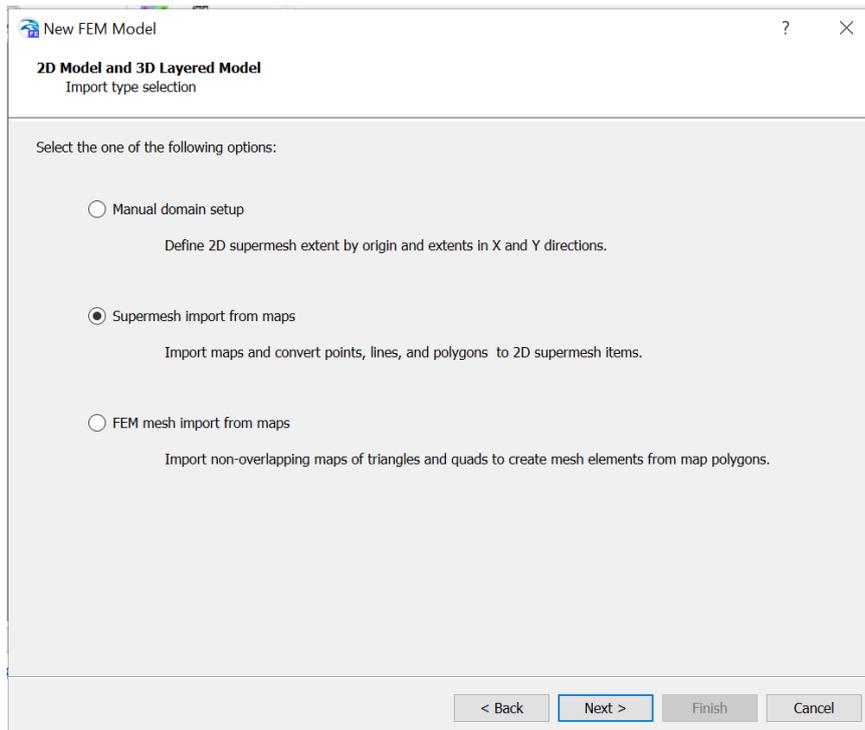


Figura 71. Supermesh importata da "Maps"



Figura 72. Importazione dei file .dxf

Nelle mappe importate sono stati disegnati sia i contorni esterni del modello (galleria esclusa), che la galleria e il suo rivestimento, integrato con il circuito di tubi scambiatori (nella configurazione AIR e ad una distanza di 10 cm dall'intradosso del rivestimento).

Nello specifico, il rivestimento e le condotte dei tubi sono state modellate in AutoCAD mediante dei segmenti che approssimassero il più possibile la reale geometria dei loro contorni circolari: questo passaggio è stato necessario in quanto il codice di calcolo FEFLOW non permette la realizzazione di elementi circolari. A causa di ciò, per modellare i bordi della galleria e l'andamento trasversale dei tubi scambiatori si sono suddivise le circonferenza in un numero di 60 segmenti.

In Figura 73 vengono mostrate le dimensioni adottate per la geometria esterna del modello (misure in metri), mentre la Figura 74 presenta i 60 segmenti che approssimano tutte le circonferenze. Come già detto il diametro interno della galleria misura 8,4 m, il rivestimento 30 cm (nel quale si sono proiettati i contorni delle serpentine, posti a distanza di 10 cm dal bordo interno del rivestimento) e il diametro esterno misura 9 m.

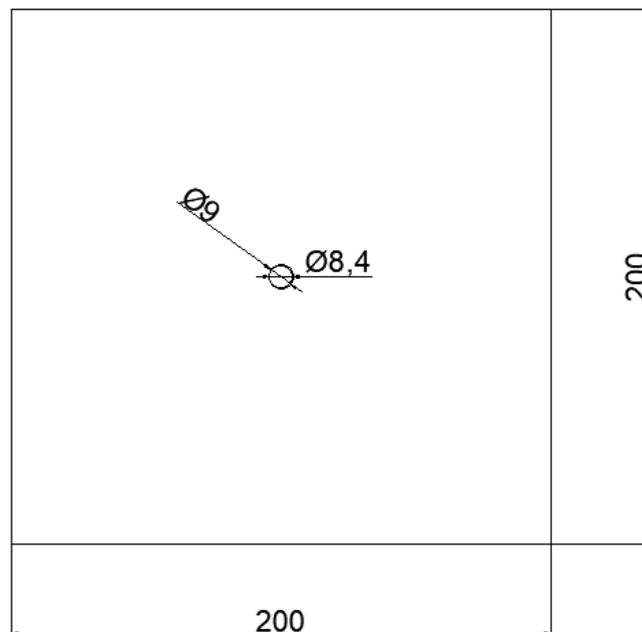


Figura 73. Dimensioni esterne del modello, diametro esterno e diametro interno della galleria (in metri)

Con l'inserimento dei file in formato .dxf, vengono creati nel programma degli elementi (punti, linee e poligoni) che andranno a costituire la "Supermesh": quest'ultima contiene tutte le informazioni geometriche necessarie per generare la mesh (Figura 75).

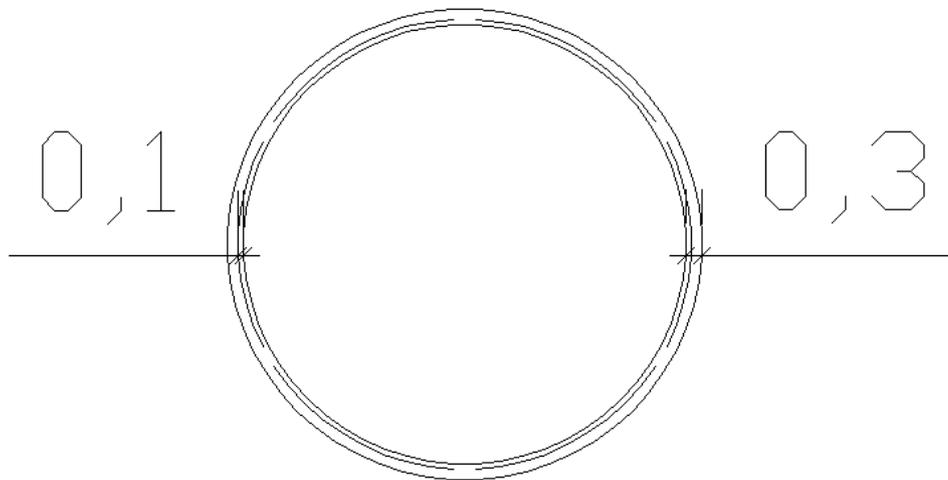


Figura 74. Sezione trasversale importata: rivestimento e serpentine (AIR), dimensioni in metri

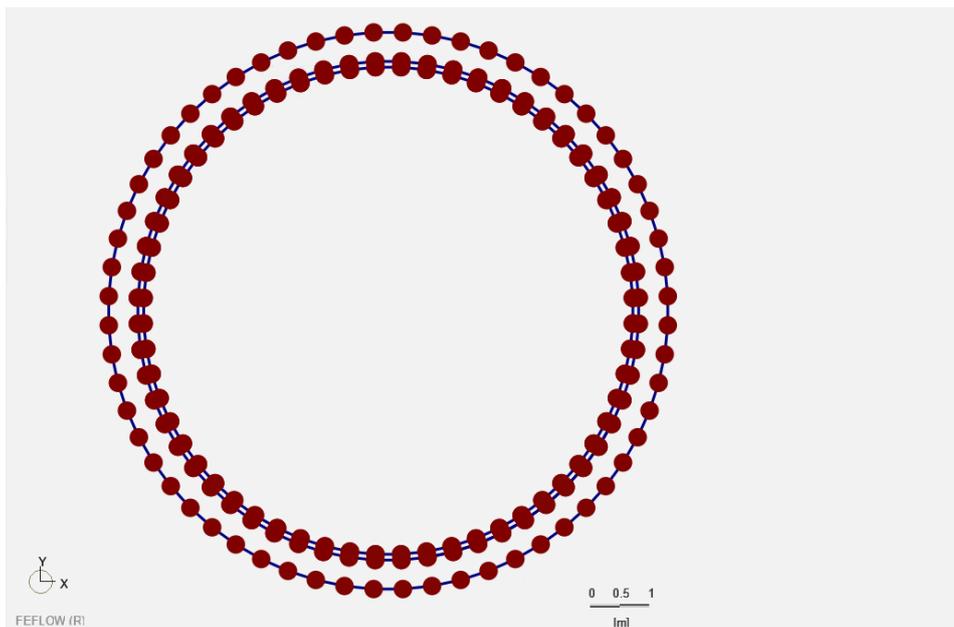


Figura 75. Supermesh di linee e punti che formano rivestimento e tubazioni di scambio della galleria

La tipologia di analisi da effettuare può essere impostata nella finestra di "Problem Settings" mostrata in Figura 76: qui sarà scelta la tipologia di scambio, che potrà essere di massa o di calore o età (quest'ultima introdotta nella versione 7.2 del software), il tipo di simulazione del flusso (standard se il mezzo è saturo o utilizzando l'equazione di Richards, se solo parzialmente saturo o del tutto insaturo) e le sue condizioni (se in regime costante o transitorio). Dalla stessa finestra di "Problem Settings" si

possono selezionare anche parametri della simulazione quali la durata della simulazione, il tempo di inizio, i valori di tolleranza e il numero massimo di iterazioni da adottare per le simulazioni effettuate.

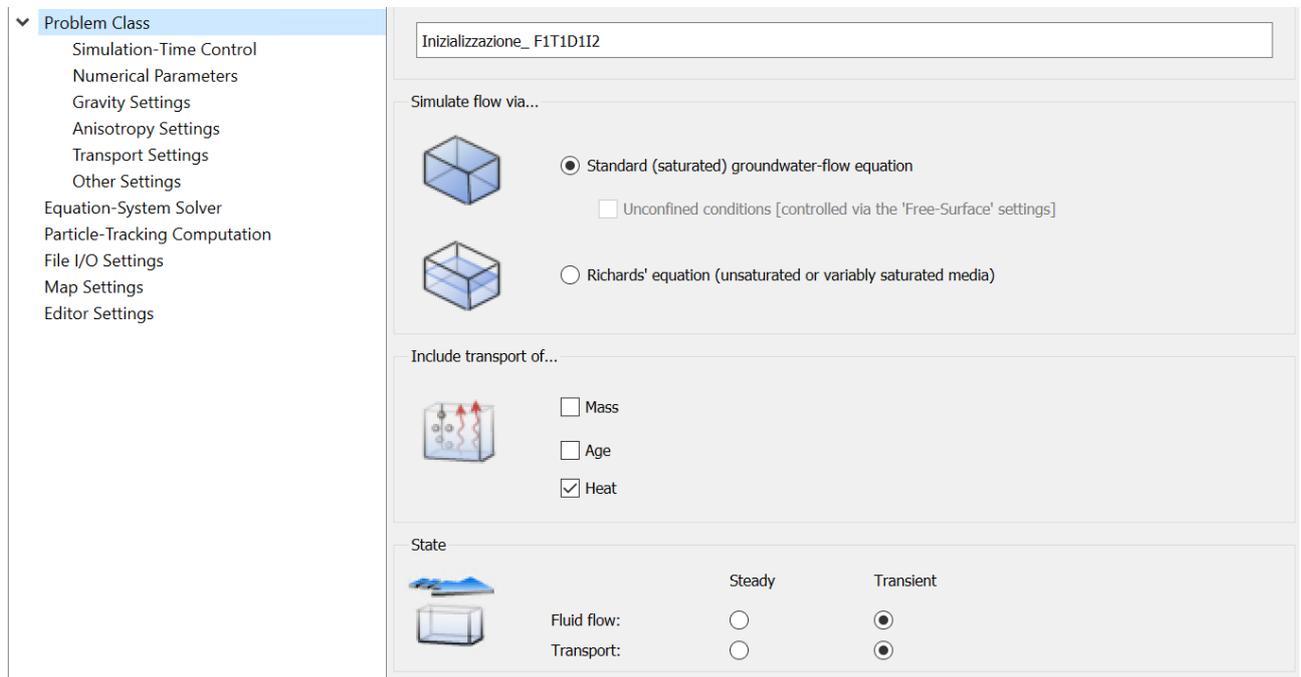


Figura 76. Finestra di Problem Settings in FEFLOW

La forza di gravità è stata impostata nella direzione delle y negative, mentre l'anisotropia del modello è stata settata nella condizione CLASSIC ISOTROPIC FORMULATION (Figura 77).

Si procede quindi con la creazione della mesh grazie al comando "Mesh Generator", potendo scegliere tra una delle tre opzioni seguenti:

- **Advancing Front:** è un semplice algoritmo di generazione mesh che produce elementi di forma molto regolare. Non supporta linee o punti come riferimenti i quali, se presenti nella supermesh, vengono ignorati nel processo di generazione. Innalza però la velocità di generazione.
- **Triangle:** codice di triangolazione sviluppato negli Stati Uniti, presenta più vantaggi. E', ad esempio, estremamente veloce e riesce a supportare combinazioni complesse di poligoni, linee e punti presenti nella Supermesh. Sono selezionabili anche delle ulteriori preferenze e limitazioni nella generazione di elementi, come il range relativo agli angoli interni (così da ottenere elementi il più possibile regolari), o il raffittimento della mesh in zone di particolare interesse.
- **GridBuilder** è un algoritmo di triangolazione flessibile che supporta poligoni, linee e punti. Come il precedente codice Triangle, permette di avere raffittimenti della mesh in corrispondenza di particolari elementi selezionati dall'utente.

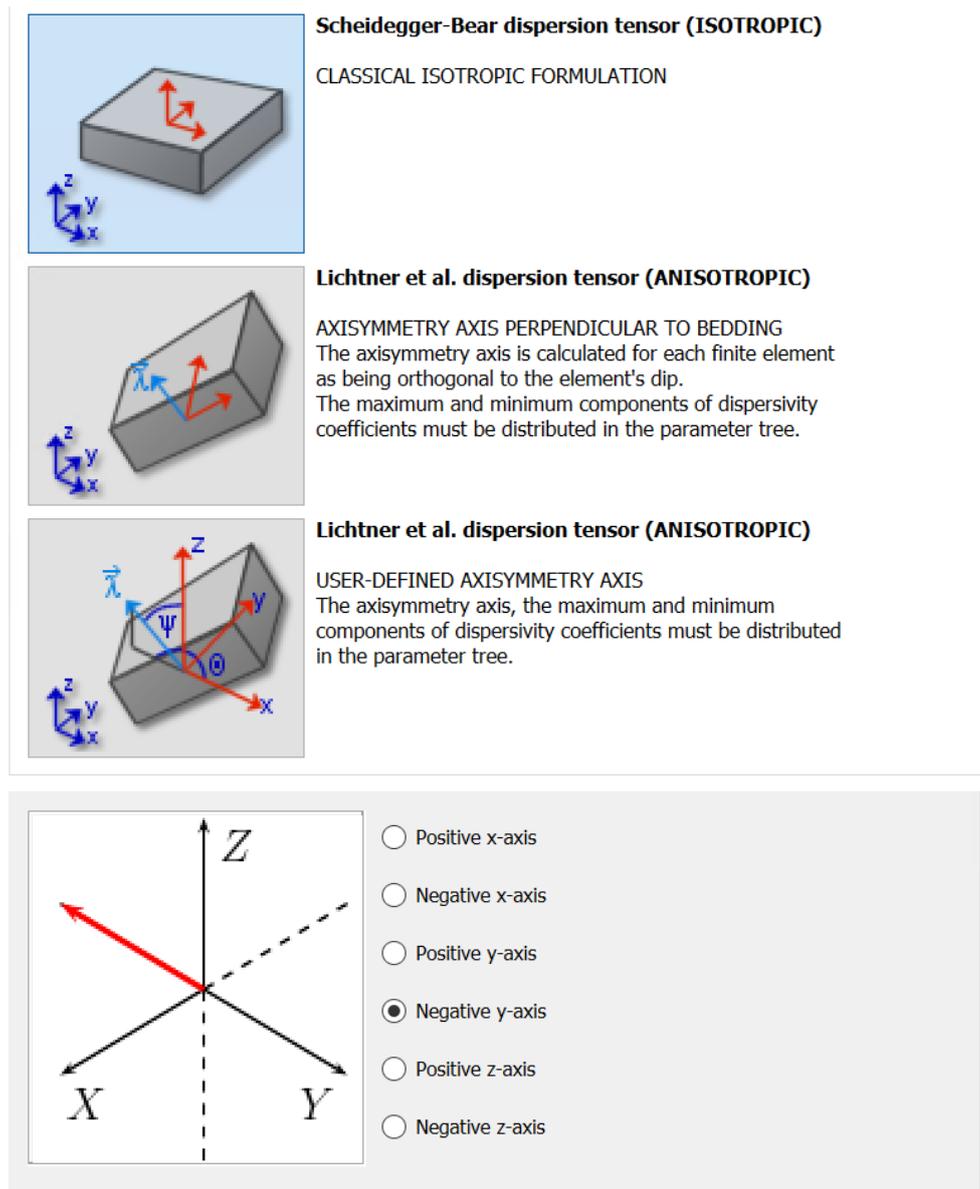


Figura 77. Impostazione della gravità e condizioni di isotropia

Si possono scegliere sia elementi triangolari, che quadrangolari; e nel caso in esame si è optato per la prima delle due opzioni, in quanto gli elementi Triangle sono ritenuti più idonei ad effettuare analisi di flusso.

La mesh, che viene generata in automatico, è stata infittita nelle zone più critiche dove si vorranno estrapolare risultati più precisi possibile dalle simulazioni: queste zone corrispondono alle parti che discretizzano il rivestimento e i tubi scambiatori in esso annegati. Per fare ciò, è stata attivata l'opzione "refine factor".

Si è comunque prestata molta attenzione, in questa fase, anche alla dimensione degli elementi in quelle stesse zone: a tal fine, in corrispondenza delle tubazioni, è stata impostata una dimensione minima di 0,1 m. In Figura 79 vi è uno zoom del tunnel per mostrare la discretizzazione effettuate dal software a seguito delle impostazioni definite per la mesh (Figura 78).

Property	Value
Quality Mesh	<input checked="" type="checkbox"/> True
Minimum Angle	20 [DEG]
Forces Delaunay	<input type="checkbox"/> False
Fill Holes	<input type="checkbox"/> False
Delaunay Algorithms	Divide-and-conquer
Quiet Mode	<input checked="" type="checkbox"/> True
Steiner Points Insertion	Allow at all borders
Mesh Anisotropy	1.00
Refine Polygons	<input checked="" type="checkbox"/> True
Edge Refine Mode	SELECTED
Polygon Gradation	2
Polygon Target Size	0.2 [m]
Refine Lines	<input checked="" type="checkbox"/> True
Line Gradation	2
Line Target Size	0.1 [m]
Refine Points	<input checked="" type="checkbox"/> True
Point Gradation	2
Point Target Size	0.2 [m]

Figura 78. Impostazioni per la qualità della mesh

Una volta ottenuto il modello bidimensionale, si può estendere tridimensionalmente tramite il comando “3D Layer Configuration”, dal menù “Edit”. Qui si dovranno definire il numero di strati (“slices”) con cui dividere il modello 3D e il loro spessore (che si rifletterà nel loro valore di quota); inoltre è possibile scegliere se la ‘fetta’ creata assume una condizione “Fixed” (per la quale gli strati creati manterranno sempre la quota di elevazione assegnata) o “Movable”.

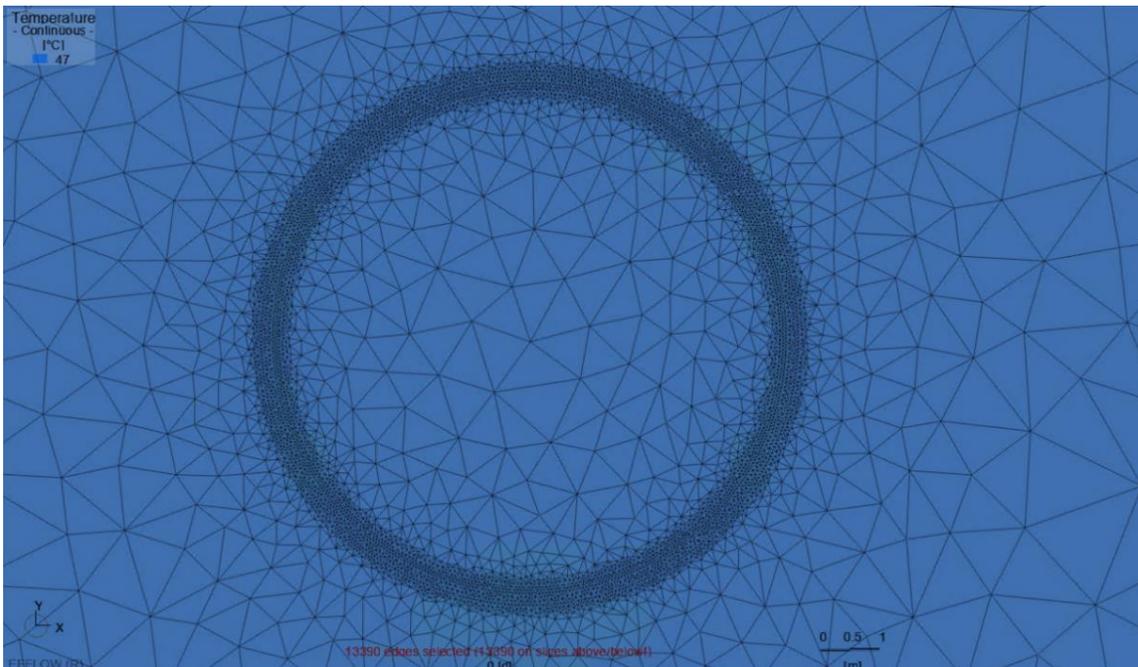


Figura 79. Discretizzazione del modello

Un esempio di creazione di modello tridimensionale, nell'ipotesi si abbiano solamente due anelli in serie, viene riportato in Figura 80.

È bene apostrofare l'importanza che assume questo tipo di configurazione: sulla base dei risultati presentati da Candito (2020) si è potuto concludere, infatti, che la configurazione con anelli in serie a due a due risulta essere la più conveniente in termini di costi-benefici (ovvero quella che permette di estrarre la maggiore potenza termica in maniera più conveniente dal punto di vista idraulico al kWh), nella maggior parte delle situazioni. I risultati di Candito (2020) hanno, infatti, evidenziato che, se non si fissasse la lunghezza della galleria da attivare termicamente, ma piuttosto fosse fissata l'energia termica da estrarre grazie all'attivazione del rivestimento, la configurazione con due anelli collegati in serie è una delle due migliori configurazioni (assieme a quella con anelli tutti collegati in serie) in termini di rapporto costi-benefici. Solo nel caso in cui le proprietà termo-idrauliche siano molto favorevoli per lo scambio termico o per brevi tratti strumentati, la configurazione più conveniente diviene quella con anelli tutti in parallelo.

Se, invece, si vogliono attivare energeticamente gallerie di grande lunghezza, allora la configurazione ottimale è rappresentata da quella in cui due anelli sono collegati in serie: anche nella presente tesi, dunque, è stato ritenuto più ragionevole considerare un modello con più anelli collegati in serie a due a due.

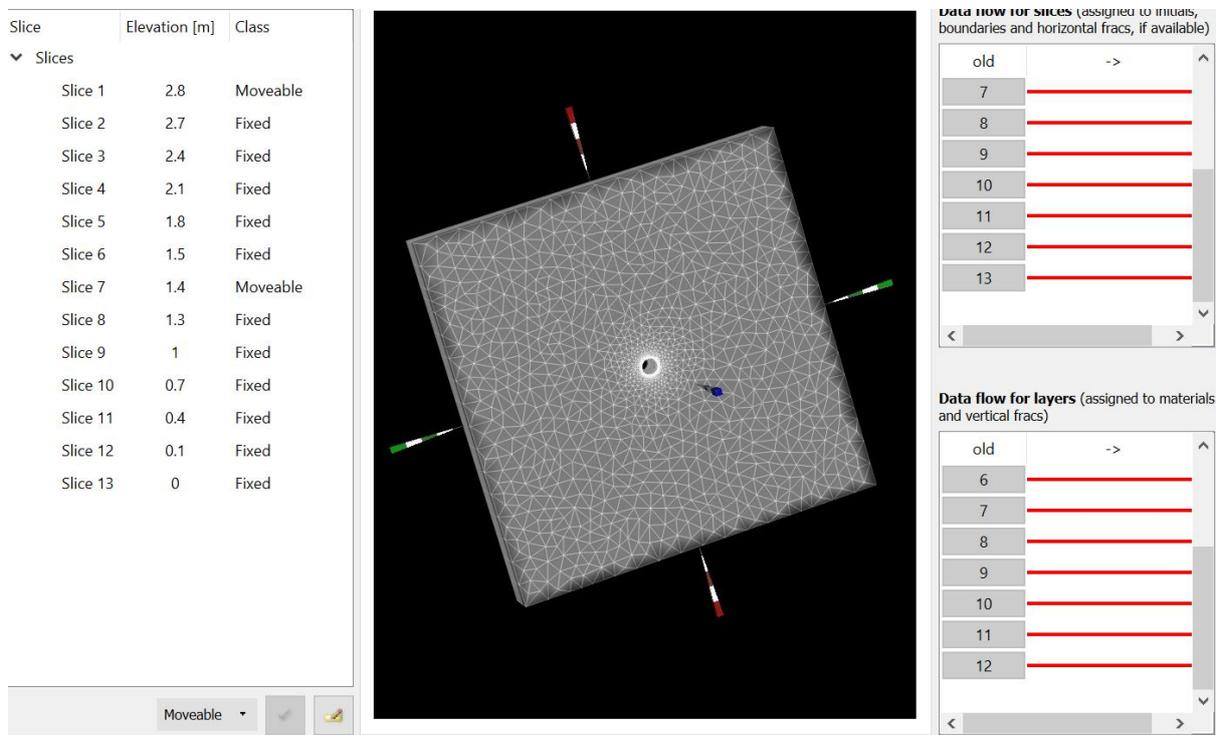


Figura 80. 3D Layer Configuration di due anelli in serie di spessore 1,4 m

Nello specifico, le simulazioni sono state eseguite su di un modello costituito da 6 anelli di spessore 1,4 m, ottenendo un'elevazione complessiva di 8,4 m (Figura 81).

Ogni singolo anello è formato da 6 conci prefabbricati in c.a. nei quali sono assicurate le serpentine di tubi scambiatori; quest'ultime presentano un interasse di 30 cm e si trovano ad una distanza di 10 cm dai bordi esterni dell'anello stesso. La tipologia di condotte utilizzate corrisponde alla tipologia ENERTUN ed è caratterizzata da sviluppo prevalente nel piano trasversale: il diametro esterno di queste specifiche condotte è preso pari a 20 mm e il loro spessore a 2 mm.

Si è considerata la sola configurazione AIR al fine di valutare l'efficienza di scambio termico delle serpentine nei conci prefabbricati con l'ambiente interno della galleria e il possibile sfruttamento delle elevate temperature agenti; la geometria delle condotte e del singolo concio in c.a. sono rappresentate in Figura 82 (misure in cm).

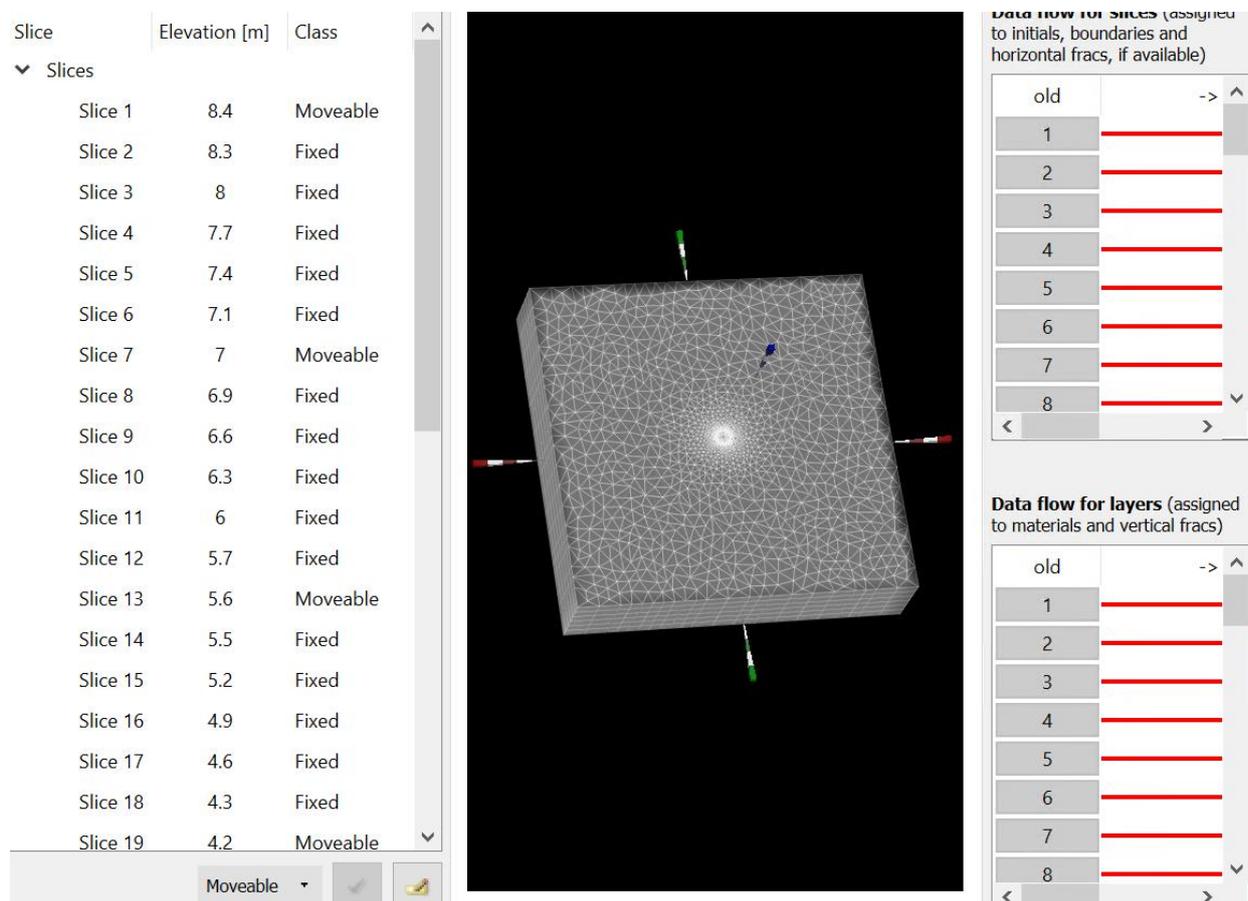


Figura 81. 3D Layer Configuration: modello adottato con 6 anelli in serie due a due

Le serpentine per lo scambio termico devono essere modellate: a tale scopo si sfrutta il comando “Discrete Features” presente nella finestra “Data” in basso a sinistra.

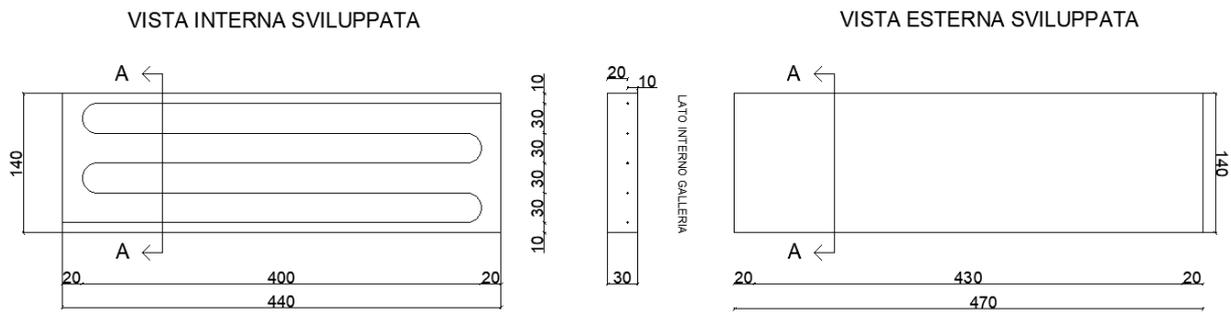


Figura 82. Vista interna ed esterna del concio prefabbricato e serpentine di tubi in configurazione AIR (misure in cm)

Il comando precedente si utilizza anche per simulare la funzione di una condotta di una sonda geotermica o di altri elementi monodimensionali utili, come ad esempio una frattura all'interno del modello; vi si può assegnare, infatti, il valore di “hydraulic aperture”, che nel nostro caso fa riferimento al raggio idraulico r_{yh} dei tubi scambiatori di calore.

Innanzitutto si sono selezionati manualmente e salvati gli elementi da attivare direttamente dalla vista 2D delle “slices”. Per facilità conviene creare dei gruppi di “selezioni”: lo si può fare con nodi, elementi, ecc., ma, nello specifico caso di elementi monodimensionali, la selezione adottata sarà riferita agli “edges”, ovvero i bordi degli elementi in cui si è discretizzato il modello. Attraverso il comando “Select Edges/Select Joint Edges” si devono cliccare tutti i bordi degli elementi di interesse e con “Store current selection” sarà possibile salvarli nel pannello Selections in basso a sinistra.

Se si clicca con il tasto destro l'etichetta di Discrete Features, avendo opportunamente attivata la selezione che si vuole vada poi a simulare la condotta di scambio termico, e scegliendo una delle tre possibili soluzioni proposte dal software (Darcy, Hagen-Poiseuille o Manning-Strickler), viene creato l'elemento monodimensionale.

Nel caso di tubazioni di piccolo diametro la legge più adatta è quella di Hagen-Poiseuille che, però, trascura le proprietà termiche del materiale che costituisce il tubo; tuttavia l'errore prodotto è relativamente piccolo date le dimensioni dell'elemento in esame. E' stato dunque possibile creare la geometria relativamente complessa delle serpentine interne ai conci, come mostrato in Figura 83.

La creazione di diverse selezioni 3D (salvate nel pannello ad esse associato, vedi Figura 84) degli elementi o dei contorni di questi è molto utile soprattutto quando (vedi capitolo 5.2 seguente) si andranno ad assegnare le proprietà termiche e idrauliche di ogni elemento (terreno, isolante, ecc.), nonché le condizioni al contorno.

5 - Studio numerico dell'attivazione termica della galleria di base

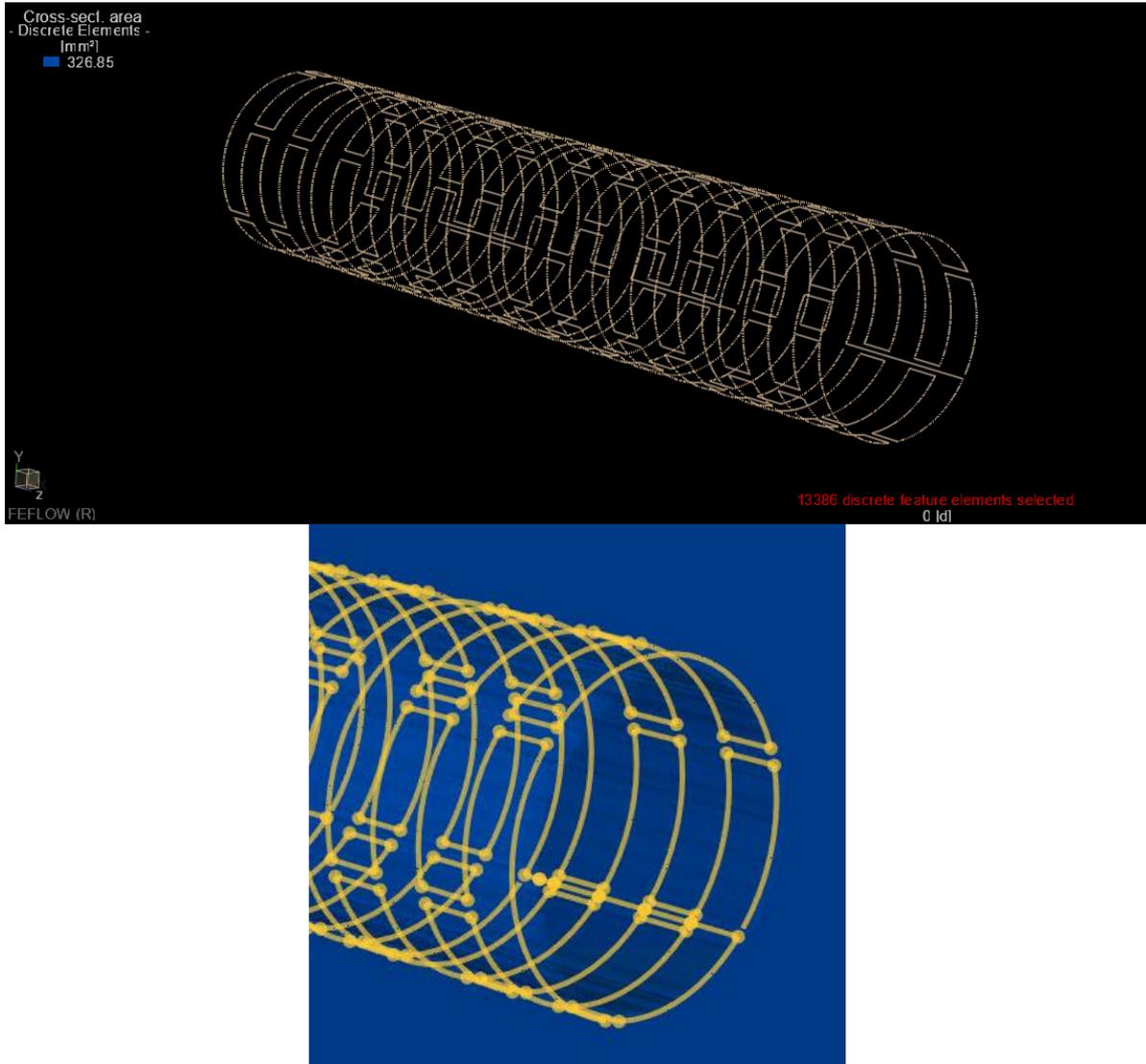


Figura 83. Rappresentazione 3D delle 'Discrete Features'; (in alto) e dettaglio degli 'Edges' dei primi due anelli (in basso)

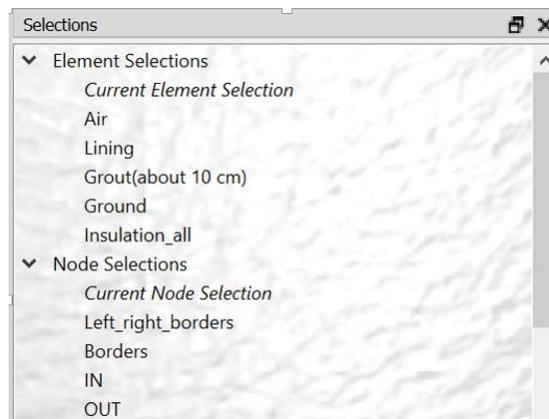


Figura 84. Selezioni degli elementi salvate-materiali

5.2 Proprietà dei materiali

Si è scelto di studiare una porzione della galleria tale da comprendere tutti gli elevati valori di temperatura presenti nel massiccio dell'Ambin: la zona si estende per 10 km (da pk 42 a pk 52) e racchiude il confine di Stato italo-francese (Figura 85).

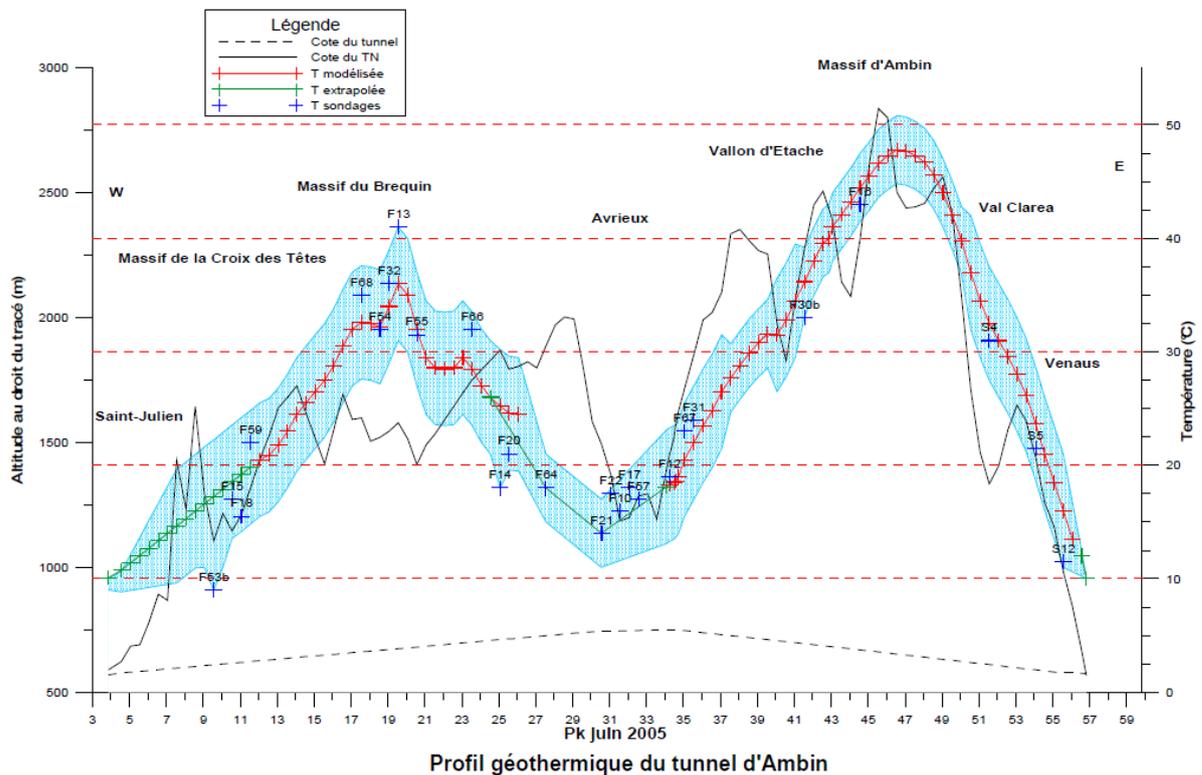


Figura 85. Profil geotermico per la porzione d'interesse (dal 'Modello geotermico' - LTF, 2010)

Come già detto, si tratta del complesso di Clarea (che assieme al complesso d'Ambin ricade esattamente nella "Briançonnaise Zone of Ambin Massif") e sarà caratterizzata principalmente da gneiss e micascisti. Il modello geotermico proposto per questa porzione fornisce temperature naturali dell'ammasso che arrivano fino ad oltre 40°C tra le pk 43 e 50 circa (valore massimo valutato pari a 47°C, Figura 86). Dagli allegati delle relazioni geomeccanica disponibile per il caso studio (AFTES - French Tunnelling and Underground Space Association - 1992) e dai risultati delle prove idrauliche in foro distinti per le diverse litologie si possono estrapolare i valori del peso specifico e il grado di permeabilità per le sezioni d'interesse:

$$\gamma = 27 \frac{kN}{m^3}$$

$$K = 4,1 \cdot 10^{-8} m/s$$

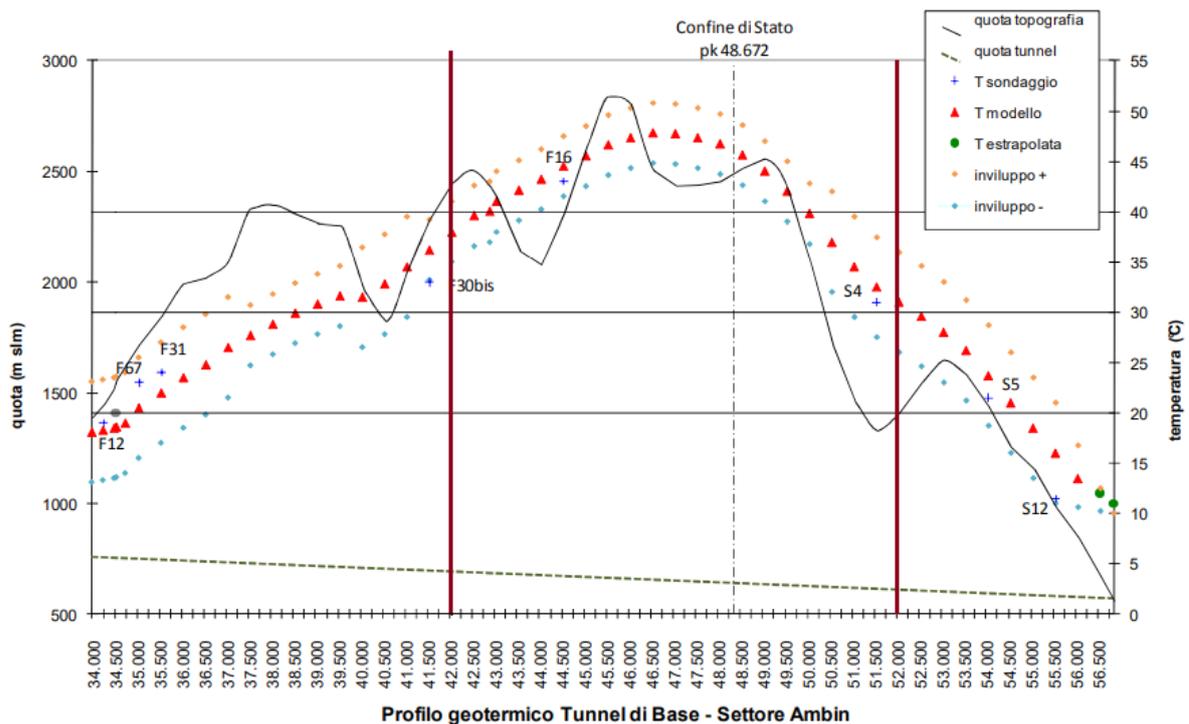


Figura 86. Profilo geotermico previsionale del Tunnel di Base tra la progressiva 34+000 e la pk 56+000 (tratta scavata in roccia) (da 'Valutazione e gestione dei rischi'- LTF, 2001)

Dagli elaborati del progetto preliminare forniti dalla LTF ("Valutazione e gestione dei rischi", 2001) è fornito uno stralcio ulteriore del profilo termico specifico per l'attraversamento del Tunnel di Base sotto il massiccio dell'Ambin e ricavato dalla modellizzazione del contesto termico rilevato per le unità tettoniche interessate dallo scavo delle opere. Questo stralcio (Figura 86) è particolarmente utile per lo studio della tesi in quanto interessa i picchetti con le massime temperature previste per l'ammasso roccioso.

A partire dal profilo riportato, è stato ricavato l'andamento delle temperature (Tabella 9) per i picchetti tra il 42.000 e 52.000 e, da questo, è stato calcolato il valore medio di temperatura da assegnare al modello (il valore medio è risultato essere di 42 °C, evidenziato nella medesima Tabella 9). Questo valore sarà impostato come condizione iniziale (insieme al carico idraulico); andranno poi valutate anche le condizioni al contorno riferite al fluido termovettore nelle serpentine (quali temperatura d'ingresso e velocità di flusso).

Si procede con l'assegnazione delle proprietà dei materiali. I gruppi di elementi creati, però, non si limitano ad un singolo 'slice', ma sono state essere estese alle parti del dominio del modello d'interesse: questa operazione è stata fatta attraverso il comando "Copy to Slice/Layer" con il quale si possono scegliere tutti e solo i layers che si vogliono, copiando anche in essi la selezione corrente.

Tabella 9. Temperature estrapolate dal profilo termico del tratto del Tunnel di Base (pk 42 - 52)

pk	T [°C]	Media [°C]
42.000	38	42.12
42.500	39.5	
43.000	40.9	
43.500	42.3	
44.000	43.2	
44.500	44.6	
45.000	45.7	
45.500	46.8	
46.000	47.3	
46.500	47.7	
47.000	47.7	
47.500	47.3	
48.000	46.8	
48.500	45.5	
49.000	44.1	
49.500	42.1	
50.000	40	
50.500	37.1	
51.000	34.6	
51.500	32.5	
52.000	30.9	

Per avere un modello il più realistico possibile, come è stato fatto nel caso della Linea 2 della metropolitana di Torino (vedi paragrafo 2.4.3) dove viene adottata la stessa tipologia di conci ENERTUN, è stato inserito uno strato di malta (circa 10 cm) tra il rivestimento della galleria e il terreno circostante e si sono assegnate proprietà isolanti agli elementi immediatamente intorno alle tubazioni che collegano gli anelli in serie. Il collegamento in serie è stato, infatti, simulato forzando le serpentine ad attraversare il rivestimento in direzione longitudinale dal punto di uscita dal primo anello fino a raggiungere il punto di ingresso del secondo anello: nella realtà infatti quei collegamenti avverrebbero al filo intradosso della galleria e non nel calcestruzzo, e sarebbero opportunamente isolati per non avere perdite termiche (vedi Figura 87, dove però si hanno anelli collegati in parallelo).

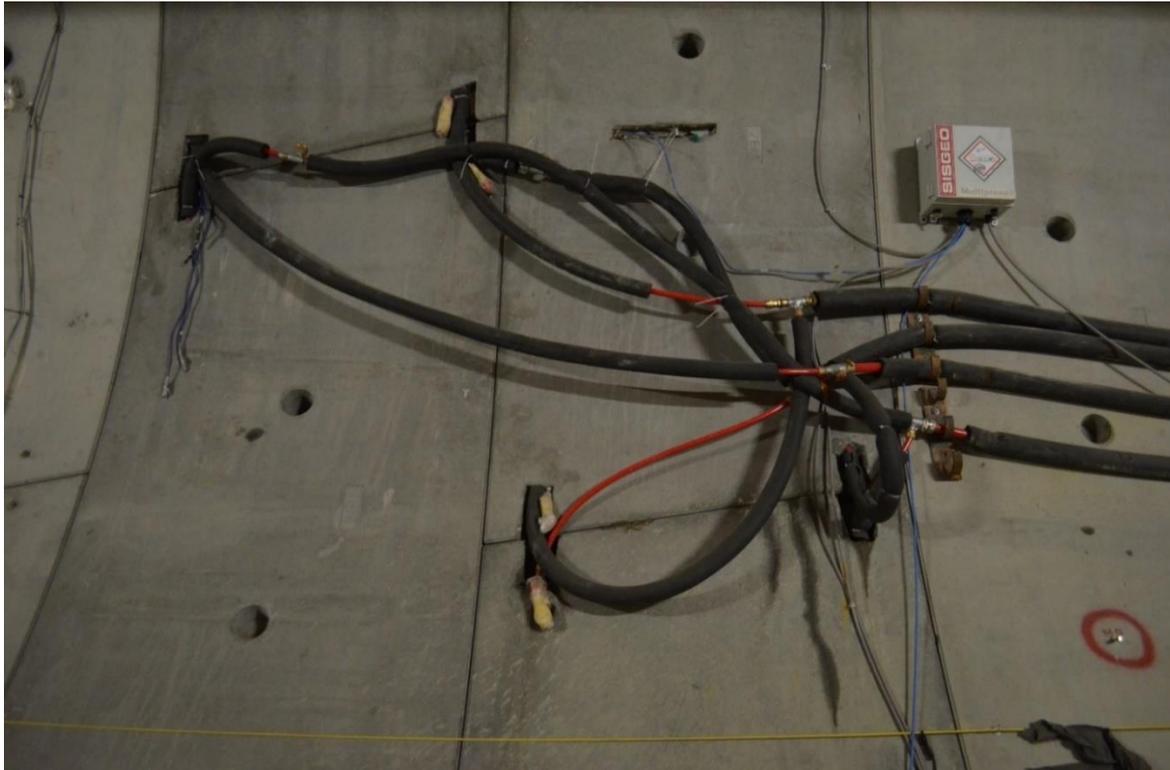


Figura 87. Isolamento delle tubazioni di scambio tra un anello e il successivo (per anelli collegati in parallelo)

Per il modello adottato nelle simulazioni queste zone a conducibilità termica nulla si troveranno, dunque, solo negli anelli dispari (nel primo, nel terzo e nel quinto) e nelle sezioni di passaggio agli anelli successivi ad essi collegati in serie (anello due, quattro e sei). Nella Figura 88 che segue sono evidenziate le zone del modello costruito in FEFLOW a cui sono state attribuite le specifiche proprietà isolanti, del materiale malta, del terreno, dell'aria interna e del calcestruzzo dei conci.

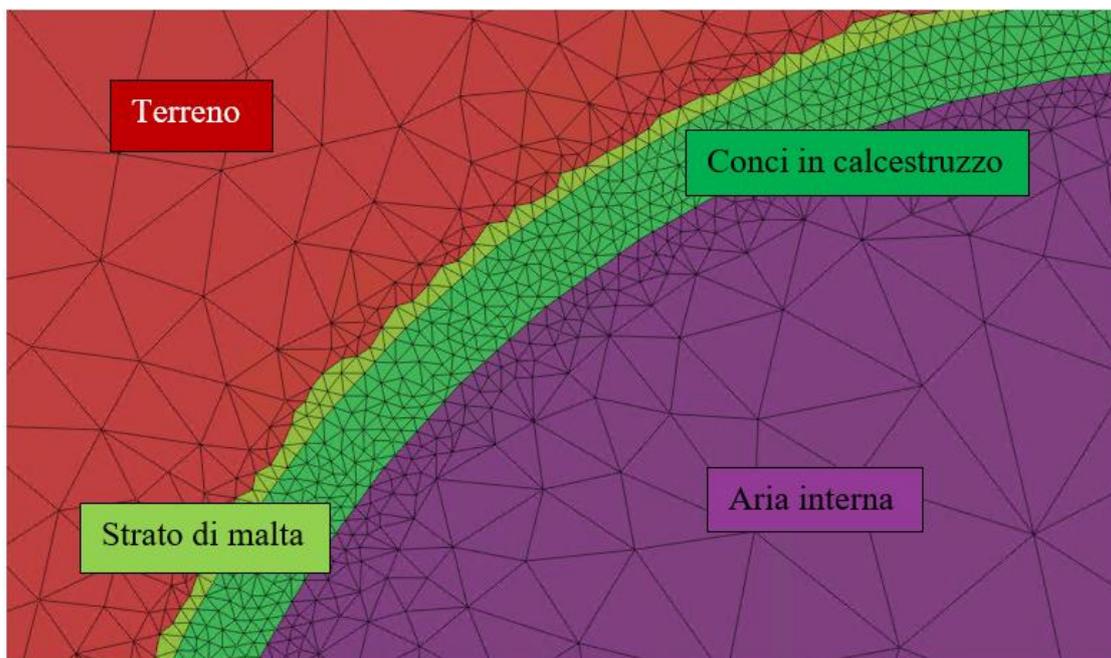


Figura 88. Differenziazione dei materiali nel modello in FEFLOW

I tratti delle serpentine, in direzione longitudinale, secondo l'asse della galleria, a cui sono stati attribuite le proprietà isolanti si possono vedere nella Figura 89 seguente.

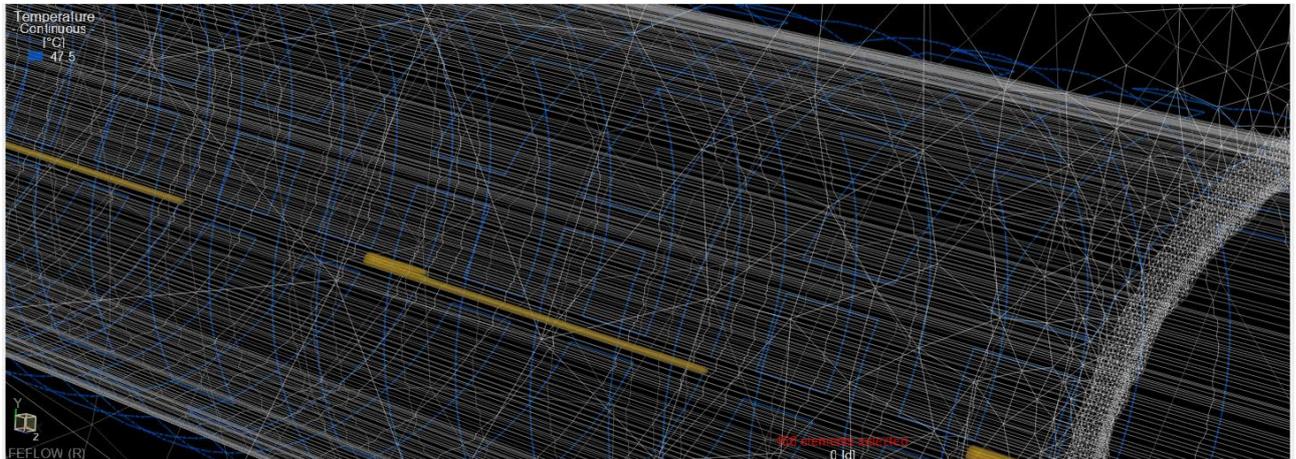


Figura 89. Elementi con proprietà isolanti nei tratti di collegamento tra le tubazioni degli anelli

Nel pannello “Data” (Figura 90) sono distinte le proprietà dei materiali, idrauliche, le condizioni al contorno ed infine le ‘Discrete Features’ e, cliccando su di esse con il tasto destro, è possibile scegliere sia l'unità di misura di queste grandezze e assegnare loro il valore appropriato.

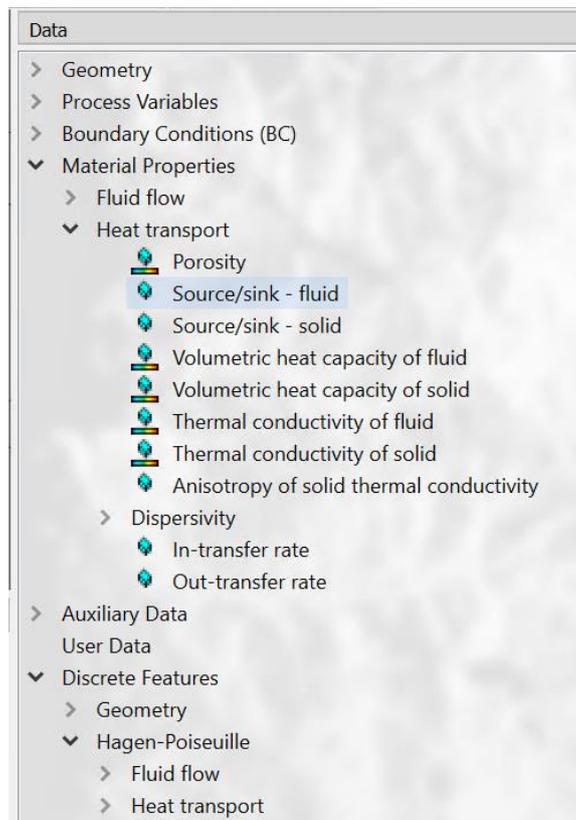


Figura 90. Pannello Data di FEFLOW contenente le condizioni al contorno e proprietà dei materiali

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

Prima di definire, però, i parametri di ogni materiale e delle tubazioni di scambio termico, si finisce di elencare le proprietà presenti, così da integrare il paragrafo 4.2 e 4.3 della sezione precedente.

- **COEFFICIENTE DI IMMAGAZZINAMENTO**

Il coefficiente di immagazzinamento S rappresenta la capacità di un acquifero di immagazzinare acqua nei pori tra loro interconnessi. Se in un acquifero si hanno variazioni del carico idraulico, l'acqua viene accumulata o rilasciata dai pori, per cui si ha un trasferimento del fluido nel tempo ed è quando questo trasferimento di massa si arresta che il sistema ha raggiunto un nuovo equilibrio con i livelli piezometrici in una condizione stazionaria.

Può, dunque, essere espresso mediante il rapporto tra il volume di acqua liberato da una porzione di acquifero di base pari a un metro quadro e spessore di un metro (quindi un metro cubo) e la variazione di carico idraulico (Δh) a cui è dovuta la liberazione o l'immagazzinamento stesso:

$$S_s = \frac{V_w}{V_a \Delta H}$$

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

- **DISPERSIONE TERMICA**

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

- **RAGGIO IDRAULICO**

Caratteristica riferita alle tubazioni nelle quali scorre il fluido termovettore, il raggio idraulico r_{yd} viene definito come rapporto tra l'area interessata dal flusso e il perimetro bagnato: nel caso di tubo circolare è pari alla metà del raggio dell'elemento.

Con riferimento al Cheap-GSHPs ('Cheap and efficient application of reliable Ground Source Heat exchangers and Pumps') database dell'Università degli Studi di Padova, che integra i valori utilizzati a livello internazionale dalle linee guida VDI (Verein Deutscher Ingenieure, Associazione degli Ingegneri

Tedeschi) e ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) per la progettazione con quelli noti da provini (direttamente raccolti da affioramenti di roccia non alterata in superficie), si sono assegnate le dovute proprietà termiche ai litotipi presenti nel modello. Gli autori hanno confrontato i risultati sperimentali con quelli forniti in letteratura (Figura 91 e 92, dove le barre color grigio rappresentano i range di valori raccomandati dalle linee guida) e consigliato un valore di conduttività termica di $2,95 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ per il litotipo gneiss e $2,53 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ per micascisti: il valore finale assegnato al terreno è stato ricavato facendo la media tra i due.

Per la capacità termica volumetrica si ha un intervallo di $2,4 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ per il litotipo gneiss e di $2,4 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ per micascisti (con un peso specifico di $27 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$); tutte le proprietà sono state riportate nella Tabella 10.

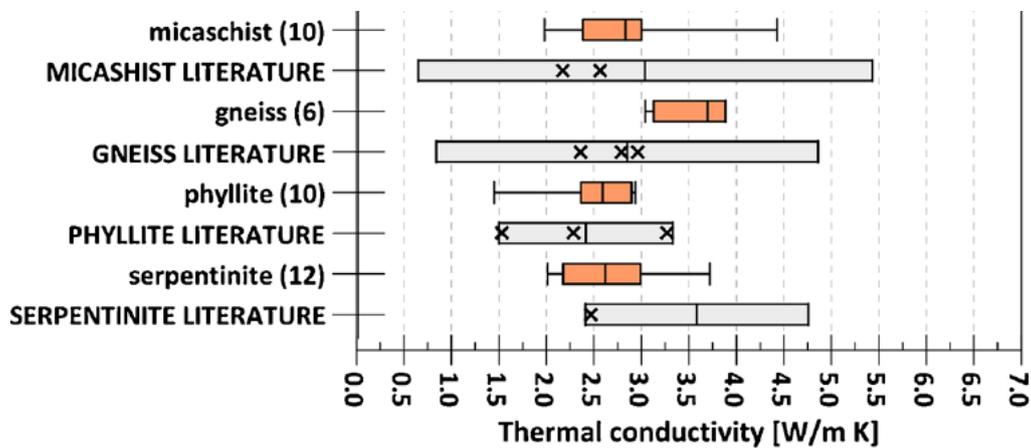


Figura 91. Valori sperimentali (barra arancione) e da letteratura di conduttività termica (database GSHPs)

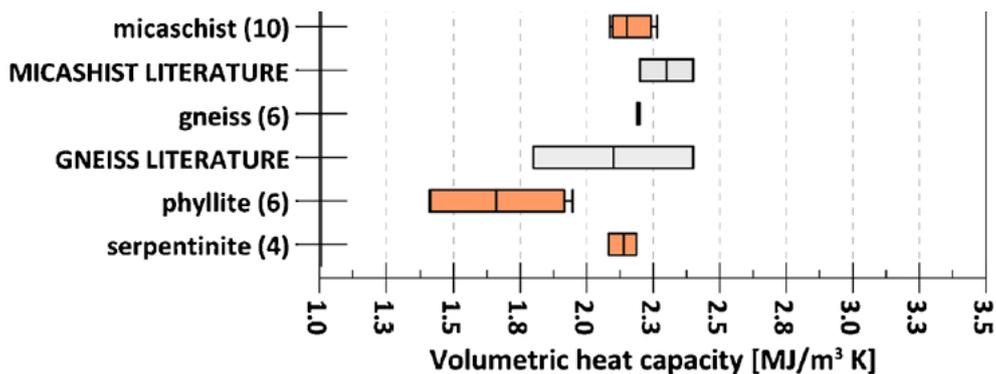


Figura 92. Valori sperimentali (barra arancione) e da letteratura di capacità termica volumetrica (database GSHPs)

Per quanto concerne i valori da attribuire alla conducibilità idraulica K (la cui definizione è stata data al paragrafo 4.2.1) si sono dovute fare alcune considerazioni. Innanzitutto, è nota dalle sezioni geologiche fornite da TELT negli allegati della relazione geomeccanica (2020), la presenza di un sistema di fratture la cui persistenza si aggira attorno ai 3-10 m con spaziatura tra 1-2 m.

Poiché una modellazione di tipo discontinuo (DEM – discrete element method), con una rappresentazione esplicita di un largo numero di fratture, non è pratica per problemi di larga scala a causa del limite dovuto ai tempi di computazione, nonché alla difficoltà nell'acquisizione di conoscenze dettagliate delle fratture in un certo sito, si deve utilizzare l'approccio del continuo equivalente (Min, 2004). Quando le masse rocciose fratturate sono modellate attraverso un continuo, un elemento chiave è la relazione tra sforzi e permeabilità (soprattutto per l'analisi accoppiata idro-meccanica HM). L'effetto locale delle fratture viene, di conseguenza, sacrificato per poter rappresentare il comportamento del modello nel suo complesso. Per giustificare l'adozione dell'approccio del continuo equivalente nei problemi idraulici in roccia fratturata, Long et al. (1982) hanno stabilito una relazione tra l'effetto scala e il 'REV', quest'ultimo definito come quel volume elementare (o range) oltre il quale le caratteristiche del dominio rimangono praticamente costanti (Bear, 1972). Hanno anche affermato che il comportamento del discontinuo è tanto più simile a quello del continuo equivalente tanto più il sistema di fratture presenti una densità elevata e un'apertura stretta, come per il caso del complesso idrogeologico di questo studio.

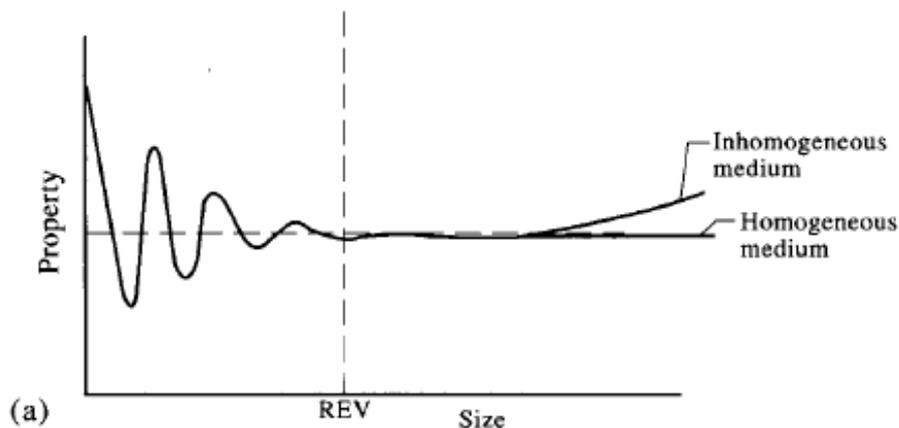


Figura 93. Concetto generale di REV per la porosità (Bear et Batchman, 1990)

Sono state svolte numerosi analisi numeriche su più modelli DFN (Discrete Fracture Network) per giustificare e cercare la dimensione di questo REV con più casi studio (Min et al., 2004; Zichao et al., 2021; Cravero e Fidelibus, 1999) che hanno dimostrato come, nel caso specifico della conduttività idraulica, il tensore K tenda a stabilizzarsi all'aumentare della dimensione del modello.

Uno studio svolto da Zimmerman et al. (2012) ha comparato i risultati di simulazioni di flusso attraverso una rete di fratture adottando sia un approccio continuo equivalente che discontinuo (lo studio si riferisce solo a rocce con bassa permeabilità). Tra i risultati, lo studio ha non solo suggerito la possibilità di ricostruire il comportamento della rete di fratture nel modello attraverso l'utilizzo di simulazioni di tipo continuo (equivalente), ma anche che i modelli continui hanno dato risultati accurati pur dove le dimensioni erano sotto le minime definitive dal REV e con un numero molto piccolo di fratture, con

l'esito di avvalorare l'utilizzo dei più semplici metodi del continuo equivalente rispetto ai modelli DFN, il cui uso è molto più limitato.

Ma esiste un modo per calcolare il REV in maniera analitica e non numerica?

Wei et al. (1995) hanno sfruttato i risultati di modelli numerici (nel caso di fratture con lunghezza costante o la cui distribuzione fosse esponenziale) per ottenere una dimensione approssimata del REV. Definita con S_t la spaziatura della totalità delle discontinuità, la dimensione del REV può essere stimata come:

$$D_{REV} = (10 \sim 50) S_t$$

Anche se fosse possibile tecnicamente, non è necessario svolgere test *in situ* su elementi di dimensione maggiore di $50 S_t$ in quanto i risultati non sarebbero più accurati di quelli forniti da test su dimensioni pari a $50 S_t$.

Se si sostituisce la spaziatura della totalità del sistema di fratture con la spaziatura media S_{a0} di più set di discontinuità, la dimensione prevista del volume elementare REV sarà più larga di prima, poiché S_{a0} è sempre maggiore di S_t . Nella realtà i sistemi di fratture non sono distribuiti a caso. Il risultato è che per le applicazioni pratiche, le dimensioni del REV saranno assunte pari a 10-20 volte la spaziatura media, secondo la relazione seguente:

$$D_{REV} = (10 \sim 20) S_{a0}$$

Da quegli stessi risultati si è visto che i sistemi di fratture con lunghezze più corte, ma ad alta densità caratterizzeranno ammassi rocciosi con permeabilità più basse, mentre sistemi con discontinuità più lunghe e meno frequenti porteranno ad avere permeabilità maggiori. Alcune soluzioni analitiche sono state proposte per predire la permeabilità di sistemi di fratture di dimensioni finite da quelli di sistemi di fratture di dimensioni infinite attraverso una funzione iperbolica di correzione.

Tuttavia, Wei et al. (1995) concludono che questa correzione non vada applicata per progetti ordinari o se la lunghezza delle fratture ecceda di 15 volte la spaziatura complessiva, poiché per il calcolo sarebbero necessari troppi dati specifici (non facilmente ottenibili) e l'ordine di grandezza della permeabilità corretta sarebbe lo stesso di quella non corretta. Assieme ad altri autori come Min (2004), l'esito è stato che per gli ammassi rocciosi si possono adottare i valori di permeabilità forniti dalle opportune prove idrauliche.

Dalla relazione geomeccanica redatta da TELT (2020), in riferimento ai lavori di realizzazione delle nicchie di interscambio e di sistemazione interna della galleria La Maddalena, sono stati presi i dati di spaziatura (come già detto), mentre per la conducibilità idraulica (valore medio statistico da 37 prove idrauliche Lugeon) ci si è riferiti alla relazione idrogeologica (lato Italia) per il complesso idrogeologico

di gneiss e micascisti, che si estende da pk 39 a 54 (TELT, 2020), e comprende anche la porzione di tunnel di nostro interesse.

Citando quanto riportato al paragrafo 5 della suddetta relazione idrogeologica: “Il grado di permeabilità è stato attribuito in funzione del grado di fratturazione dell'ammasso sia in condizioni standard di fratturazione che in condizioni particolari ovvero lungo le zone di faglia e le zone di più intensa fratturazione”, (LTF, 2010).

Poiché la spaziatura media è di circa ai 1,50 m, se si volesse calcolare il REV attraverso l'equazione sopra riportata, si avrebbe una dimensione di 40 metri: la dimensione del modello costruito in FEFLOW è di 200 metri e supera di quasi 7 volte quella predetta per il volume elementare. I risultati forniti dal software potranno essere considerati validi per quella porzione di galleria e sarà, a maggior ragione, giustificata l'adozione dell'approccio del continuo equivalente (Bear and Batchman, 1990), come anche specificato nelle relazioni tecniche redatte da TELT (2020).

Le proprietà termo-idrauliche inserite nel software sono riassunte nella Tabella 10 che segue.

Tabella 10. Proprietà termo-idrauliche del terreno

Conducibilità idraulica orizzontale	$k_x = k_z$	$[ms^{-1}]$	$4,1 \cdot 10^{-8}$
Conducibilità idraulica verticale	k_y	$[ms^{-1}]$	$4,1 \cdot 10^{-8}$
Porosità	n	$[-]$	0,02
Coefficiente di immagazzinamento	S	$[m^{-1}]$	10^{-4}
Capacità termica fase solida	$\rho_s C_s$	$[MJ \cdot m^{-3} K^{-1}]$	2,4
Capacità termica fase fluida	$\rho_w C_w$	$[MJ \cdot m^{-3} K^{-1}]$	4,2
Conducibilità termica fase solida	λ_s	$[W \cdot m^{-1} K^{-1}]$	2,74
Conducibilità termica fase fluida	λ_w	$[W \cdot m^{-1} K^{-1}]$	0,65
Dispersività longitudinale	α_L	$[m]$	5,0
Dispersività trasversale	α_T	$[m]$	0,5

Grazie allo “Studio di fattibilità tecnica ed economica” per fini geotermici eseguito per il progetto della Linea 2 della metropolitana di Torino, svolto con il coordinamento del Politecnico di Torino, si sono assegnate le caratteristiche del calcestruzzo utilizzato per i conci di rivestimento, della malta circostante e dell'isolante inserito attorno ad alcune parti delle tubazioni, riassunte nelle seguenti tabelle 11,11,13.

Tabella 11. Caratteristiche del calcestruzzo del rivestimento

Conducibilità idraulica orizzontale	$k_x = k_y$	$[ms^{-1}]$	10^{-16}
Conducibilità idraulica verticale	k_z	$[ms^{-1}]$	10^{-16}
Porosità	n	$[-]$	0
Coefficiente di immagazzinamento	S	$[m^{-1}]$	10^{-4}
Capacità termica cls	$\rho_s c_s$	$[MJ \cdot m^{-3} K^{-1}]$	2,19
Conducibilità termica cls	λ_s	$[W \cdot m^{-1} K^{-1}]$	1,5
Dispersività longitudinale	α_L	$[m]$	-
Dispersività trasversale	α_T	$[m]$	-

Tabella 12. Proprietà dello spessore di malta

Conducibilità idraulica orizzontale	$k_x = k_y$	$[ms^{-1}]$	10^{-16}
Conducibilità idraulica verticale	k_z	$[ms^{-1}]$	10^{-16}
Porosità	n	$[-]$	0
Coefficiente di immagazzinamento	S	$[m^{-1}]$	10^{-4}
Capacità termica terreno	$\rho_s c_s$	$[MJ \cdot m^{-3} K^{-1}]$	2,19
Conducibilità termica	λ_s	$[W \cdot m^{-1} K^{-1}]$	2
Dispersività longitudinale	α_L	$[m]$	-
Dispersività trasversale	α_T	$[m]$	-

Tabella 13. Proprietà dell'isolante adottato

Conducibilità idraulica orizzontale	$k_x = k_y$	$[ms^{-1}]$	10^{-16}
Conducibilità idraulica verticale	k_z	$[ms^{-1}]$	10^{-16}
Porosità	n	$[-]$	0
Coefficiente di immagazzinamento	S	$[m^{-1}]$	10^{-4}
Capacità termica terreno	$\rho_s c_s$	$[MJ \cdot m^{-3} K^{-1}]$	0,001
Conducibilità termica	λ_s	$[W \cdot m^{-1} K^{-1}]$	0,0255
Dispersività longitudinale	α_L	$[m]$	-
Dispersività trasversale	α_T	$[m]$	-

Per le proprietà da assegnare all'aria interna non ci si è riferiti ai valori forniti da letteratura ($\lambda_w = 0,0263$ W/mK a pressione atmosferica e temperatura di 27 °C, Bergman T. L. et al., 2007), in quanto fanno riferimento a condizioni di quiete, non realistiche per la sezione interna di una galleria sotterranea soggetta inevitabilmente al flusso di mezzi, effetti termici e effetti di contropressione (si rimanda al capitolo 3.6.1. per maggiori dettagli). Nel manuale di HTflux ("Hygric and Thermal simulation", software ad elementi finiti adoperato per la simulazione 2D di flusso di calore e vapore acqueo) viene descritta la conducibilità termica equivalente λ_{eq} da assegnare alle cavità di aria durante le simulazioni termiche. In pratica, è prevista la costruzione di un modello equivalente in cui la cavità d'aria viene 'riempita' con un 'materiale solido' a cui compete una specifica conducibilità termica.

Nella realtà, comunque, il trasporto di calore in questo tipo di cavità è costituito da meccanismi complessi convettivi e radiativi, che dipendono da numerosi fattori come la geometria, le dimensioni, le temperature superficiali, i gradienti di temperatura, le emissività superficiali e la direzione del flusso di calore.

Di conseguenza, per semplificare il calcolo sono stati sviluppati questi modelli di conducibilità termica equivalente, nei quali i parametri sopra menzionati vengono utilizzati per determinare quel valore specifico di conduttività andando a semplificare quei processi radiativi e convettivi. Il modello è quindi in grado di coprire alcuni di quegli effetti già elencati (dipendenza dalle dimensioni della cavità, emissività della superficie, direzione del flusso di calore, livelli e gradienti di temperatura), utilizzando una formula aritmetica semplificata che è stata elaborata sulla base di studi empirici. Inoltre, aggiunge che il valore predefinito di 0,025 W/mK è valido solo per cavità dove l'aria è immobile e, in quanto eccezionalmente basso, riflette scenari molto speciali, dove il gas è effettivamente intrappolato in cavità molto piccole con dimensioni inferiori a 1 mm. Altri programmi di calcolo ad elementi finiti che prevedono l'uso di una conducibilità termica equivalente da attribuire allo strato di aria interno alle cavità sono Quickfield e COMSOL Multiphysics® (quest'ultimo, in particolare, giustifica la crescita del valore assunto per la conduttività dell'aria, rispetto al suo valore in condizioni di quiete, tramite questa conducibilità termica equivalente, al fine di tenere in considerazione del contributo convettivo nel flusso di calore).

Nel caso studio della presente tesi, si è scelto di assegnare all'aria interna gli stessi valori assunti durante le simulazioni effettuate da Barla e Di Donna (2016); per quanto riguarda le proprietà idrauliche e termiche delle serpentine, invece, si è fatto riferimento al progetto di fattibilità tecnica e economica della Linea 2 della metropolitana di Torino sopracitata: queste vanno inserite sotto la voce "Discrete Features" del menù "Data" (Figura 89). Tutti i valori sono riassunti in tabella 14 e tabella 15.

Tabella 14. Proprietà termiche e idrauliche dell'aria interna (Barla et al., 2016)

Conducibilità idraulica orizzontale	$k_x = k_y$	$[ms^{-1}]$	10^{-2}
Conducibilità idraulica verticale	k_z	$[ms^{-1}]$	10^{-2}
Porosità	n	$[-]$	1
Coefficiente di immagazzinamento	S	$[m^{-1}]$	10^{-4}
Capacità termica aria	$\rho_w C_w$	$[MJ \cdot m^{-3} K^{-1}]$	10^{-3}
Conducibilità termica aria	λ_w	$[W \cdot m^{-1} K^{-1}]$	0,53
Dispersività longitudinale	α_L	$[m]$	5
Dispersività trasversale	α_T	$[m]$	0,5

Tabella 15. Parametri utilizzati per le tubazioni di scambio termico

Diametro esterno	d	[mm]	20
Spessore pareti del tubo	s	[mm]	2,0
Raggio idraulico	r_{yd}	[mm]	8,0
Area trasversale	A	[mm ²]	201,06
Interasse condotte	i	[mm]	300
Coefficiente di immagazzinamento	S	[m ⁻¹]	10 ⁻⁴
Capacità termica del fluido interno	$\rho_w C_w$	[MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	4,2
Conducibilità del fluido interno	λ_w	[W·m ⁻¹ K ⁻¹]	0,65

Di seguito (Figura 94) viene riportata una vista completa del modello e in cui è stata imposta la condizione iniziale di temperatura; sono, inoltre, evidenziati gli elementi monodimensionali che modellano le serpentine inserite nei conci del rivestimento.

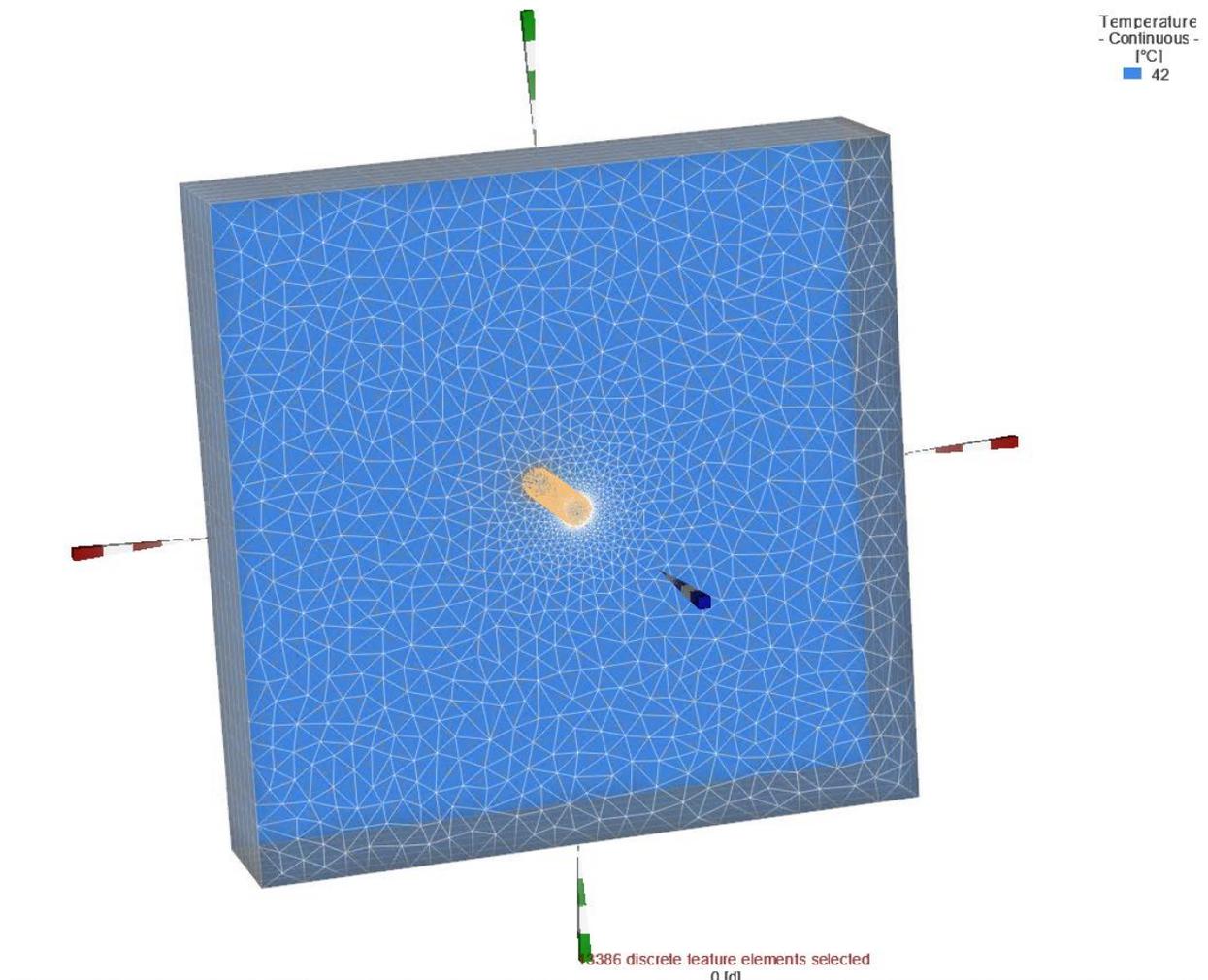


Figura 94. Visione 3D completa del modello in FEFLOW

5.3 Condizioni iniziali e al contorno

Trattandosi di analisi numeriche accoppiate termo-idrauliche, le condizioni iniziali e al contorno adottate possono essere distinte tra condizioni iniziali e al contorno termiche e condizioni iniziali e al contorno idrauliche e, per fare ciò, nel software FEFLOW si andrà a fare riferimento alla finestra del pannello “Data” denominata “Boundary Conditions” (Figura 95).

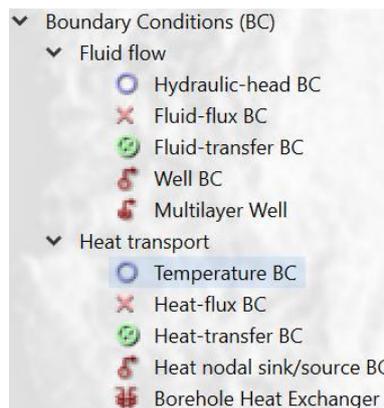


Figura 95. Boundary conditions nella finestra 'Data'

Va specificato che, a causa della presenza di fratture sparse presenti nel tratto di roccia in cui avrà luogo lo scavo (allegati della relazione geomeccanica, TELT 2020), si potrebbe pensare che avvenga un fenomeno di filtrazione d'acqua nelle fratture. Ciononostante, l'ulteriore studio svolto da TELT (2021) ha spiegato come non vi sia una diretta correlazione con la portata delle piogge: in altri termini, l'acqua che è stata incontrata non proviene dalla superficie o dalle falde, ma verosimilmente è acqua interstiziale (intrappolata nelle fessure nel corso degli anni).

Di conseguenza nella finestra di “Problem Setting” in “Edit” si è scelta l'opzione di completa saturazione del modello. Più la roccia è porosa e meno le particelle che la compongono riescono a trasferire il calore, ma se è un fluido come l'acqua ad occupare i vuoti, il valore di conducibilità termica risulta essere più alto rispetto al caso in cui sia presente solo aria: l'acqua, infatti, ha un valore di conducibilità termica di 0,6 W/mK, che è maggiore del valore di 0,026 W/mK dell'altro gas (Clauser e Huenges, 1995).

CONDIZIONI AL CONTORNO:

Nel modello sono state applicate opportune condizioni al contorno (in certi nodi) per poter assegnare dei parametri che non cambino durante la simulazione. Quelle di nostro interesse si distingueranno in condizioni al contorno termiche di 1° tipo (di Dirichlet) e idrauliche di 1° e 2° tipo:

- Si deve assegnare una temperatura di 42 °C a tutti i bordi del modello (condizione di 1° tipo di Dirichlet,).

- Avendo impostato una condizione di saturazione nel modello, affinché non siano innescati processi di flusso, va attribuito lo stesso valore di carico idraulico ai bordi laterali del modello (Figura 96). Si è assunto un valore costante di 1000 m come ipotizzato negli allegati grafici della relazione idrogeologica redatta da LTF (2010) alla quota della galleria e della sezione a cui si fa riferimento nella presente tesi.
- Velocità dell'aria interna alla galleria applicata a tutti i nodi del solo primo e ultimo layer: in questo caso al valore negativo di velocità corrisponderà un flusso entrante, al valore positivo un flusso uscente (Fluid Flux, Figura 97). Il valore numerico introdotto sarà assegnato dopo lo svolgimento di adeguate analisi parametriche e la loro interpretazione (paragrafo 5.4.1).
- Nel punto di ingresso delle tubazioni è stata imposta una temperatura costante del fluido refrigerante (Temperature BC) il cui valore di riferimento ottimale verrà dedotto solo dopo lo svolgimento di opportune analisi parametriche (spiegate nei paragrafi successivi).

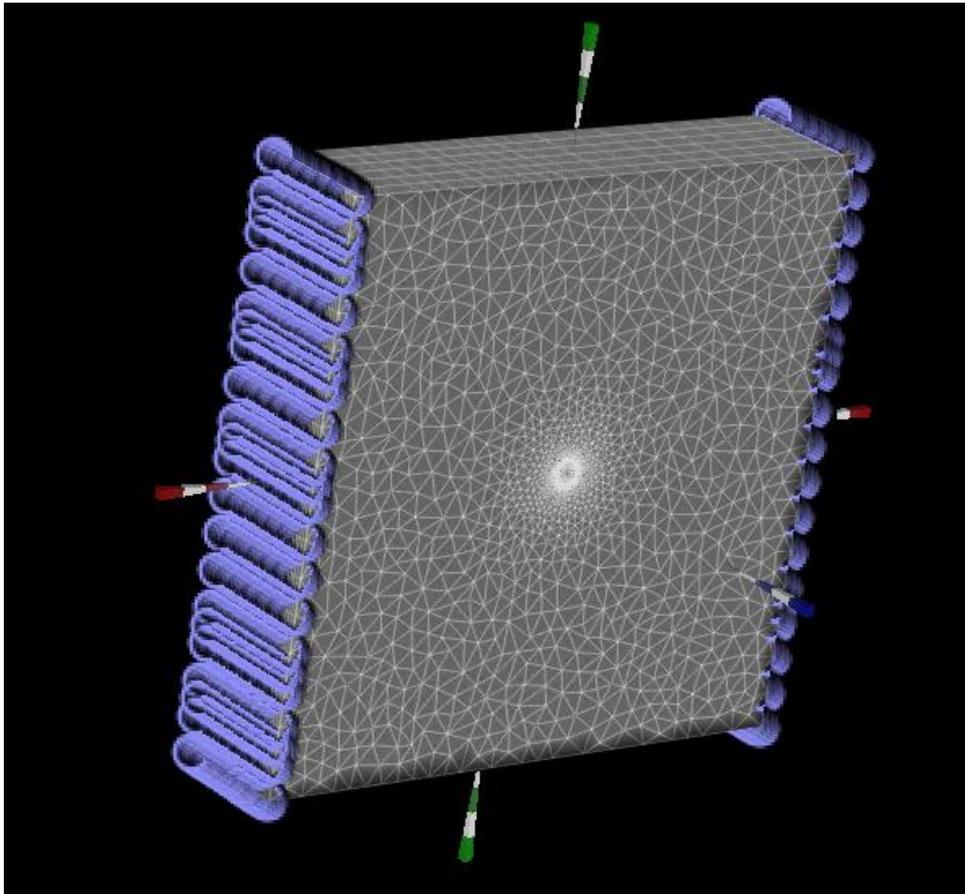


Figura 96. Condizioni al contorno (carico idraulico)

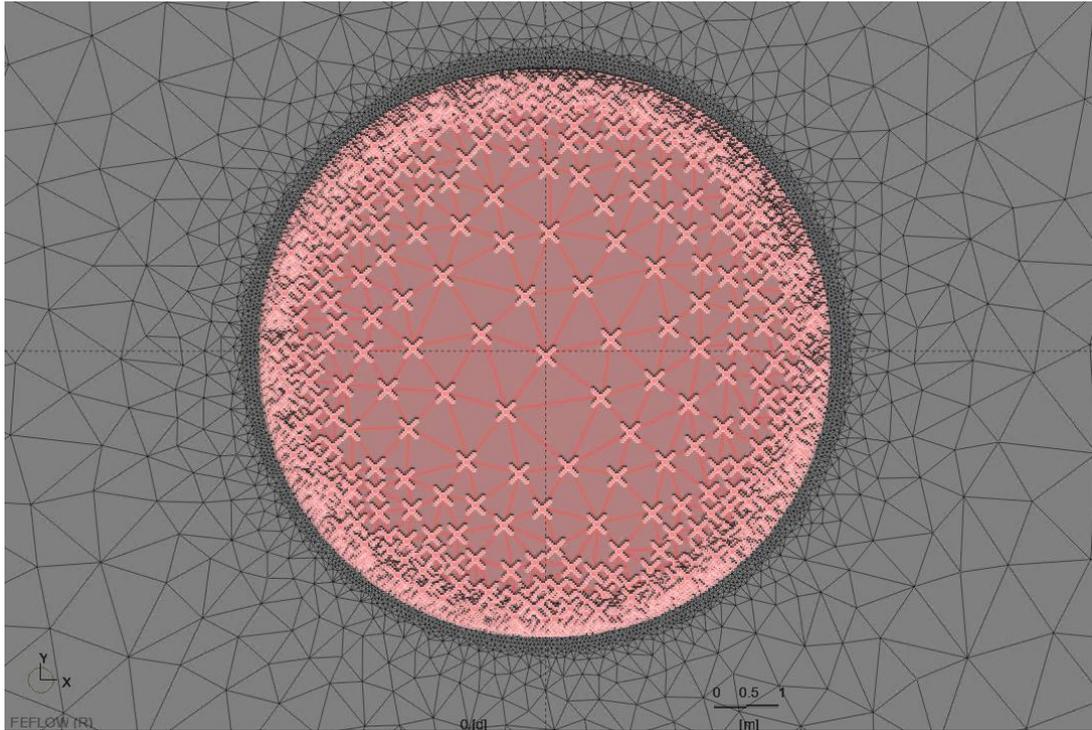


Figura 97."Fluid-flux" boundary Conditions

- Occorre assegnare una la velocità di ingresso e di uscita del fluido dai due estremi liberi delle tubazioni (Fluid Flux BC), tenendo opportunamente conto dei segni di queste (velocità negativa al nodo di ingresso e positiva al nodo di uscita delle serpentine). La potenza estraibile del singolo anello del rivestimento è direttamente proporzionale a questo parametro; ciononostante con esso cresce anche linearmente la resistenza alla circolazione del fluido e maggiore è quest'ultima, maggiore saranno i costi dovuti all'installazione della pompa di calore. Sulla base dei risultati delle analisi parametriche effettuate durante l'attivazione termica della nuova sezione dell'estensione sud della metropolitana di Torino, il valore ottimale per l'estrazione di calore mediante l'utilizzo della stessa tecnologia di tubi scambiatori e fluido termovettore è risultato essere quello di 0,4 m/s (Barla et al., 2016). Si è scelto, allora, di effettuare delle analisi parametriche variando la velocità in un range di 0,3-1,0 m/s così da studiare ed assegnare quella che vada a massimizzare la potenza termica al metro lineare estraibile dal modello costruito.
- Per poter simulare l'apporto di calore interno alla galleria dovuto al passaggio dei treni, si è deciso di inserire una sorgente di calore nel nodo centrale di ogni layer del modello pari a -12 Watt. Ciò è possibile sfruttando la condizione al contorno chiamata "Heat nodal Source": è anche qui importante fare caso ai segni del valore inserito (negativo per simulare l'apporto di calore, positivo per simulare estrazione di calore).

Poiché è attraverso le condizioni al contorno idrauliche e termiche sulle tubazioni che si simula l'attivazione dell'impianto, tali condizioni devono essere applicate solo quando si vuole avere l'impianto

acceso e non per le analisi ad impianto fermo (si è deciso di considerare l'impianto inattivo anche per lo svolgimento delle analisi parametriche sulla velocità di flusso dell'aria interna alla sezione). Nel caso in cui si voglia ipotizzare, invece, un impianto geotermico che funzioni in maniera ciclica, ci si può avvalere dell'opzione di "Times Series", così da far variare le condizioni al contorno nel tempo.

Ci sono altri modi per simulare la variazione temporale della temperatura all'interno del tunnel (ad esempio una variazione stagionale, nel caso di gallerie energetiche urbane), ovvero applicando o la condizione al contorno di 3° tipo (di Cauchy), e imponendola ai nodi del modello corrispondenti all'aria interna, o la condizione di 1° tipo (di Dirichlet). Con l'uso della condizione al contorno di "Heat transfer", è necessario introdurre il parametro di conduttanza termica ("Heat Transfer Rate", in W/m^2K) così da calcolare, istante per istante, la quantità di calore da sottrarre o apportare al modello nella porzione di dominio che modella l'aria. In alternativa, con la condizione di 1° tipo "Temperature BC", si andrebbe ad assegnare un valore prefissato di temperatura (o un suo andamento temporale) ai nodi, apportando così un afflusso di energia nel modello quando i nodi vicini hanno una temperatura inferiore o un deflusso quando hanno una temperatura maggiore. Quanto detto avrebbe valenza anche se si applicassero le due "Boundary Conditions" ai soli nodi d'intradosso del rivestimento, se si fossero disattivati gli elementi del modello rappresentanti l'aria interna o se quest'ultima non si fosse proprio modellata.

CONDIZIONI INIZIALI:

- La variazione stagionale della temperatura non influenza il modello in esame date le elevate profondità della galleria: per questo motivo l'unica condizione da imporre a tutti i nodi è un valore iniziale di temperatura di $42^{\circ}C$ (da inserire sotto la voce 'Temperature', Figura 98). Essendo questa una condizione iniziale, il profilo di temperatura non sarà costante, ma muterà durante la simulazione (ci si aspetta comunque che, alla fine, ai bordi del modello la temperatura risulti invariata);
- La seconda condizione iniziale riguarda il carico idraulico da imporre, pari a 1000 m in tutto il dominio. Considerate le condizioni imposte ai bordi destro e sinistro contorno esterno del dominio, nell'analisi non avverrà alcun movimento di falda.

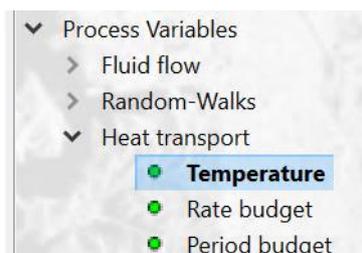


Figura 98. Data > Temperature: impostazione condizioni iniziali e interpretazione dei risultati

Infine, il programma FEFLOW permette di creare dei punti 'preferiti' nella mesh 3D chiamati "observation points", rispetto ai quali poter registrare (e anche diagrammare, dall'etichetta "Charts" sotto la voce "View") l'andamento di una delle variabili disponibili nel tempo.

L'apporto maggiore di calore interno alla galleria è dovuto, in fase di esercizio:

- Al passaggio dei treni, generando uno scambio di calore per convezione soprattutto.
- A sorgenti di calore ausiliarie riconducibili agli impianti ferroviari e non (catenaria, trasformatori, illuminazione, segnali, ecc.).
- Al calore di scarto delle locomotive dovute ai meccanismi di trazione (a causa della resistenza aerodinamica, resistenza al rotolamento, cambio di altitudine, rapporto di efficienza della locomotiva).
- All'evaporazione dell'acqua e aumento di umidità.

La circolazione dei treni modifica il flusso d'aria di base (portandone anche ad un rinnovo) causando picchi di breve durata (nella galleria di base del Löetschberg sono state registrate, ad esempio, velocità di picco dell'aria di 24 m/s) e, persino, inversione di segno che complicano ulteriormente la comprensione delle condizioni climatiche presenti all'interno della sezione. L'effetto dovuto ai treni è fortemente dipendente dalla loro frequenza operativa e dalle loro caratteristiche, come anche dalla geometria del tunnel stesso e del suo uso (Bourne-Webb et al., 2016). È per questa ragione, data la forte incertezza e la difficoltà nel quantificare il calore entrante e uscente che accompagna il flusso d'aria, che si è deciso di simulare l'apporto di calore all'interno della galleria, dovuto principalmente al passaggio dei treni, inserendo una sorgente di calore di -12 W tra le condizioni al contorno.

5.4 Analisi parametriche preliminari

Prima di analizzare l'efficienza del sistema di raffreddamento nella configurazione 'Air' adottata, si è svolta un'analisi parametrica per studiare l'influenza della velocità dell'aria dovuta al passaggio dei mezzi, così da trovare il valore più opportuno da assegnare al flusso interno. Successivamente si è effettuata una valutazione dell'ambiente interno alla galleria ad impianto fermo, per capire come varia il profilo termico a causa del continuo passaggio dei mezzi (riprodotto con la fonte interna di calore e velocità di flusso d'aria).

Una volta acceso l'impianto geotermico, si sono eseguite delle analisi parametriche sulla temperatura d'ingresso nelle serpentine e sulla velocità di flusso del fluido termovettore, per poter stimare quale potesse essere il valore migliore per sfruttare il potenziale geotermico.

5.4.1 Effetto della velocità di flusso d'aria nell'ambiente interno

Sulla base degli studi effettuati da LTF (paragrafo 3.6.1, con riferimento al solo effetto di pistonamento dei treni) è noto il limite massimo della velocità indotta da diversi treni in movimento (il valore di 15 m/s è raggiunto sia nel caso di un traffico di 8 treni l'ora che di 11).

La relazione di LTF sulla ventilazione (2013), quando tratta l'effetto pistonamento dovuto ai treni in circolazione nella galleria, ha redatto dei grafici (vedere paragrafo 3.6.1) in cui nell'asse delle ascisse vi è la posizione lungo cui si è situati nella galleria (da 0 ai 57 km di estensione del tunnel di base) e nell'asse delle ordinate vi è la velocità. Per ogni sezione assume, dunque, un valore costante di velocità dell'aria, per tutti e tre gli scenari proposti dallo studio (2 treni l'ora o 8 o 11 treni l'ora).

Si è scelto, allora, di adottare sia dei valori costanti che due 'Time series' (sarà discusso più nel dettaglio di questa opzione e della sua modalità di applicazione in seguito, nel paragrafo 5.6) per simulare la variazione nel tempo della velocità dell'aria. Per una prima valutazione, la finestra temporale indagata è stata di 10 giorni, anche a causa della prolungata durata delle simulazioni.

I valori di velocità scelti sono stati cinque, di cui uno sotto l'unità: 0,5 m/s, 3,8,10 e 15 m/s (riferirsi sempre al paragrafo 3.6.1); un "Observational Point" è stato inserito all'interno della sezione, in un nodo circa distante 2,3 metri dal punto centrale (Figura 99). Ad ognuna delle prime cinque simulazioni compete una sola delle velocità, tra quelle sopra elencate, che sarà assegnata ai nodi interni alla galleria in maniera costante nel primo e ultimo layer del modello, da un lato in valore negativo (flusso entrante) dall'altro positivo (uscite).

La sorgente di calore di 12 Watt nel centro della sezione è sempre agente in maniera continua nel tempo; per essa, trattandosi di un'energia nel tempo (unità di misura J/s), il software non permette di applicare l'opzione di 'Time series'.

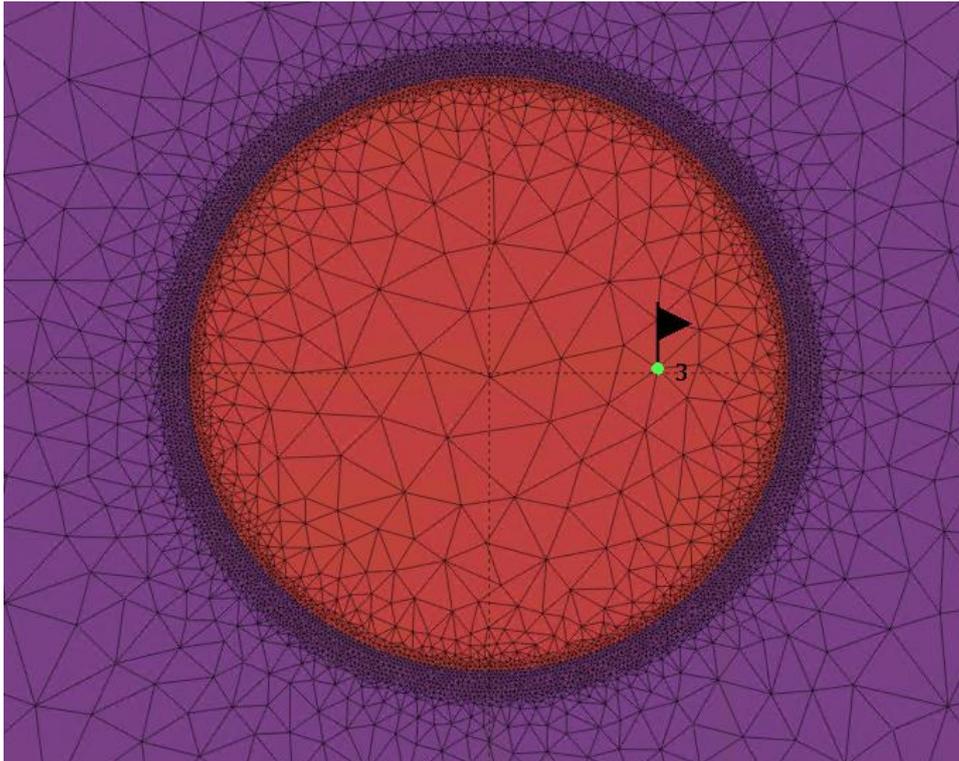


Figura 99. Punto di osservazione inserito per monitorare la temperatura di aria interna

Negli ultimi due scenari, alla velocità dell'aria è stato assegnato un andamento temporale secondo delle 'Time series' specifiche, e nuovamente un valore negativo per il primo layer e positivo per l'ultimo:

- Per quanto riguarda la prima simulazione (per comodità denominata 'v variabile A'), si è supposto di avere una variazione lineare della velocità di flusso d'aria, partendo da un minimo di 0,5 m/s fino al massimo di 15 m/s (previsto in fase di esercizio), trascorsa un'ora dall'istante iniziale. Al termine della seconda ora di analisi numerica, si ritorna al valore di 0,5 m/s (vedi Figura 100). Questo stesso andamento si ripete nel tempo in maniera continua.
- Nella seconda 'Time series' invece (chiamata 'v variabile B'), la velocità di flusso è stata assunta costante in ogni quarto di giornata (ovvero per 6 ore), variando ciclicamente tra 4 valori: 0,5, 3, 8 e 13 (quest'ultimo media tra il 15 e 10) m/s. Durante le prime sei ore la velocità sarà, dunque, costante e pari a 0,5 m/s, dalla settima alla dodicesima ora il valore salirà a 3 m/s, e così via fino al termine della giornata. Al secondo giorno (e nei successivi fino alla fine della simulazione) si manifesterà lo stesso andamento.

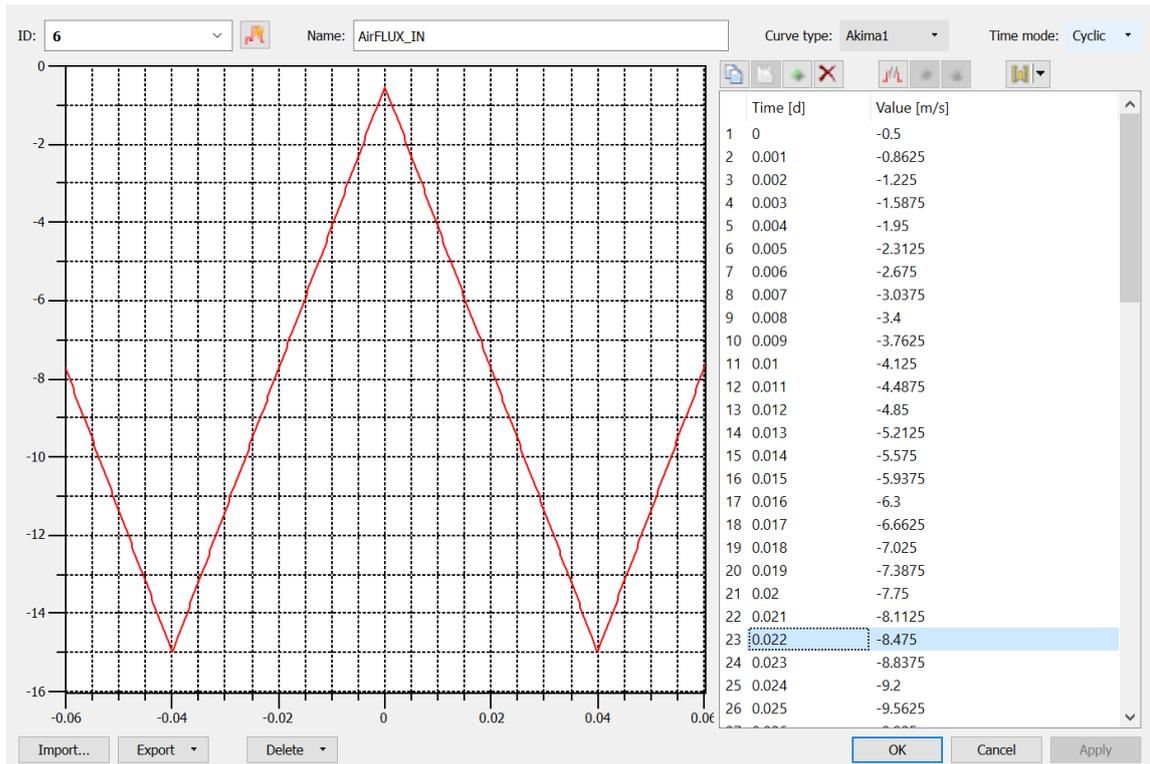


Figura 100. Prima ipotesi di 'Time series' adottata per la velocità di flusso d'aria e applicata al primo layer

Dai risultati in Figura 101, un andamento della velocità tanto più variabile nel tempo fa registrare un minore aumento della temperatura in galleria, soprattutto al prolungarsi della durata della simulazione (la differenza tra le curve dovute a velocità solo costanti nel tempo rispetto a quelle date dalle 'Time series' tende, inoltre, ad aumentare col crescere dei giorni, come si vede dalla Tabella 16). Se si sceglie che la velocità sia costante nel tempo, la temperatura registrata dopo 10 giorni è pressoché la stessa, indipendentemente dallo specifico valore assunto, e più elevata degli altri due casi.

In Tabella 16 sono mostrate le differenze tra la temperatura media (calcolata con i risultati ottenuti assumendo i 5 valori costanti di velocità) e quella registrata nel caso la velocità dell'aria avesse l'andamento temporale dato dalle 'Time series'. È evidente, allora, che all'aumentare dei giorni gli andamenti delle curve del grafico in Figura 101 tendono tanto più ad allontanarsi e, di conseguenza, i risultati saranno ancora più diversi. Ad esempio, se si confronta la temperatura media (tra i risultati avuti con le 5 velocità applicate in maniera costante) con quella registrata applicando la Time series A, tra la fine del primo e decimo giorno di simulazione, la differenza tra le due è quasi il doppio.

5 - Studio numerico dell'attivazione termica della galleria di base

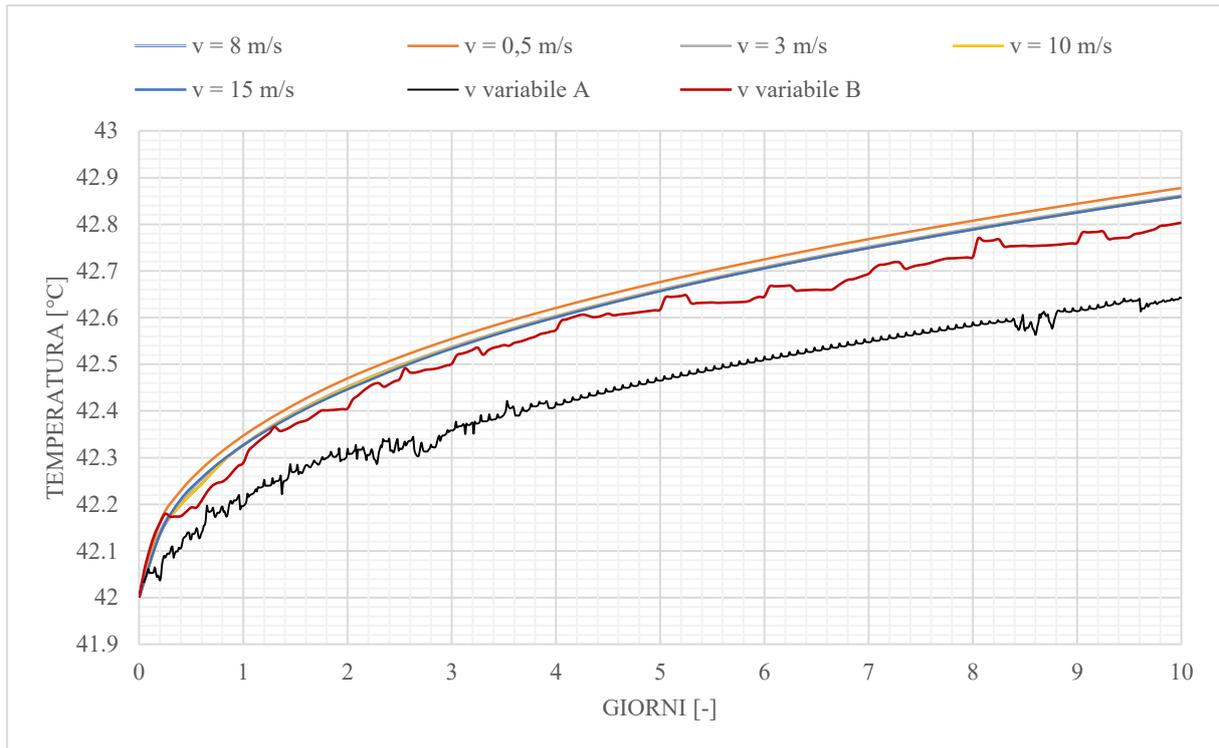


Figura 101. Evoluzione della temperatura in galleria al variare delle condizioni di flusso d'aria, dopo 10 giorni di simulazione

Tabella 16. Differenza tra la temperatura media (data assumendo i 5 valori costanti di velocità) e quella dovuta ad velocità con 'Time series', per tre diversi giorni di simulazione

	ΔT [°C]	
	1° Time s.	2° Time s.
1 g	0.134	0.042
5 gg	0.197	0.044
10 gg	0.223	0.060

Tabella 17. Confronto tra le temperature registrate al termine della simulazione

	T media	Time series A	Time series B
T [°C]	42.864	42.641	42.803

Il confronto tra le temperature finali al termine della simulazione si trova in Tabella 17 (ci si riferisce sempre alla temperatura media per le simulazioni con velocità di flusso mantenuta costante). Come anticipato, la minima temperatura si ha adottando la Time series A, mentre con l'assunzione di una velocità dell'aria sempre costante, si registra il massimo aumento rispetto alle condizioni iniziali: tale aumento è pari a 0,86 °C.

Si può allora concludere che i risultati avuti applicando una velocità di flusso d'aria invariata nel tempo, come fatto negli studi svolti da LTF (2013) sulla ventilazione del tunnel di base (grafici al capitolo 3.6.1,

nei quali la velocità di flusso d'aria subisce variazioni solamente in base alla posizione della sezione lungo la progressiva del tunnel di base), sono i più cautelativi.

Come si vedrà dalle future analisi numeriche, l'assenza di velocità dell'aria consentirebbe di raggiungere temperature persino maggiori, ma, poiché l'attivazione dell'impianto geotermico sarebbe prevista nella fase di esercizio dell'infrastruttura (e non di scavo o prima), è da tenere in considerazione l'effetto di pistonamento dovuto ai treni (e quindi il flusso d'aria) nella sezione della galleria. Avere un valore nullo di velocità non rappresenterebbe, dunque, le reali condizioni in sito.

Una volta deciso di applicare un valore di flusso costante di velocità per considerare il fenomeno del pistonamento dei treni, si è voluto effettuare un confronto ulteriore tra le temperature dovute alle diverse velocità di flusso d'aria, applicate sempre in maniera costante, ma per una maggiore durata di simulazione (270 giorni). L'assunzione di un valore (costante) di velocità di flusso d'aria è giustificato non solo dai risultati più conservativi e dagli studi LTF (2013), ma anche da autori come Xianjun e Wizhong (2014). I due autori, infatti, hanno studiato l'influenza del flusso d'aria sul terreno circostante le gallerie costruite in regioni fredde e hanno affermato che un valore costante di velocità dell'aria è una semplificazione necessaria per analizzarne gli effetti sulla temperatura del terreno attorno a questa tipologia di infrastrutture.

Considerando i cinque valori di velocità (0.5, 3, 8, 10 e 15 m/s) costanti per l'aria entrante ed uscente dalla galleria, si sono ottenuti i grafici in Figura 102.

Risulta evidente che la temperatura percepita durante l'analisi è indipendente dai valori assegnati alla velocità del flusso d'aria, come si era già visto inizialmente per i primi dieci giorni delle simulazioni precedenti (vedi Figura 100). Nella realtà l'effetto di pistonamento dovuto al passaggio dei treni determinerebbe una diversa evoluzione di temperatura in funzione della velocità dell'aria in galleria, perché sarebbe presente un flusso di calore entrante ed uscente ad accompagnare il flusso d'aria; questo fenomeno è però molto difficile da quantificare e quindi lo si trascura, in ragione anche del trascurabile apporto di calore ad esso dovuto.

5 - Studio numerico dell'attivazione termica della galleria di base

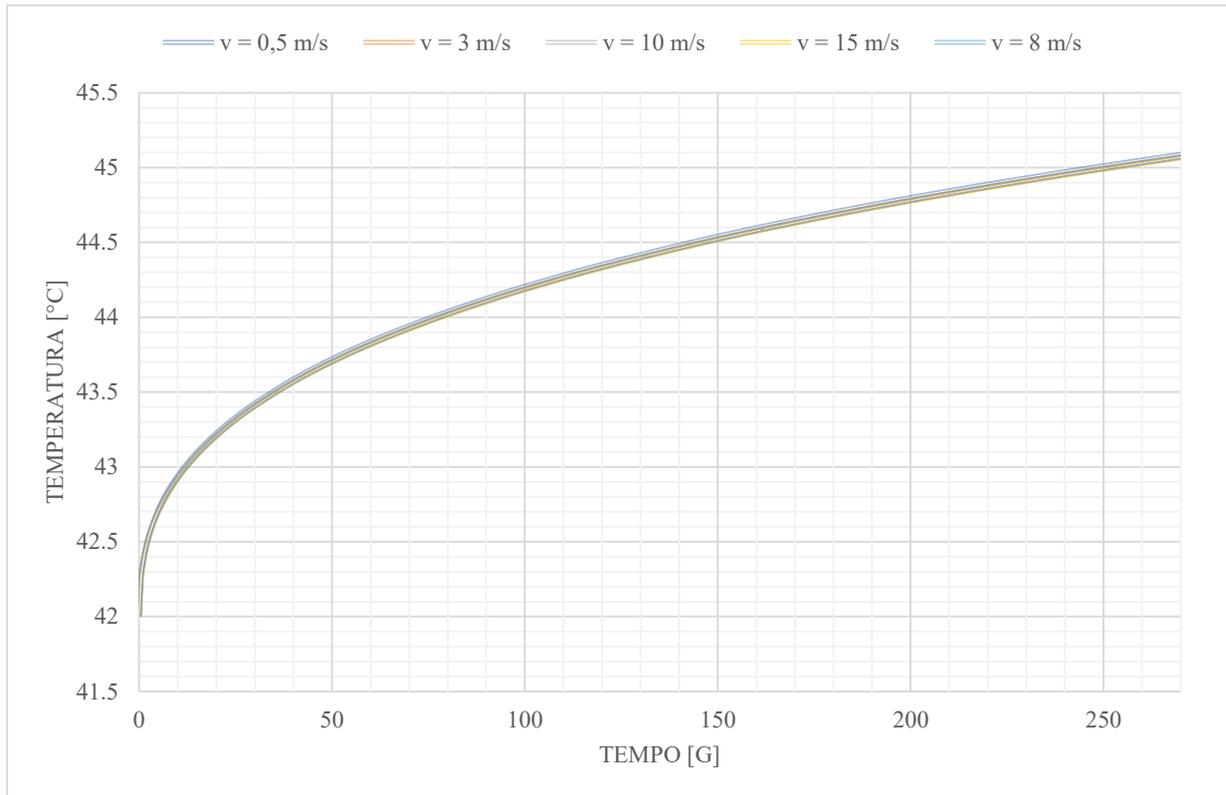


Figura 102. Effetto della velocità del flusso d'aria sull'evoluzione della temperatura in galleria dopo 270 giorni

Dopo 1 mese di simulazione la temperatura interna è salita di 1,4 °C con tutte le velocità assunte per il flusso d'aria presente, per poi salire di un altro grado dopo 80 giorni. Esattamente dopo 9 mesi, la temperatura ha raggiunto il valore di 45 °C, mostrando differenze davvero trascurabili per ognuno dei casi (Figure 102). Il motivo per cui, assumendo velocità più basse, la temperatura sia leggermente più elevata è dovuto semplicemente al fatto che risulta più difficile distribuire la fonte di calore di 12 Watt interna, applicata al centro della sezione, come si vedrà nelle successive analisi di monitoraggio ad impianto fermo nel caso di assenza di velocità dell'aria. Si può quindi desumere che gli scavi dove agiscono elevate velocità del flusso d'aria determinano temperature più basse all'interfaccia e ci si aspetta che siano più efficienti in termini di calore scambiato.

Tabella 18. Confronto della temperatura al giorno 270 al variare delle velocità del flusso d'aria

v [m/s]	0,5	3,0	8,0	10,0	15,0
T [°C]	45.089	45.073	45.071	45.067	45.065

In generale, dopo 270 giorni di simulazione, per effetto della sorgente termica interna di 12 Watt, la temperatura si è elevata di 3°C rispetto al valore iniziale. Si è scelto, alla fine, di adottare il valore di 8 m/s (limite raggiunto dai treni AF nel caso di pistonamento dovuto ad un singolo treno, e raggiunto nel caso di circolazione di 2 treni l'ora se l'effetto pistonamento fosse dovuto a più treni) per le analisi

successive, quando si andrà ad accendere l'impianto geotermico. Questo valore di flusso sarà applicato in maniera costante per tutta la durata delle simulazioni.

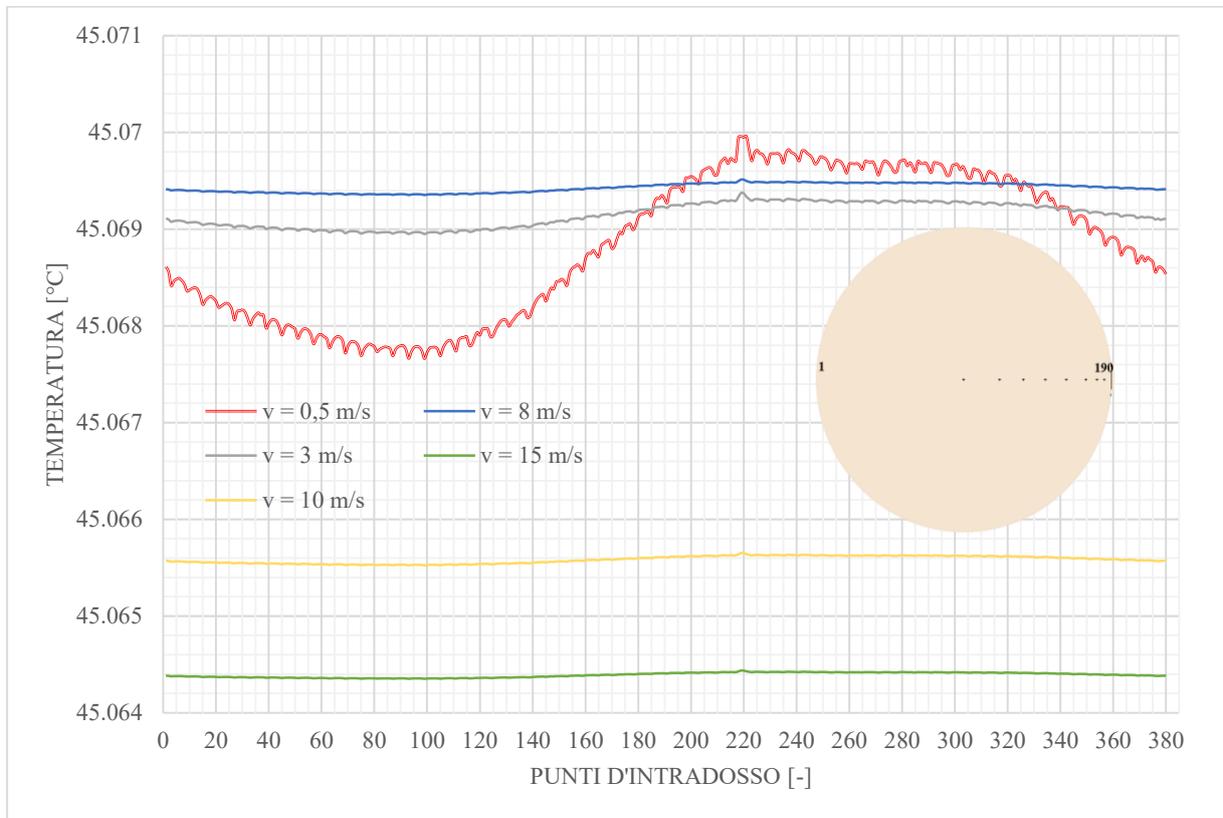


Figura 103. Andamento della temperatura nell'intradosso della galleria al giorno 270

Per concludere, in Figura 103 viene mostrata la variazione della temperatura nei punti d'intradosso della galleria al termine della simulazione e per le cinque diverse velocità di flusso; l'asse delle ascisse mostra i nodi di intradosso del rivestimento: questi punti sono stati contati a partire dal piedritto sinistro della sezione della galleria, proseguendo in senso orario. La prima metà dell'asse sarà, dunque, riferita alla porzione superiore d'intradosso, mentre la seconda metà a quella inferiore.

L'andamento della temperatura coi punti d'intradosso risulta tanto più ondulato quanto più si abbassa il valore di velocità inserito: questo fenomeno è dovuto al fatto che un flusso di aria entrante ed uscente dalla galleria in maniera più rapida distribuisce la temperatura in maniera più omogenea nei punti interni alla sezione.

Il minimo di 45,06435 °C è raggiunto dopo 270 giorni, con un flusso applicato a velocità di 15 m/s, da più punti del rivestimento, tutti molto vicini alla corona superiore del tunnel, mentre il massimo valore di 45,06996 °C, registrato con un flusso di 0,5 m/s, dopo 270 giorni di simulazione, sarà registrato nel nodo situato circa a metà tra il piedritto destro e la corona inferiore della sezione. Si fa notare, comunque,

che questi valori sono molti simili tra loro, con differenze dell'ordine del millesimo di grado, trascurabili, quindi, dal punto di vista ingegneristico.

Si può notare che velocità di flusso maggiori non implicano automaticamente temperature inferiori, come verrebbe da pensare: adottando un valore pari a 8 m/s, infatti, l'ambiente interno è più caldo rispetto al caso in cui si ha un flusso di 3 m/s; si può, però, affermare, che al crescere della velocità di flusso d'aria le variazioni termiche tra un punto d'intradosso e un altro tendono sicuramente ad annullarsi. La massima differenza di temperatura in due punti del contorno interno del rivestimento risulta pari a $2,269 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ ed è associato ad un flusso di 0,5 m/s. Inoltre, dai risultati del grafico in Figura 103, è evidente che con un flusso d'aria di 8 m/s costante si registreranno le temperature più elevate nei punti del rivestimento (seppur con minime differenze) e, quindi, l'adozione di questo valore per le successive simulazioni risulta essere la scelta più cautelativa.

- *Monitoraggio della temperatura ad impianto fermo*

A causa della presenza della sorgente di calore interna al tunnel atta a simulare la potenza dissipata dai convogli circolanti, il profilo di temperatura tenderà ovviamente a cambiare nel tempo. Per meglio studiare la sua variazione si sono effettuate due simulazioni ad impianto fermo, considerando lo stesso "Observational Point" assegnato al punto 5.4.1. Si tratterebbe di un'analisi più dettagliata di uno dei casi del punto precedente: la velocità assegnata è di 8 m/s (in maniera costante), ma considerando due diversi intervalli temporali. Una prima simulazione ha indagato la temperatura interna nelle prime 24 ore, mentre la seconda è stata protratta per un anno intero.

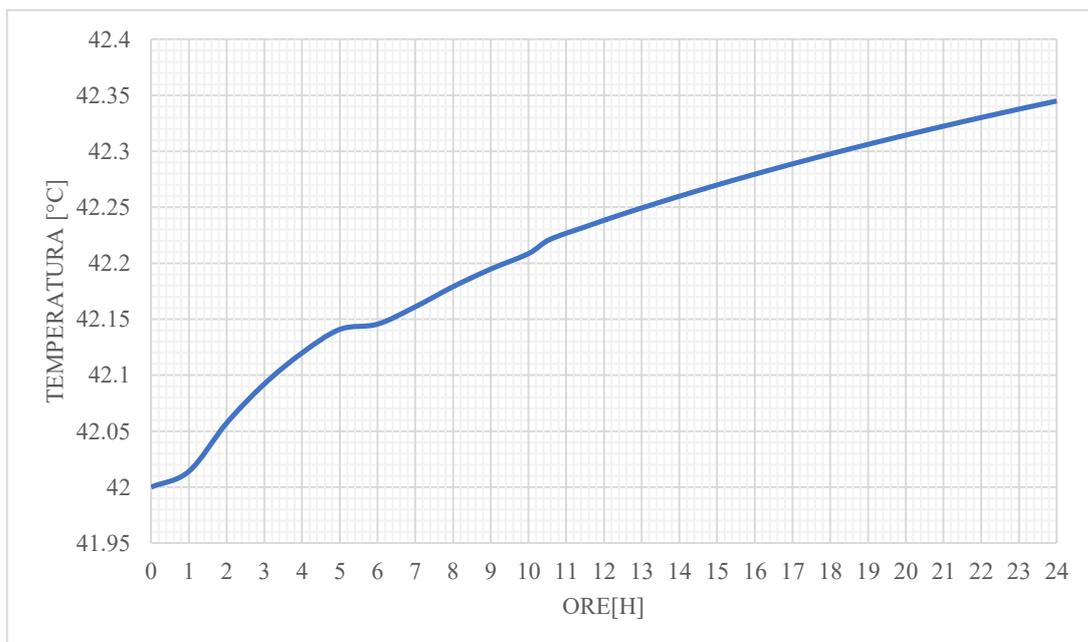


Figura 104. Profilo di temperatura dell'aria interna dopo 24 h

Come ci si aspettava, il profilo di temperatura ottenuto è monotono crescente in entrambi i casi. In Figura 104 viene mostrato l'andamento misurato nel caso la simulazione sia a breve termine: dopo 9 ore di analisi si è registrato un aumento di 0,2 °C, che raggiunge 0,35 °C al termine della giornata (con un valore finale di 42,35 °C).

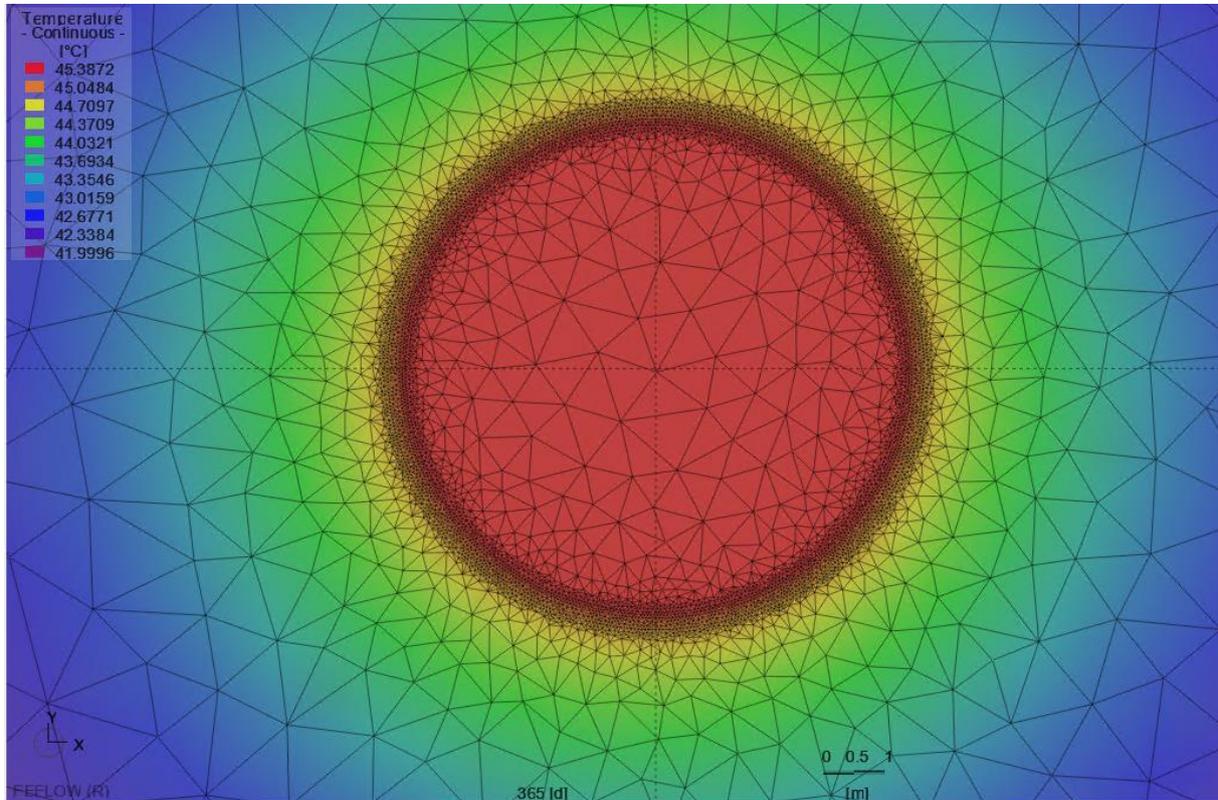


Figura 105. Distribuzione della temperatura nel modello FEFLOW (dopo 365 giorni)

I risultati della simulazione a lungo termine, invece, sono riportati nella figura 105 e possono essere letti dal grafico in Figura 106, nella quale vengono confrontati i due casi con presenza di velocità di flusso (pari a 8 m/s) e assenza di essa (velocità nulla) per mostrare il ruolo fondamentale del fenomeno di pistonamento dei convogli.

In presenza di flusso indotto, dall'istante iniziale si registra un aumento di 0,5 °C durante la seconda giornata, valore che raggiunge l'unità passati 13 giorni; dopo un mese di simulazione, la variabile in esame si è innalzata di 1,4 °C dal valore iniziale di 42 °C, per raggiungere, infine, una temperatura di 45,4 °C. Se non si fosse applicata la condizione al contorno di flusso d'aria interno, verrebbe registrato un aumento quasi istantaneo della temperatura interna alla sezione: trascorsa mezza giornata dall'istante iniziale, l'aumento del parametro monitorato nel punto d'osservazione crescerebbe di quasi 10 °C (esattamente 9,22 °C, raggiungendo i 51,22 °C) per poi continuare in maniera meno marcata, crescendo nelle successive 12 ore di altri 0,42 °C (con 51,64 °C) e, ancora, di 0,02 °C (con 51,66 °C) alla fine di una giornata e mezzo. Al termine dei 365 giorni, si registrerebbe un valore finale di 54,7 °C. Invece che

i 3,4 °C avuti in presenza di ventilazione, l'aumento subito sarebbe stato di 12,7 °C rispetto alle condizioni indisturbate.

Come quindi è evidente dal grafico in figura, l'effetto di pistonamento dei convogli risulta di grande aiuto per la ventilazione naturale dell'infrastruttura, tanto da far concludere alla LTF che, in condizioni di normale esercizio dei convogli, lo spostamento dell'aria fosse sufficiente a garantire la ventilazione igienica della galleria (2013). In realtà, questo ragionamento non può essere applicato a tutta la porzione di tunnel simulato in questo caso studio, poiché, nemmeno con lo spostamento d'aria indotto dai convogli, si riescono a mantenere le condizioni termiche sotto il limite di 32 °C (che sarà trattato al capitolo 5.6).

Si ricorda che tutti i risultati fanno sempre riferimento ad un solo nodo (in questo caso distante 2,30 m dal centro della sezione), ma che non sono costanti dal centro fino all'estradosso del rivestimento: anzi, il profilo di temperatura subirà una variazione registrabile, soprattutto evidente nelle zone in cui si ha un cambio di materiale (Figura 107).

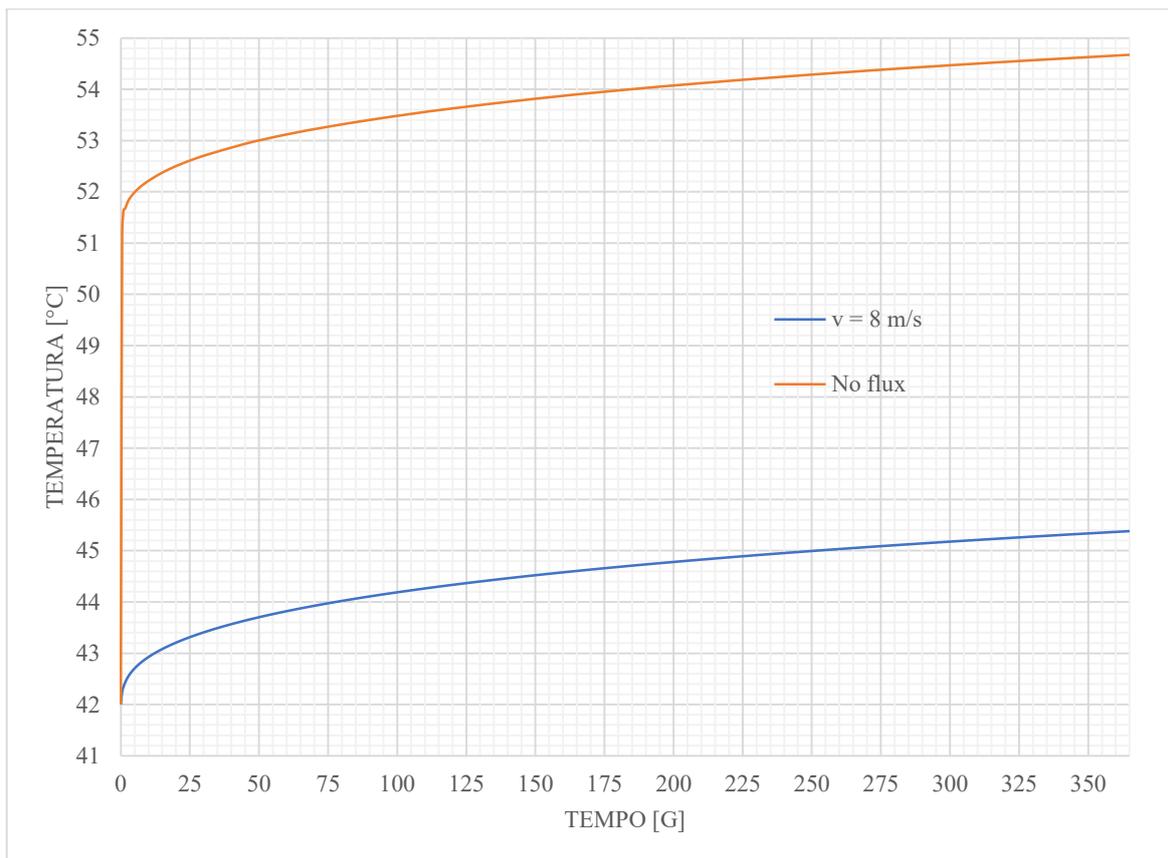


Figura 106. Paragone del profilo di aria interna in presenza e assenza di flusso interno (dopo 365 giorni)

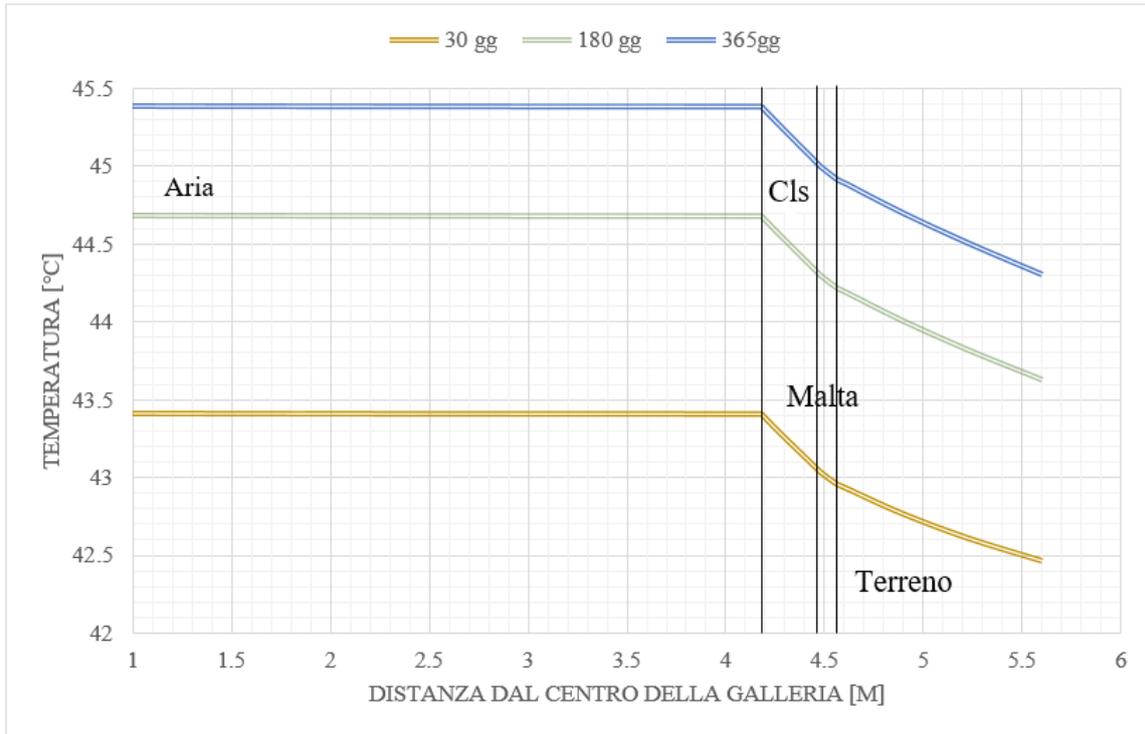


Figura 107. Temperatura a partire da 1 m dal centro della sezione per le analisi a lungo termine

5.4.2 Ruolo della temperatura e velocità di flusso del fluido termovettore

Lo scopo della progettazione dell'impianto geotermico è quello di sfruttare gli elevati valori di temperatura registrati nel cuore del massiccio d'Ambin per ottenere una potenza termica "gratuita" da poter impiegare per soddisfare i fabbisogni delle zone limitrofe di Susa e Chiomonte come ipotizzato nello studio di TELT (2021).

Il calcolo della potenza termica Q [W] può essere eseguito quando si ha la temperatura in uscita dal tubo nel corso o al termine di ogni simulazione. La relazione che lega queste ed altre grandezze è la seguente:

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

Dove i termini sono:

- $\dot{m} = \rho_w \cdot v \cdot A$ che rappresenta la velocità di flusso massica [kg/s];
- ρ_w pari alla densità dell'acqua [kg/m³];
- v = velocità del fluido circolante [m/s];
- A = area della sezione del tubo [m²];
- c uguale al calore specifico dell'acqua [J/kgK].

E infine $\Delta T [K]$ pari alla differenza tra la temperatura d'uscita e quella d'ingresso del fluido nel circuito.

Da quanto detto, è immediato capire che la potenza estraibile sarà direttamente proporzionale al salto termico tra le due temperature del fluido come anche alla velocità v di quest'ultimo (che regola la velocità di flusso massica m). Inoltre, poiché il modello costruito prevede una configurazione di lavoro costituita da due anelli in serie, si può ricavare la potenza termica estraibile per metro lineare $q [W/m]$, dividendo l'energia in Watt per la totale lunghezza degli anelli collegati in serie (si ricorda che un singolo anello misura 1,4 metri):

$$q \left[\frac{W}{m} \right] = \frac{Q}{L_{\text{anelli in serie}}} = \frac{Q [W]}{2,8 m}$$

Nel caso studio della presente tesi, volendo massimizzare l'energia da sfruttare, si è ritenuto opportuno svolgere delle analisi parametriche che tenessero in considerazione sia la temperatura d'ingresso del fluido nei tubi che la velocità d'ingresso e uscita dello stesso.

La temperatura d'ingresso nelle serpentine è stata fatta variare in un range di valori tra 20 e 28 °C (sulla base delle considerazioni fatte al paragrafo 2.5), mentre per la velocità del flusso in circolo è stato adottato un intervallo di 0,3 - 1 m/s. I punti d'osservazione scelti in queste analisi numeriche sono stati il punto d'ingresso e il punto d'uscita del fluido (con riferimento a due anelli).

Di seguito (Tabella 19) si riportano i dati inseriti per il caso di velocità di flusso pari a 0,8 m/s e che non muteranno durante lo svolgimento delle analisi parametriche sulla temperatura d'ingresso.

Tabella 19. Parametri utilizzati per il calcolo del calore estraibile dall'impianto

$v [m/s] =$	0.8
$\rho_w [kg/m^3] =$	1000
$A [m^2] =$	0.000201
$c [J/kgK] =$	4186

Con un valore di 0,8 m/s, la velocità di flusso massica m andrà calcolata come di seguito:

$$\dot{m} = \rho_w \cdot v \cdot A = 0,1608 \text{ kg/s}$$

Per lo stesso valore di velocità, in Tabella 20 sono racchiusi i risultati ottenuti variando la temperatura d'ingresso tra 20 e 28 °C con simulazioni di durata di 365 giorni. Tutti gli altri, calcolati al termine delle analisi numeriche in FEFLOW facendo variare la temperatura per ognuna delle velocità di flusso dell'intervallo scelto, possono essere letti graficamente in Figura 108 e vengono riportati in forma tabellare nell'Allegato A.

Tabella 20. Risultati dell'analisi parametrica per $v=0,8$ m/s

$v = 0,8$ m/s				
T [°C]	T _{out}	ΔT	Q [W]	q [kW/m]
20	21.352	1.352	910.486	0.325
21	22.300	1.300	875.000	0.313
22	23.248	1.248	840.103	0.300
23	24.195	1.195	804.449	0.287
24	25.155	1.155	777.701	0.278
25	26.093	1.093	735.664	0.263
26	27.049	1.049	706.619	0.252
27	27.987	0.987	664.816	0.237
28	28.934	0.934	629.005	0.225

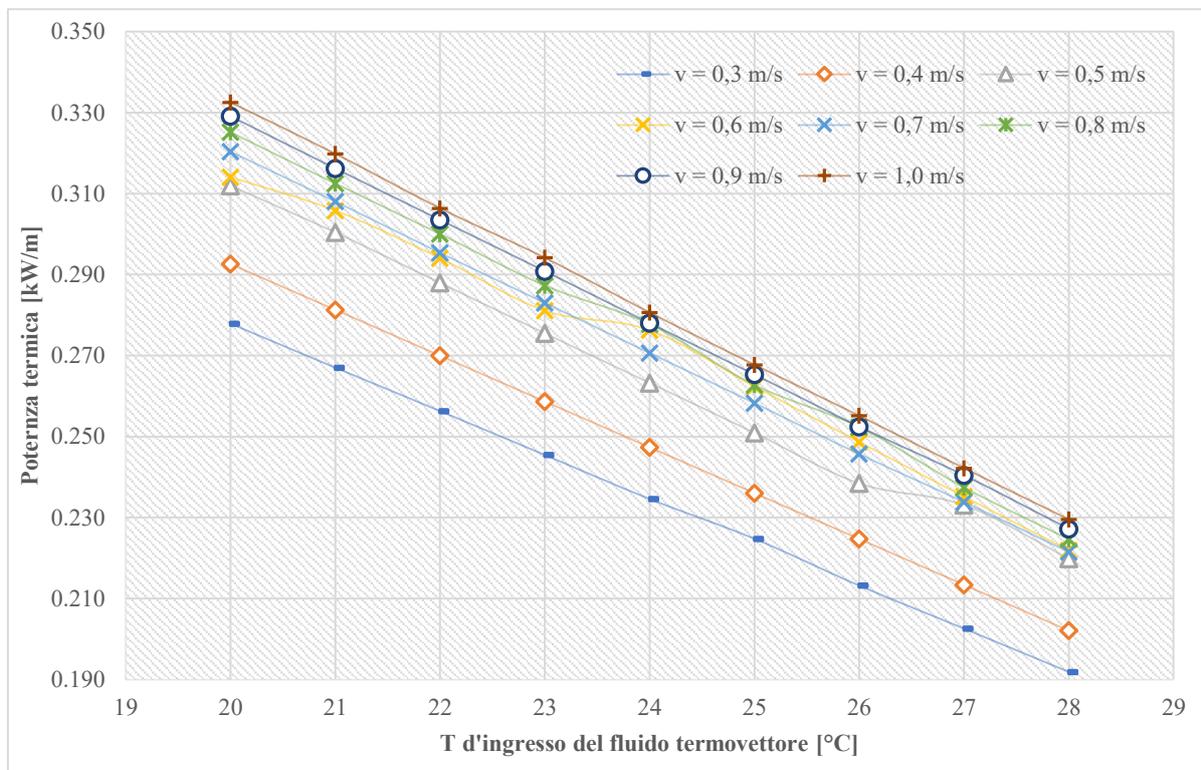


Figura 108. Andamento delle temperature di uscita del fluido al variare della temperatura d'ingresso (in 365 giorni)

Sicuramente una velocità di 1 m/s per il flusso del liquido scambiatore permette di ottenere la potenza termica più elevata, se la si confronta con quella calcolata per ogni altra velocità del fluido, fissata, però, una stessa temperatura d'ingresso ai tubi. Ciononostante bisogna considerare che la differenza tra la temperatura del terreno in condizioni indisturbate e quella d'uscita dal percorso di serpentine (a cui la potenza termica è direttamente proporzionale) va mantenuta in un certo intervallo per ottimizzare l'impianto geotermico.

Come già detto al paragrafo 2.5, una grande differenza tra questi due valori di temperatura consente di ridurre le dimensioni del sistema di scambio termico (con un indubbio vantaggio economico), ma

comporta maggiori influenze sullo stato termico del terreno circostante e basse prestazioni delle pompe di calore (aumentando i consumi energetici del sistema). Si cerca allora di mantenersi nel range consigliato da Capozza (2012):

$$|T_{wo} - T_g| = 11 \div 17 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ nel caso di raffreddamento}$$

In Tabella 21 sono riassunti i risultati di $|T_{wo} - T_g|$ ottenuti al termine delle simulazioni al variare delle temperature d'ingresso e della velocità del fluido in circolazione. Ad ogni velocità di flusso è associata una colonna di valori ΔT che, come mostrano i risultati, diminuisce al crescere della temperatura d'ingresso del fluido; la casella evidenziata in ogni colonna rappresenta il valore limite che rientra nell'intervallo ottimale di $11 \div 17 \text{ }^\circ\text{C}$ e a cui compete la massima potenza termica sfruttabile.

Tabella 21. $T_{wo} - T_g$ al variare della velocità del fluido e della temperature d'ingresso del fluido

T [°C]	v [m/s]							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
20	18.918	19.566	19.924	20.258	20.477	20.648	20.783	20.894
21	18.039	18.660	19.001	19.304	19.536	19.700	19.831	19.936
22	17.158	17.755	18.084	18.369	18.596	18.752	18.878	18.981
23	16.278	16.849	17.167	17.441	17.655	17.805	17.925	18.021
24	15.398	15.943	16.249	16.468	16.714	16.845	16.972	17.066
25	14.507	15.037	15.330	15.545	15.773	15.907	16.019	16.109
26	13.636	14.131	14.414	14.621	14.832	14.951	15.067	15.151
27	12.753	13.225	13.449	13.696	13.889	14.013	14.111	14.194
28	11.872	12.319	12.537	12.769	12.947	13.066	13.160	13.236

Se si moltiplicano questi massimi potenziali in kW/m per la lunghezza di 10 km della tratta di galleria presa in considerazione nel presente caso studio, si ottengono i massimi di potenza termica che è possibile ricavare dopo un anno di simulazione continua per ognuna delle velocità di flusso adottate (Tabella 22).

Tabella 22. Massime potenze termiche al termine di un anno di simulazione continua e al variare della velocità del fluido termovettore

v [m/s]	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
T_{in} [°C]	23	23	24	24	24	24	24	25
q [kW/m]	0.245	0.259	0.263	0.276	0.271	0.278	0.278	0.268
Q [MW]	2.45	2.59	2.63	2.76	2.71	2.78	2.78	2.68

In Figura 109 viene mostrato l'andamento della potenza termica al metro al variare della velocità di flusso (sempre in riferimento ad un anno di simulazione continua): poiché il calcolo è stato fatto con diverse temperature del fluido termovettore (elencate nella Tabella 22), la potenza termica non cresce

in maniera monotona con la velocità di flusso, ma, sia per il valore di 0,7 m/s che per il massimo adottato di 1 m/s, tende ad abbassarsi rispetto al valore immediatamente precedente.

Alle velocità di 0,6, 0,8 e 0,9 m/s competono i massimi di potenza termica lineare q [kW/m], il cui andamento temporale nel corso della simulazione è posto a confronto in Figura 110.

Dall'analisi dei profili riportati nella figura seguente, si può concludere che la differenza registrata per i tre valori in esame sia trascurabile; ciononostante è stata esclusa l'adozione del valore di 0,9 m/s per l'impianto geotermico, poiché maggiore la velocità di flusso e maggiori sono i costi d'impianto. Di conseguenza, da un punto di vista economico si consiglia che il flusso del fluido termovettore non ecceda la velocità di 0,8 m/s (Guozhu et al., 2013).

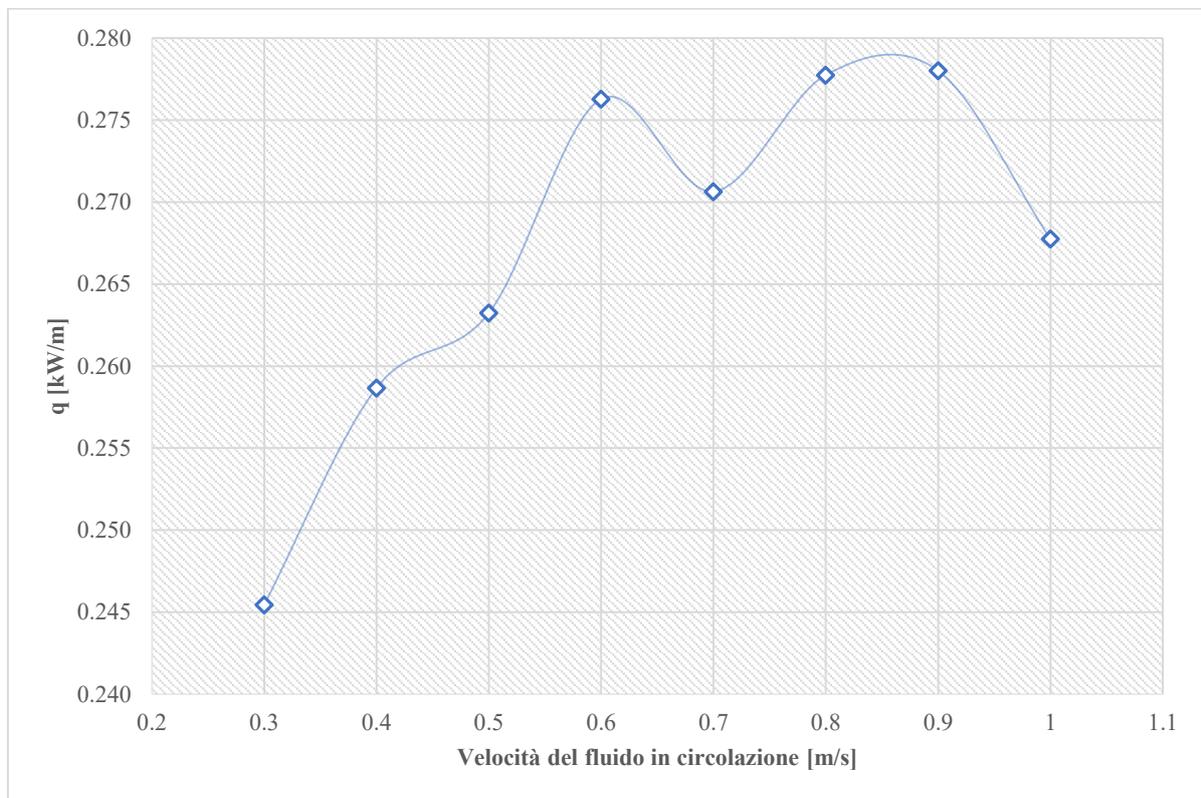


Figura 109. Profilo di potenza termica al variare della velocità di flusso

Data anche la somiglianza tra i risultati ottenuti adottando una velocità di flusso di 0,6 e 0,8 m/s non si può scegliere a priori quale sia quella ottimale: con una velocità più bassa si avranno più benefici economici come già detto, mentre con una velocità maggiore si potrebbero ottenere delle potenze leggermente più grandi, poiché si fa crescere la velocità di flusso massica. Si è deciso allora di proseguire le analisi adottando entrambi e scegliendo il valore ottimale sulla base dei risultati che si otterranno.

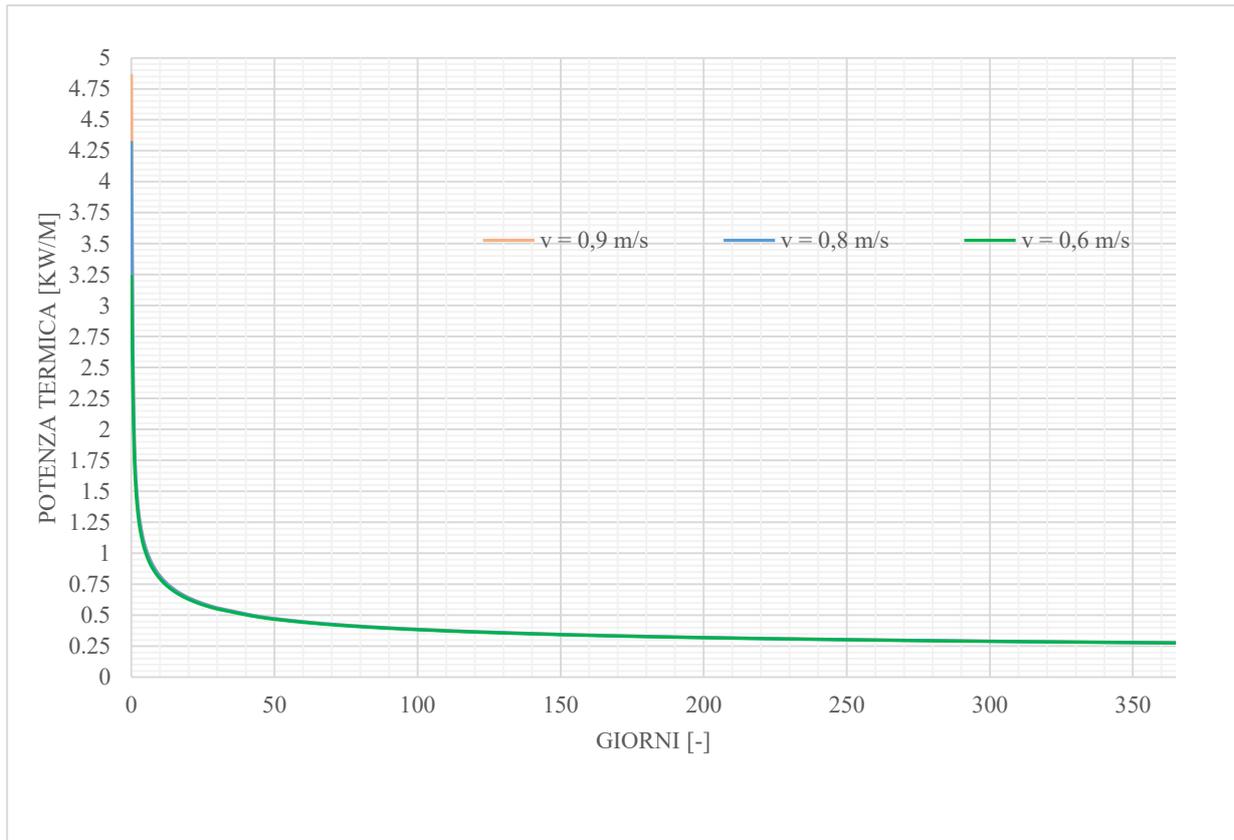


Figura 110. Profili di potenza termica al metro al variare della velocità del fluido (in un anno di simulazione continua)

5.5 Studio del funzionamento continuo dell'impianto

Per entrambe le velocità di flusso la temperatura del fluido ottimale è risultata essere quella di 24 °C, da inserire all'ingresso del percorso delle serpentine, mentre la velocità del flusso d'aria inserita è di 8 m/s (cfr. 5.4.1) e la sorgente di calore presente in ogni nodo centrale della sezione è di 12 Watt. Entrambe le simulazioni di lungo termine (365 e 3650 giorni) sono state svolte con lo scopo sia di:

- Monitorare la temperatura d'uscita del fluido e valutare l'efficienza dell'impianto.
- Studiare la variazione della temperatura dell'ambiente interno alla galleria in funzione sia del tempo che dalla distanza dal centro della sezione.
- Verificare la variazione di temperatura del terreno che ricopre la galleria per capire a quale distanza l'ammasso ristabilisce la sua condizione di equilibrio.

Al fine di calcolare l'efficienza dell'impianto, è stato sufficiente monitorare solo i punti d'ingresso e di uscita del fluido termovettore; per valutare quanto venga influenzato il terreno attorno alla galleria dall'attivazione dell'impianto, invece, si sono aggiunti una serie di "Observational Points" a partire dall'estradosso del rivestimento in calcestruzzo, fino ad una distanza di 36 m dal centro del modello (Figura 111), mentre per lo studio del parametro termico nell'ambiente interno alla sezione, questi punti

sono stati assegnati a partire dal nodo centrale della sezione fino all'intradosso del concio prefabbricato (Figura 112).

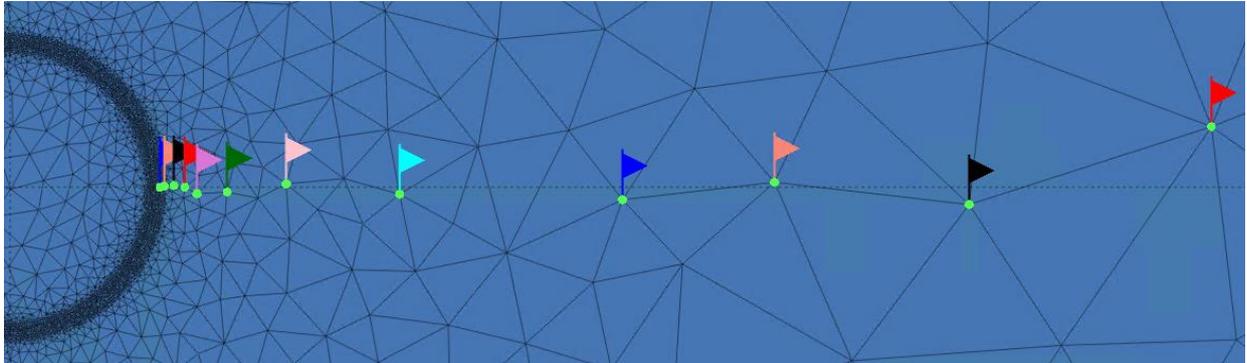


Figura 111. Punti di osservazione nel terreno a partire dall'estradosso del tunnel

Di seguito, saranno riassunti i risultati delle varie simulazioni eseguite in FEFLOW, con l'ausilio dei grafici e tabelle elaborate, ad esse associate.

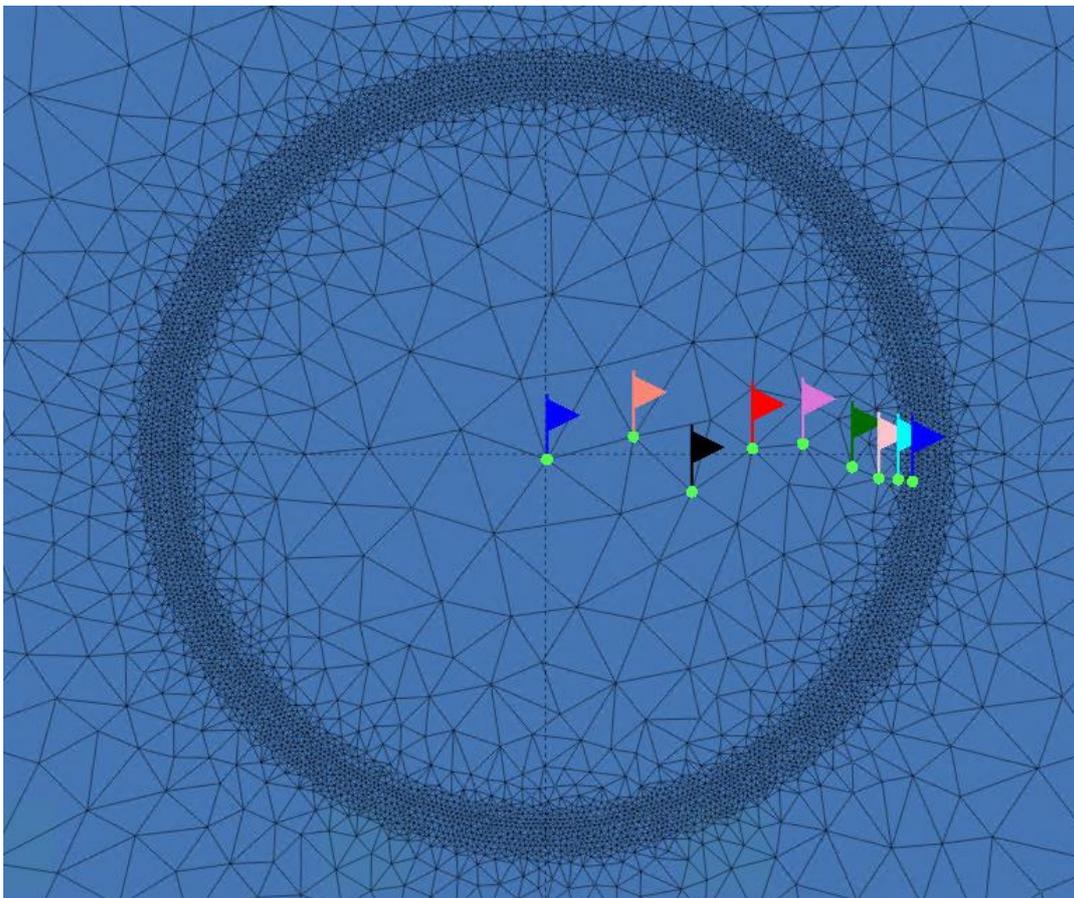


Figura 112. Punti di osservazione nella sezione del tunnel

5.5.1 Analisi di 1 anno con $v = 0,6$ m/s

Una prima simulazione ha coinvolto una finestra temporale di un anno durante la quale l'impianto geotermico è stato attivato dall'istante iniziale con l'ipotesi di funzionamento continuo.

Durante questo lasso di tempo, la temperatura del fluido all'uscita del percorso si è abbassata di 8 °C dopo 24 h, di 15 °C dopo un mese, 16 °C dopo tre mesi e raggiunge infine i 25,53 °C al termine di un anno di simulazione (con una differenza ΔT tra le temperature estreme del fluido in circolazione di 1,53 °C, Figura 112), mentre la temperatura dell'aria interna al tunnel si abbassa fino a raggiungere il valore di 25,2 °C in tutti gli "Observational Points" indagati, entro la fine della simulazione, riuscendo così a scendere sotto la soglia massima di 32 °C stabilita dalla LTF (2013), di cui si discuterà meglio nei capitoli successivi (cfr. 5.6).

La distribuzione della temperatura dell'aria nel tempo è mostrata nella Figura 113, nella quale viene indicata in legenda la distanza a cui la curva fa riferimento, a partire dal nodo centrale della galleria. E' evidente come in tutti i punti studiati si risenta della stessa diminuzione di temperatura: la massima differenza viene registrata tra il punto d'intradosso e quello d'applicazione della sorgente di calore e raggiunge i 0,01 °C.

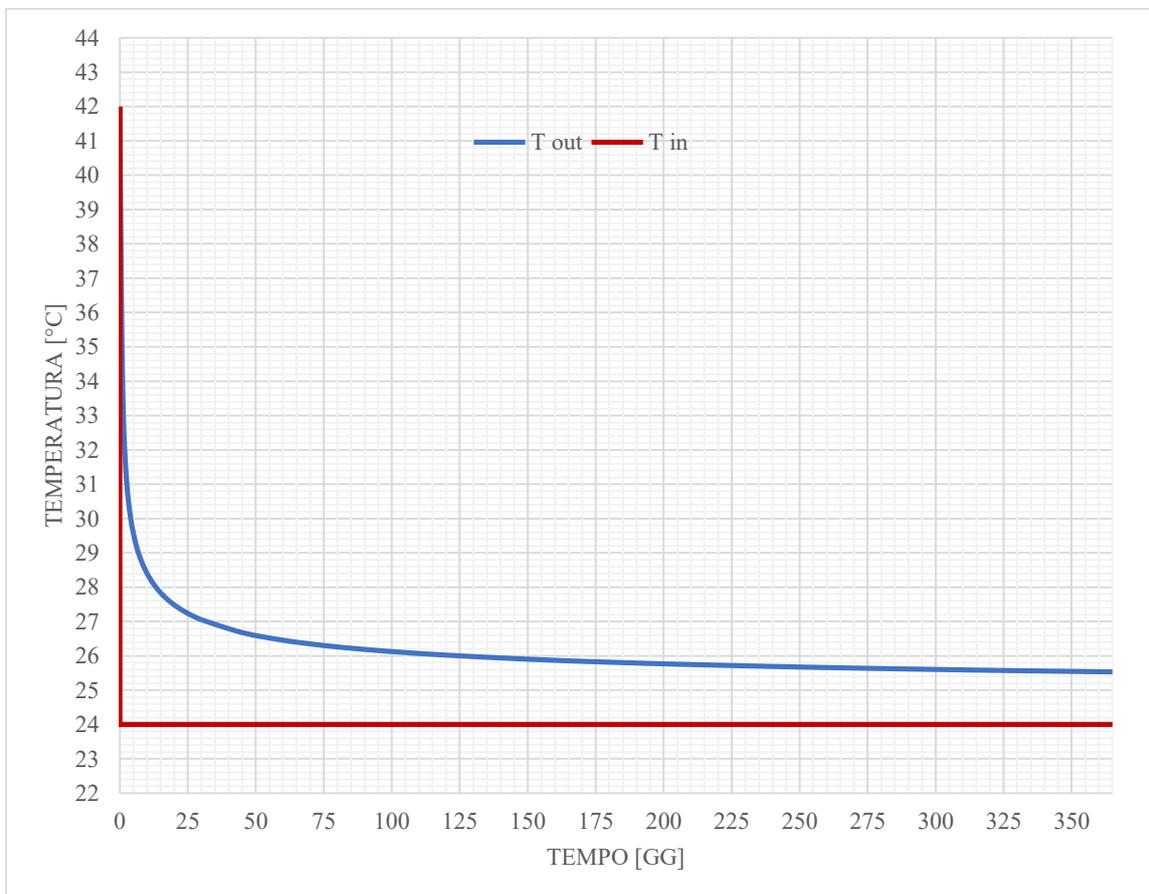


Figura 113. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita dopo 365 gg di funzionamento

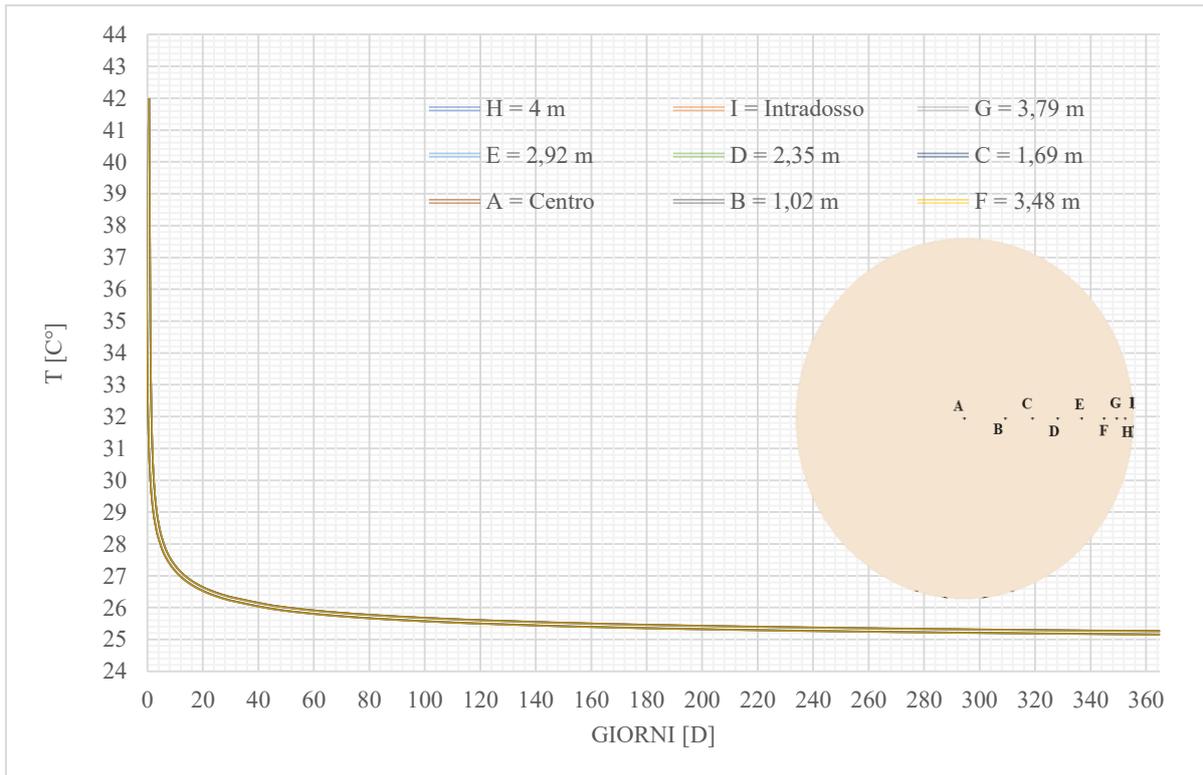


Figura 114. Distribuzione della temperatura nei punti di osservazione interni alla sezione nei 365 gg di funzionamento continuo

L'andamento di temperatura interna registrata ai nodi d'intradosso del rivestimento ha mostrato che la massima differenza tra le temperature nei punti risulta pari a 0,008 °C, tra il nodo che si trova praticamente a metà dell'intradosso inferiore (ovvero lungo l'asse verticale passante per il centro della sezione) e un punto situato tra la corona superiore e il piedritto destro ed è, quindi, del tutto trascurabile dal punto di vista ingegneristico.

Infine, si è voluto stimare fino a che distanza e in che misura il terreno circostante risentisse dell'attivazione dell'impianto geotermico in punti inseriti a varie distanze dall'estradosso della galleria (già mostrati nella Figura 111 e fino alla massima distanza di 36 metri dal nodo centrale).

L'immagine 115 mostra l'andamento temporale della temperatura mediante curve decrescenti e non, che fanno riferimento alle distanze dei nodi studiati: si è potuto valutare, così, che dopo 365 giorni di funzionamento continuo dell'impianto, l'ammasso roccioso torna in condizioni indisturbate ad una distanza circa di 30 m dal nodo centrale (circa a 25 m di distanza dall'estradosso del tunnel). Il punto d'estradosso del rivestimento raggiunge una temperatura di 25,95 °C al termine dell'analisi, abbassandosi dunque di 16 °C circa, mentre scende di 11 °C sotto il valore iniziale a una distanza di 6,50 m.

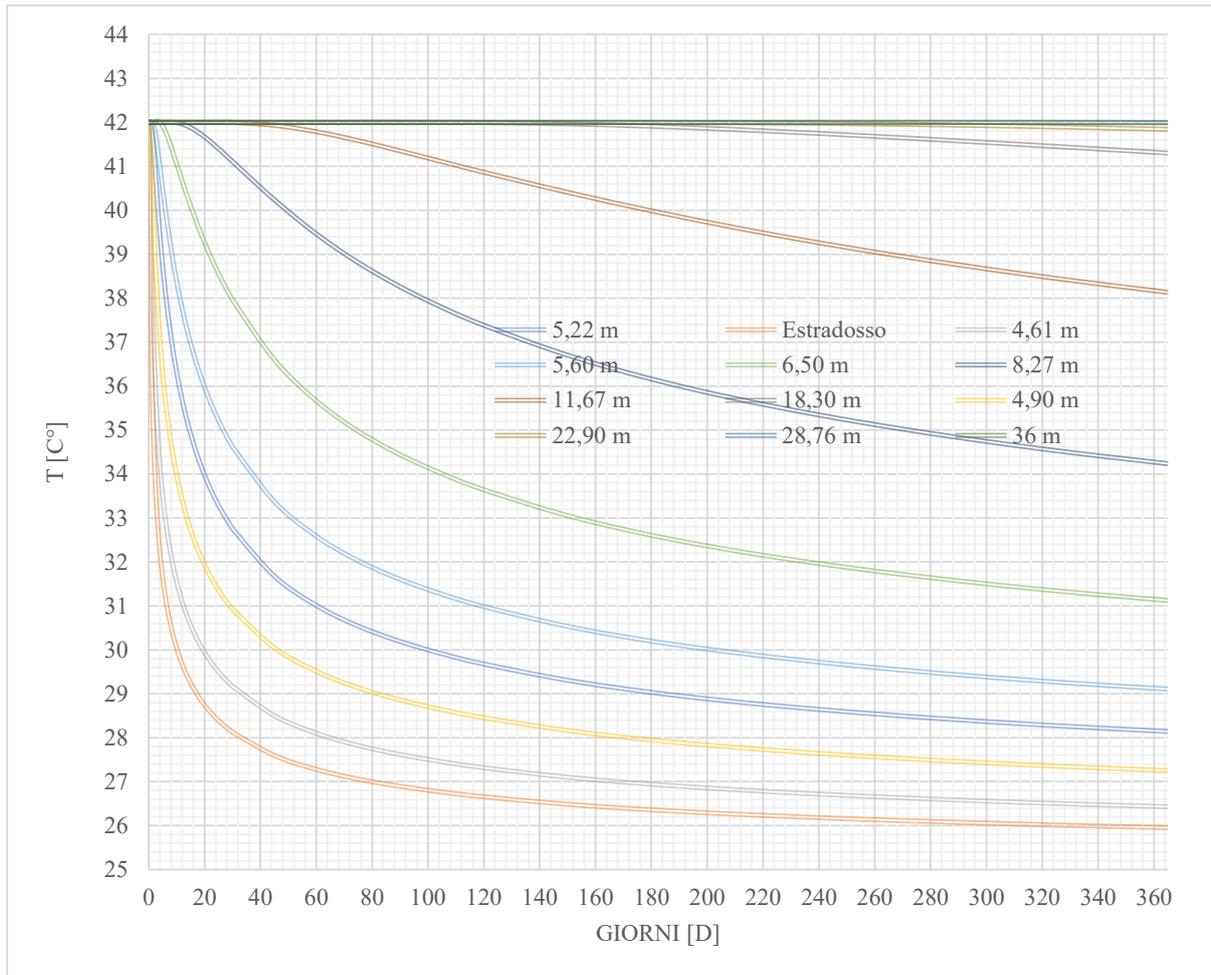


Figura 115. Distribuzione di temperatura per i punti scelti nel terreno circostante dopo 1 anno

5.5.2 Analisi di 1 anno con $v = 0,8$ m/s

Si è ripetuta un'analisi numerica di ugual durata, imponendo l'altra la velocità di flusso del fluido che andava a massimizzare la potenza termica (le Figure 116, 117 e 118 racchiudono i risultati delle simulazioni): dopo 24 h di simulazione con funzionamento continuo la temperatura del fluido in circolazione si è abbassata di 10 °C dal valore iniziale, di 15,7 °C dopo un mese, di 16,2 °C dopo 60 giorni ed infine fornisce, al termine di un anno, una temperatura di uscita pari a 25,14 °C, mostrando una differenza di temperatura di 1,14 °C dal valore all'ingresso alle serpentine (minore del caso precedente, in quanto è noto che vada a decrescere con l'adozione di valori di velocità di flusso più alte).

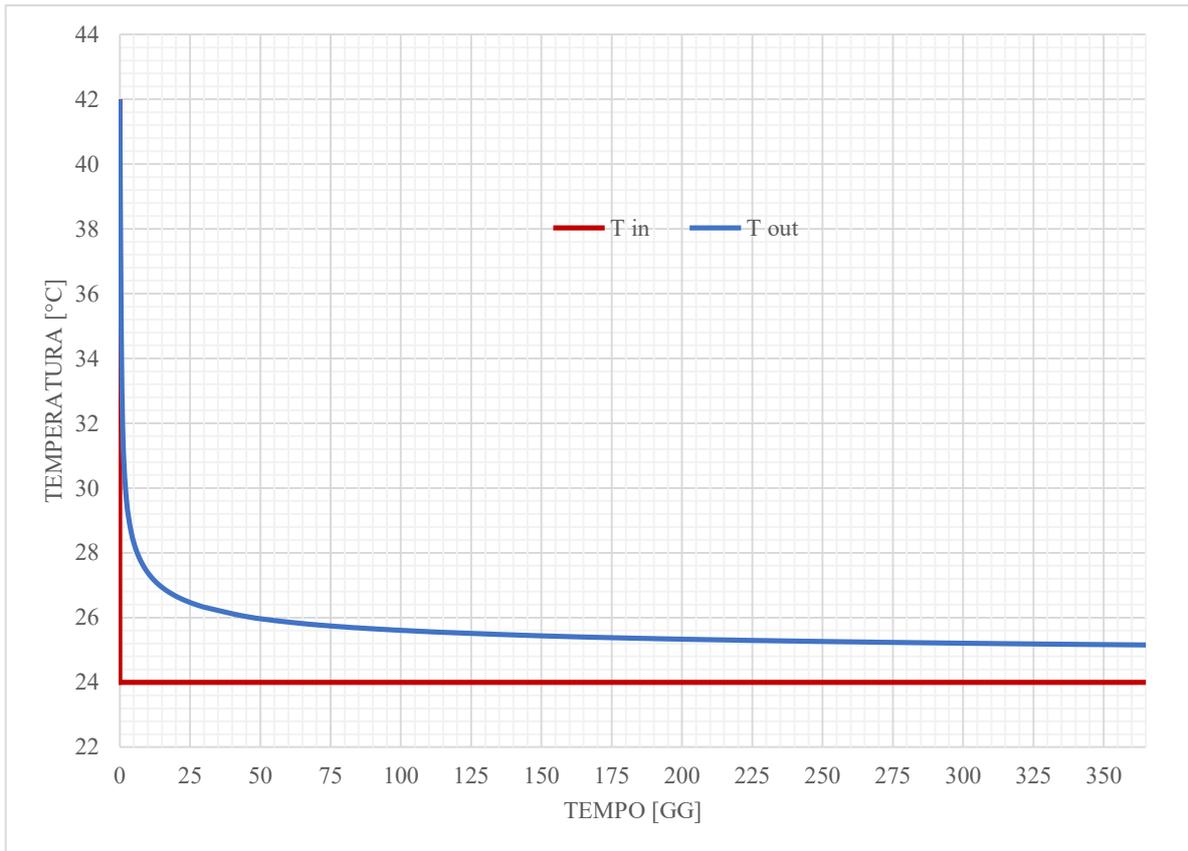


Figura 116. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita dopo 365 gg di funzionamento

Per quanto riguarda l'aria dell'ambiente interno, l'impianto geotermico e la circolazione del fluido termovettore permettono di raggiungere il valore di 24,91 °C, riuscendo anche qui a scendere sotto la soglia massima di 32 °C. Rispetto all'istante iniziale la temperatura si è abbassata di poco più di 17 °C e offre una differenza di 0,3 °C con l'aria interna alla galleria in caso si adottasse una velocità di flusso di 0,6 m/s: al crescere della velocità del fluido, infatti, si riduce la differenza tra il fluido all'ingresso e all'uscita della serpentine e, dunque, anche la temperatura dell'aria interna sarà minore. Anche qui, come nel caso precedente, la massima differenza di temperatura registrata tra i punti interni alla sezione, al termine della simulazione, è di 0,01 °C.

La massima differenza registrata tra le temperature nei punti d'intradosso risulta pari a 0,006 °C, tra il nodo che si trova praticamente a metà dell'intradosso inferiore (ovvero lungo l'asse verticale passante per il centro della sezione) e un punto situato tra la corona superiore e il piedritto destro. Anche in questo caso (come nel paragrafo 5.5.1), si tratta di differenze di millesimi di grado, giustamente trascurabili dal punto di vista ingegneristico.

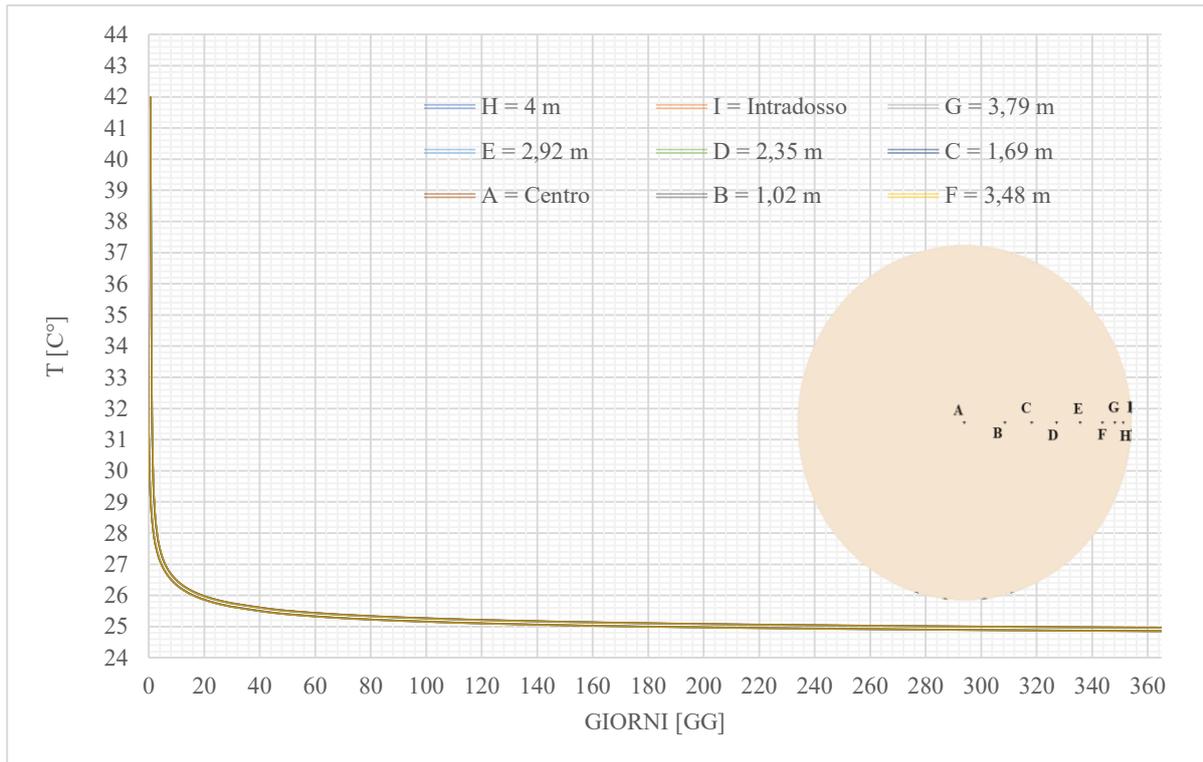


Figura 117. Distribuzione della temperatura nei punti di osservazione interni alla sezione dopo 365 gg di funzionamento continuo

Attorno alla galleria, invece, al termine di un anno, la temperatura all'estradosso si abbassa di 16,5 °C, raggiungendo i 25,5°C, come si vede dagli andamenti nel tempo delle temperature in Figura 118. A 4,61 m dal centro della sezione, il valore differisce dal nodo d'estradosso di mezzo grado (ha un valore di 26 °C), mentre a 4,90 m è maggiore di 1,5 °C (27 °C).

La differenza con i risultati stimati dall'analisi precedente son davvero trascurabili, tanto che tornano a coincidere alla distanza di 22,9 m dal centro della sezione (ovvero a 18 metri e mezzo dall'estradosso del rivestimento). Anche l'estensione del raggio d'influenza è lo stesso e il terreno risente del funzionamento dell'impianto energetico, dopo un anno dall'attivazione di questo, fino a circa 30 m dal nodo centrale, dove torna ad assumere il suo valore indisturbato di 42 °C.

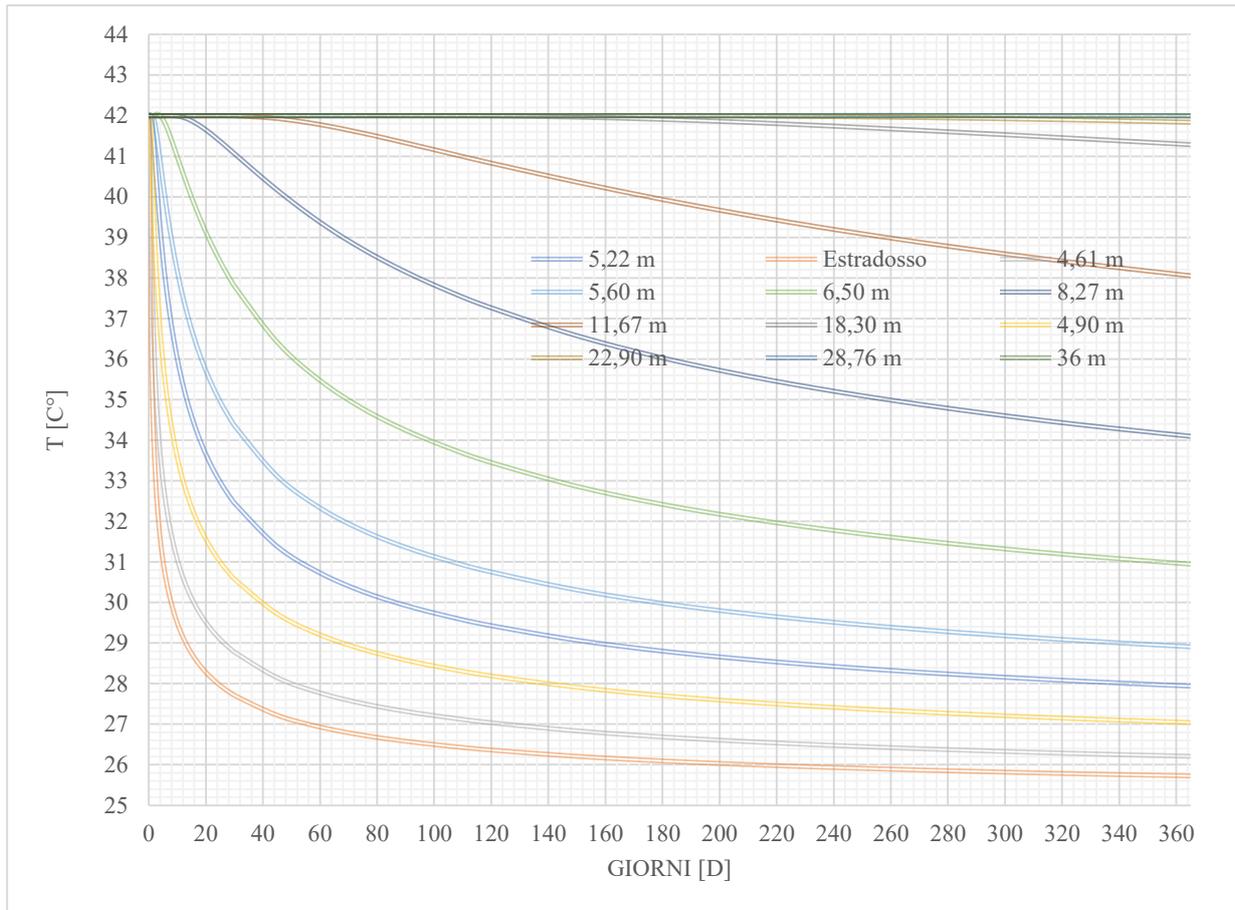


Figura 118. Distribuzione di temperatura per i punti scelti nel terreno circostante dopo 365 gg dall'attivazione

5.5.3 Analisi di 10 anni con $v = 0,6 \text{ m/s}$

Si estende ulteriormente la durata dell'analisi numerica a 10 anni (funzionamento sempre continuo) al fine di studiare di quanto il potenziale geotermico si sia andato a ridurre e considerare una possibile sospensione dell'estrazione di calore, così da permetterne la ricarica. I risultati ricavati sono racchiusi in Figura 119 e 120 e andranno poi messi a confronto con il caso di velocità di flusso di $0,8 \text{ m/s}$ per vedere se, dopo 3650 giorni, fosse possibile riscontrare maggiori differenze in termini di potenza termica sfruttabile dalla risorsa o se l'adozione di una delle due condizioni di flusso non influenzi quanta energia si possa ricavare nel lungo periodo.

Al termine della simulazione, la temperatura d'uscita del fluido termovettore ha raggiunto i 25 °C , diminuendo di quasi $0,5 \text{ °C}$ (circa $0,05\text{-}0,06 \text{ °C l'anno}$) rispetto alla fine del primo anno di attivazione: la differenza con il valore di ingresso ΔT ora si è ulteriormente abbassato a $0,97 \text{ °C}$, scendendo persino sotto l'unità e mostra l'evidente esaurimento della risorsa.

5 - Studio numerico dell'attivazione termica della galleria di base

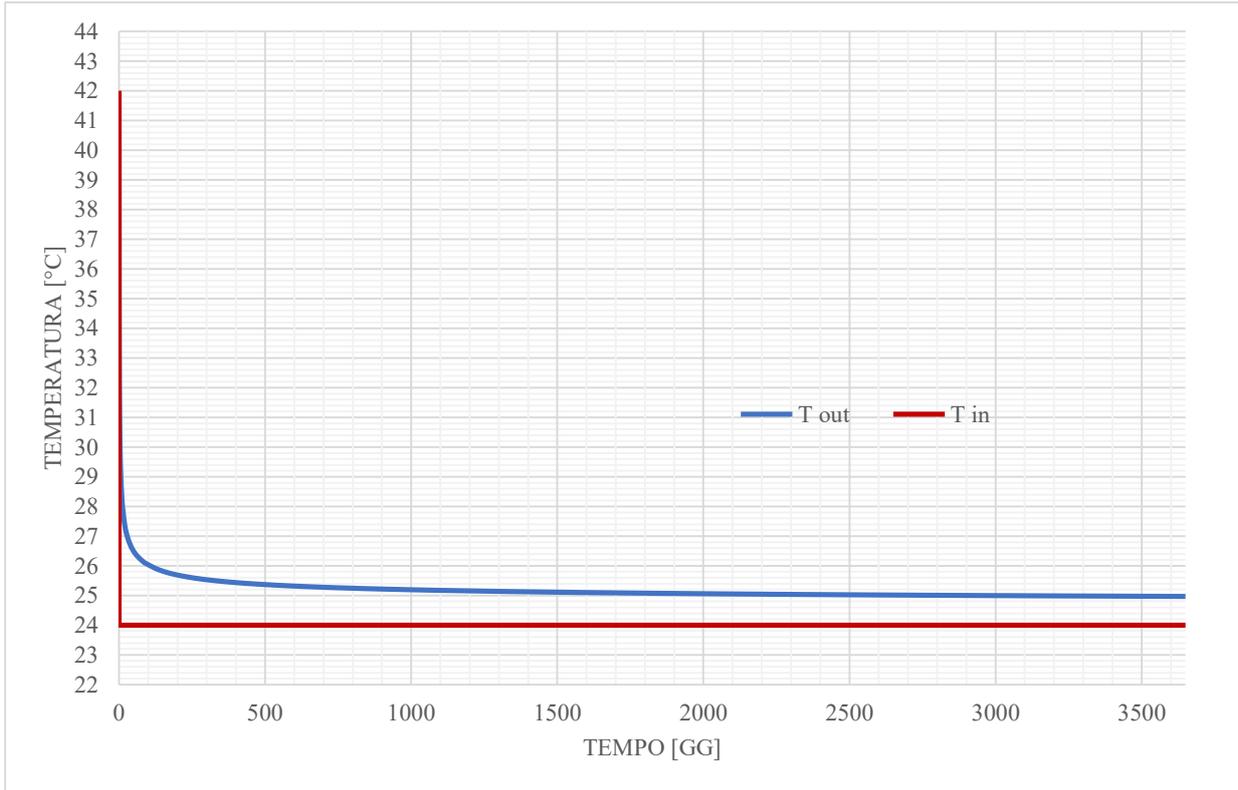


Figura 119. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita dopo 3650 gg, $v=0,6$ m/s

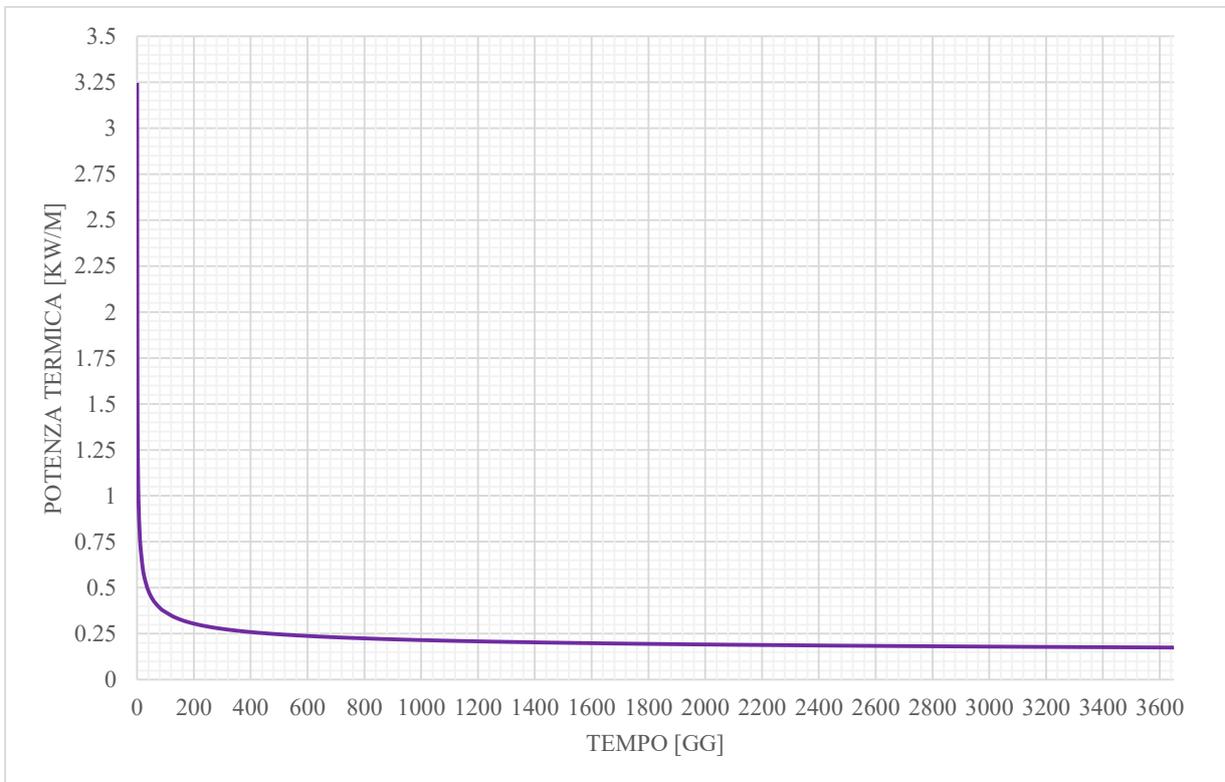


Figura 120. Profilo nel tempo della potenza termica in kW/m, $v=0,6$ m/s

La potenza termica in kW/m, che al termine di 365 giorni, assumeva un valore di 0,28, diminuisce ulteriormente fino al valore di 0,175 (risultati in Figura 120), a cui corrisponde una potenza in MW pari a 1,75 per il tratto di galleria lungo 10 km che si sta considerando (Tabella 23).

Tabella 23. Risultati ottenuti al termine di 1, 30, 60, 90, 180, 365, 3650 giorni ($v=0,6$ m/s)

	ΔT [°C]	Q [W]	q [kW/m]	E [MW]
24 h	9.68	4888.78	1.75	17.46
30 gg	2.94	1482.93	0.53	5.30
60 gg	2.35	1188.04	0.42	4.24
90 gg	2.09	1056.07	0.38	3.77
180 gg	1.73	874.98	0.31	3.12
365 gg	1.53	773.61	0.28	2.76
3650 gg	0.97	489.73	0.17	1.75

5.5.4 Analisi di 10 anni con $v = 0,8$ m/s

Si è ripetuta l'analisi con la velocità di flusso di 0,8 m/s all'ingresso e uscita del percorso dei tubi.

Ci si aspetta che il potenziale geotermico si sia andato ad esaurire (o sia prossimo ad esaurirsi) come nel caso precedente e, poiché si ha una circolazione del fluido e una portata di flusso massica maggiore, che la differenza tra la temperatura del fluido all'ingresso e all'uscita ΔT sia leggermente inferiore rispetto alla precedente simulazione di 3650 giorni con $v = 0,6$ m/s.

Se dopo un anno di funzionamento continuo, la temperatura d'uscita risultava essere di 25,15 °C, dopo 10 anni di analisi, questo valore si è abbassato fino a 24,75 °C, fornendo una differenza ΔT uguale a 0,75 °C (minore di 0,22 °C rispetto al caso precedente, vedi Figura 121).

Il profilo di potenza termica nel corso degli anni è mostrato in Figura 122: se al termine di un anno il valore stimato era (come nel caso di velocità di flusso di 0,6 m/s) 0,28 kW/m, con un'analisi di lungo termine come questa si abbassa fino a 0,181 kW/m. Considerando il tratto di galleria di 10 km, la potenza stimata in MW risulta dunque pari a 1,81 (in Tabella 24 si riassumono i risultati ottenuti dopo 1, 30, 60, 90, 365 e 3650 giorni).

5 - Studio numerico dell'attivazione termica della galleria di base

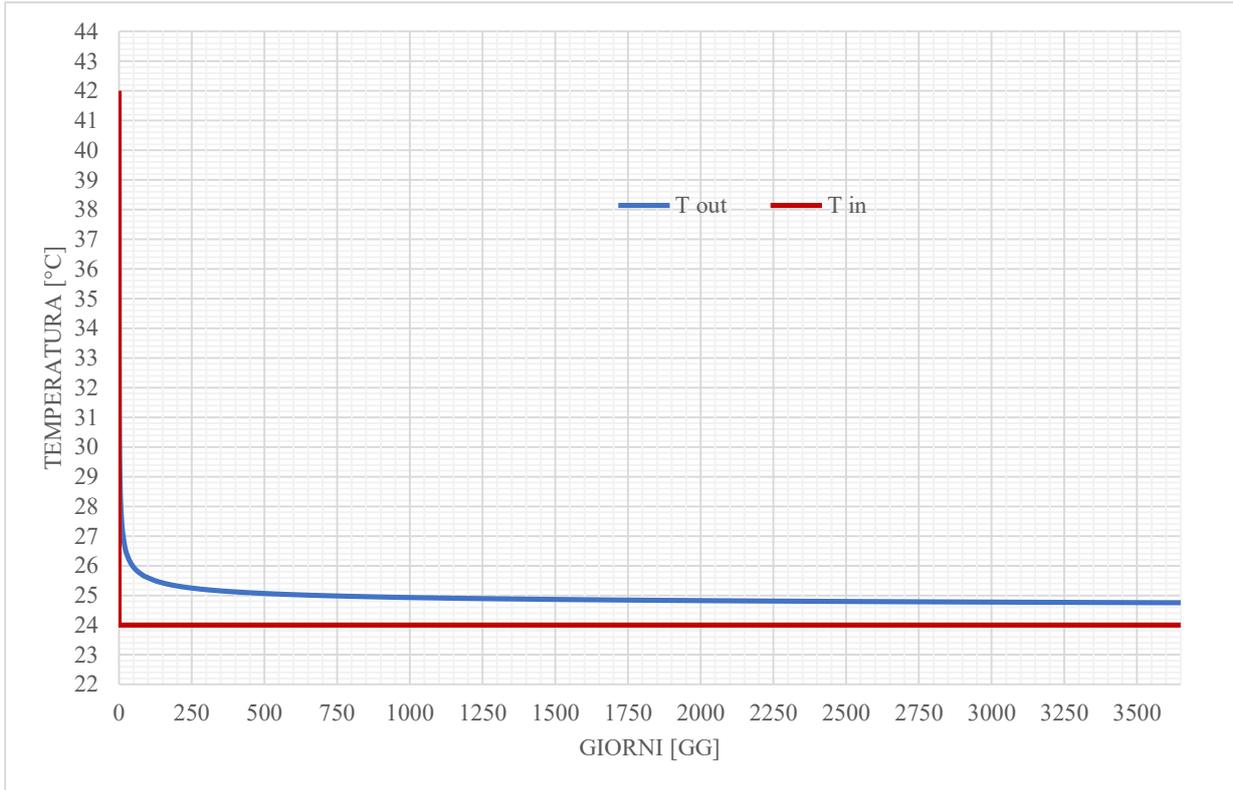


Figura 121. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita dopo 3650 gg, $v=0,8$ m/s

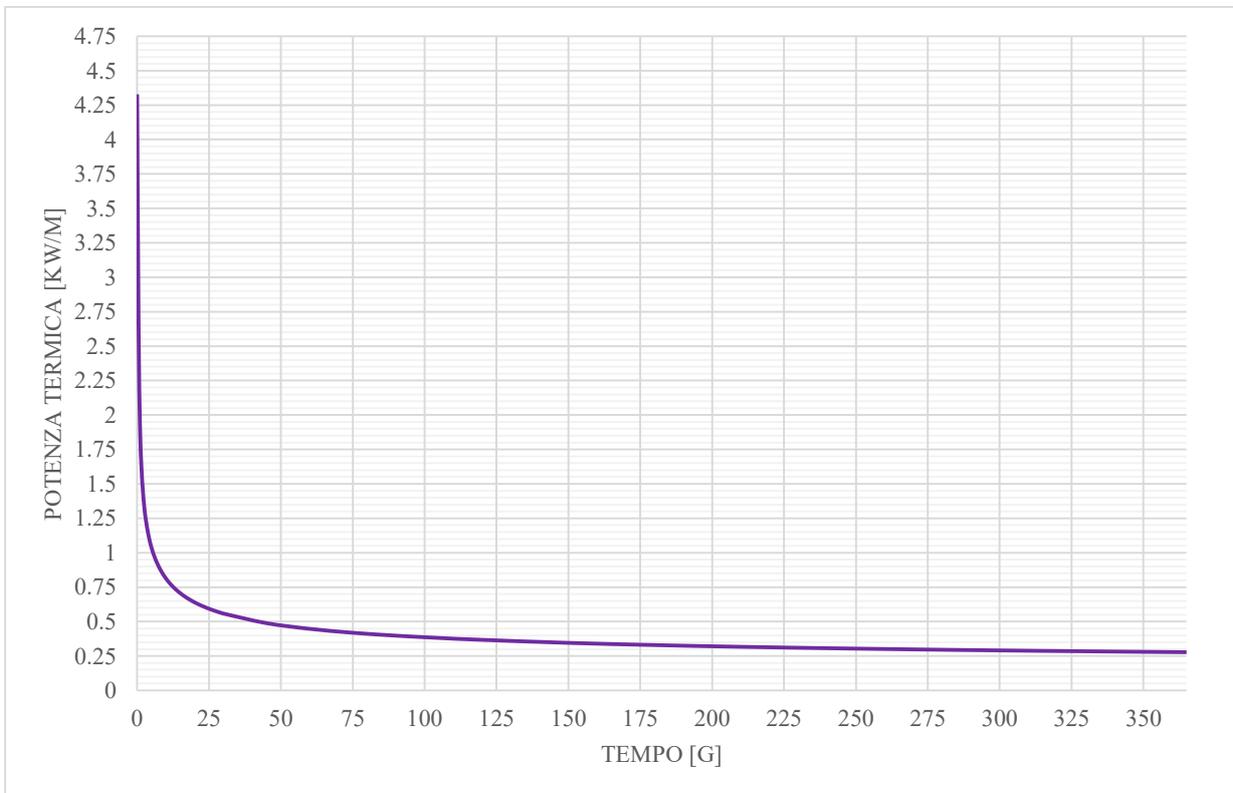


Figura 122. Profilo nel tempo della potenza termica in kW/m, $v=0,8$ m/s

Le differenze, dunque, con i risultati ottenuti nel caso si scegliesse una velocità di flusso di 0,6 m/s, sono molto basse e tendono a ridursi col prolungarsi della simulazione. Da un punto di vista economico, se si volesse far funzionare l'impianto in maniera continua sarebbe più conveniente l'adozione di una velocità di flusso del fluido termovettore di 0,6 m/s a parità di potenza estraibile.

Tabella 24. Risultati ottenuti al termine di 1, 30, 60, 90, 180, 365, 3650 giorni ($v=0,8$ m/s)

	ΔT [°C]	Q [W]	q [kW/m]	E [MW]
24 h	7.92	5329.27	1.90	19.03
30 gg	2.31	1552.24	0.55	5.54
60 gg	1.84	1239.81	0.44	4.43
90 gg	1.64	1100.97	0.39	3.93
180 gg	1.35	910.10	0.33	3.25
365 gg	1.16	795.98	0.28	2.78
3650 gg	0.75	506.96	0.18	1.81

5.5.5 Calcolo dell'energia termica fornita dall'impianto

Nel settore commerciale, però, si parla sempre di energia fruibile in termini di kWatt·h/anno, ragione per cui, tenendo conto che le ore di attivazione dell'impianto geotermico in un anno di funzionamento continuo sono pari a 8760 h, si può calcolare la potenza sfruttabile al primo anno.

Moltiplicando le ore di attivazione del circuito per la potenza estraibile da una coppia di anelli in serie e dalle tre serie di coppie di anelli (i dati si riferiscono ai risultati stimati assumendo la velocità di 0,6 m/s e al termine dei primi 365 giorni) si ottiene:

$$E_{\text{coppia di anelli}} = Q \cdot 8760 \frac{h}{\text{anno}} = 0,773 \cdot 8760 \frac{h}{\text{anno}} = 6771,48 \frac{kWh}{\text{anno}} = 6,77 \frac{MWh}{\text{anno}}$$

Il tratto longitudinale a cui è stata assegnata la temperatura media di 42 °C, considerato per la galleria, va da pk 42 a 52 (Figura 89). Il numero di anelli che si dovrebbe installare, per coprire tutta la sua lunghezza, può essere calcolato dividendo la sua estensione per la lunghezza della singola coppia di anelli:

$$n = \frac{L}{l_{\text{coppia di anelli}}} = \frac{10000 \text{ m}}{2,8 \text{ m}} = 3571 \text{ coppie di anelli}$$

Per un totale di $3571 \cdot 2 = 7142$ anelli termici circa.

Per calcolare l'energia sfruttabile grazie all'ipotesi di attivazione termica della galleria, si può più facilmente moltiplicare la potenza termica in kW/m per i 10 km di lunghezza interessata: sarà quindi

stimata una potenza termica in MW di 2,76 al termine del primo anno di funzionamento continuo (Tabella 23), a cui corrisponde un'energia in MWh/anno di $24528 \frac{MWh}{anno}$.

Il consumo in termini energetici per il riscaldamento annuale di un edificio sito in Italia si può assumere pari a 50 kWh/m^2 (Corrado et al., 2012) e, di conseguenza, se si volesse calcolare la superficie abitabile che questa energia può soddisfare, si potrebbe pensare di dividere tale energia per il consumo in kWh/m^2 . In realtà, l'energia considerata fino ad ora è quella che si troverebbe a monte della pompa di calore (vedi paragrafo 2.2.2, in particolare la Figura 7) e non coincide esattamente con la totale energia che sarebbe restituita dall'impianto, la quale risulterebbe sicuramente diversa e maggiore. Noto il *C.O.P.* ("Coefficiente di prestazione", la cui definizione per le pompe di calore è già stata fornita al capitolo 2.2.2.), comunque, il valore energetico a valle della pompa può venire calcolato: se, ad esempio, si assumesse un coefficiente di prestazione pari a 4, per la pompa che si pensa di utilizzare nel presente caso studio (si ricorda che per le pompe geotermiche il *C.O.P.* varia in tra 3 e 6), vorrebbe dire che l'energia calcolata fino ad ora corrisponderebbe a $\frac{3}{4}$ del valore totale restituito. Con la formula seguente il valore complessivo restituito può essere stimato pari a $32704 \frac{MWh}{anno}$:

$$\begin{aligned} \text{Energia totale restituita (MWh)} &= \frac{\text{Energia a monte della pompa} \left(\frac{MWh}{anno} \right)}{\frac{3}{4}} \\ \text{Energia totale restituita (MWh)} &= \frac{24528 \frac{MWh}{anno}}{\frac{3}{4}} = 32704 \frac{MWh}{anno} \end{aligned}$$

Si procede, comunque, dividendo l'energia a monte della pompa per il consumo energetico medio di un edificio in Italia, poiché l'area restituita sarà di sicuro più piccola di quella reale. Il calcolo è, dunque, fortemente cautelativo e questa area potrà essere assunta come minimo valore di superficie abitabile di cui si riescono a soddisfare i fabbisogni energetici.

$$A = \frac{\text{Energia sfruttabile}}{\text{Consumo energetico edificio}} = \frac{24528 \cdot 10^3 \frac{kWh}{anno}}{50 \frac{kWh}{m^2}} = 490560 \text{ m}^2$$

Se si considerassero palazzine costituite da 12 appartamenti di 80 m^2 ciascuna, l'energia fornita a monte dall'impianto geotermico sarebbe sufficiente a riscaldarne almeno 511. Non si ripete il calcolo con i risultati ottenuti con una velocità del fluido di $0,8 \text{ m/s}$, essendo il primo caso quello più sfavorevole ($2,76 \text{ MW}$ contro i $2,78 \text{ MW}$ precedenti, Tabella 23 e 24).

5.6 Studio del funzionamento ciclico dell'impianto

Riguardo alla Normativa Italiana, l'articolo 33 del D.P.R. del 20 marzo 1953, n.320 "Norme per la prevenzione degli infortuni e l'igiene del lavoro in sotterraneo", stabilisce che la temperatura dei posti di lavoro sotterranei deve essere contenuta per mezzo della ventilazione e, se necessario, ricorrendo ad altri mezzi, al di sotto del limite massimo di 30 gradi centigradi del termometro asciutto o di 25 gradi centigradi del termometro bagnato. Inoltre, aggiunge che qualora non sia possibile mantenere la temperatura entro i limiti sopraindicati, il normale lavoro può essere continuato a condizione che la permanenza dei lavoratori in sotterraneo non si prolunghi oltre le 6 ore al giorno, se la temperatura non supera i 35 gradi centigradi a termometro asciutto o i 30 gradi centigradi a termometro bagnato.

Si parla, però, di limiti associati alla temperatura nell'ambiente interno durante le fasi di costruzione della galleria (quando l'impianto geotermico, non ancora attivato, non fornirebbe alcun beneficio a riguardo) e non durante il normale esercizio dell'infrastruttura. La massima soglia di temperatura entro cui mantenersi all'interno dell'infrastruttura, però, viene stabilito nel documento inerente alla ventilazione del tunnel di base (LTF, 2013): tale massimo ha il valore di 32 °C, con riferimento alle norme esistenti relative alle operazioni di manutenzione in galleria.

Poiché il minimo valore di temperatura dell'aria nell'ambiente interno della galleria, dopo un anno di simulazione a funzionamento continuo, è in media di 25°C, si può affermare che i massimi della LTF (2013) per le condizioni termiche in esercizio vengono rispettati. Ipotizzando di sospendere la circolazione del fluido termovettore nelle serpentine e, di conseguenza, l'estrazione di calore dall'aria interna alla galleria, si potrebbe rischiare di superare le soglie imposte e sarebbe necessario ricorrere, in certi periodi dell'anno, ad un sistema di ventilazione forzata o altri metodi. Queste valutazioni saranno nuovamente ripetute in seguito allo svolgimento e trattazione di analisi numeriche a funzionamento ciclico dell'impianto geotermico.

- *Valutazioni e necessità del funzionamento ciclico dell'impianto*

Un aspetto particolarmente importante ai fini dell'efficienza delle pompe di calore geotermiche riguarda la durata della sorgente termica, evitando il depauperamento di energia termica o frigorifera a disposizione; risulta, a tal fine, molto importante una ricarica del terreno (Capozza et al., 2012).

È, quindi, necessario ipotizzare anche un funzionamento di tipo ciclico per l'impianto in esame, così da non comprometterne i benefici, essendo le energie finali estraibili davvero esigue e non convenienti rispetto ai costi di funzionamento della pompa di calore.

Poiché dallo studio condotto da TELT (2021), in accordo col Politecnico di Torino, è stato assegnato alla zona di Chiomonte un fabbisogno, dovuto al teleriscaldamento, che esclude i mesi estivi, si è preso come scenario di prima ipotesi l'attivazione dell'impianto geotermico in configurazione AIR con sospensione nei tre mesi di Giugno, Luglio e Agosto. Il D.P.R. 412/93 ("Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia") pone sia il comune di Susa che di Chiomonte in Zona F e questo consente di non avere alcuna limitazione sui massimi d'esercizio del periodo annuale né sulla durata giornaliera di attivazione.

Per fare ciò, si utilizza nel software FEFLOW, l'opzione di "Time Series", nella finestra di 'Edit'. Tramite questa funzione si può dare una variazione temporale ai parametri che si vogliono (velocità, temperatura ecc.) e si potrà inserire questa condizione come condizione al contorno nei nodi del modello.

Si sono, dunque, create tre funzioni temporali che prevedano la sospensione dell'impianto geotermico nei mesi estivi, imponendo una velocità del fluido nulla nei punti d'ingresso e di uscita delle serpentine e non assegnando alcuna temperatura d'ingresso al fluido (e che quindi sarà pari a quella di equilibrio del terreno). Ciò avviene attraverso l'aggiunta, nelle "Time Series", di intervalli ("gap") che creano un salto temporale e disattivano la condizione al contorno presente fino all'istante precedente (vedi Figura 123).

Inoltre, con l'opzione 'Cyclic' del "Time mode" si riesce a ripetere nel tempo la funzione creata, purché il valore del parametro scelto sia lo stesso al primo e ultimo istante assunto della serie temporale. Gli "Observational Points" durante queste simulazioni sono stati ridotti a:

- i punti d'ingresso e di uscita del fluido dai tubi scambiatori;
- il punto all'interno della galleria, posto a distanza di 2,31 m per monitorare il profilo temporale della temperatura dell'aria.

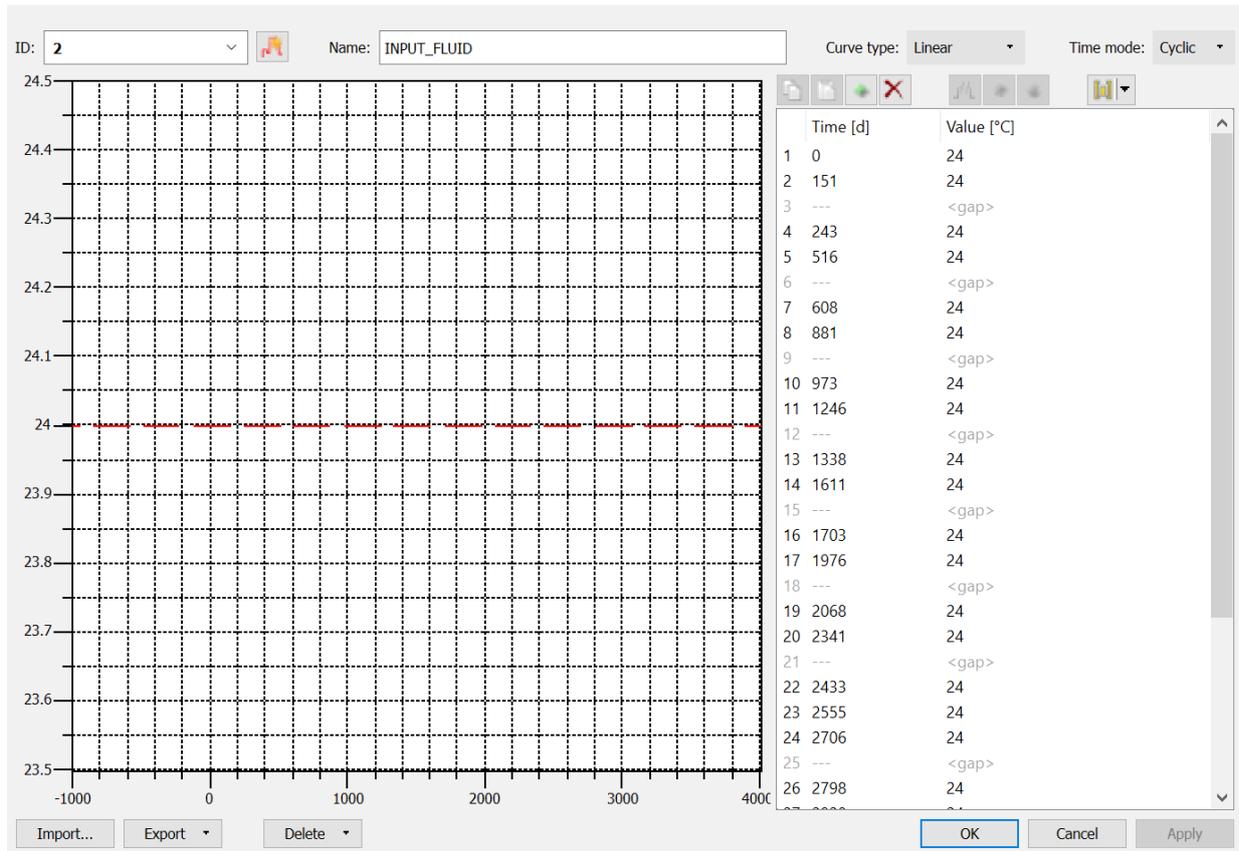


Figura 123. "Time Series" della temperatura d'ingresso del fluido termovettore

5.6.1 Spegnimento nei mesi estivi per 1 anno con $v = 0,6$ m/s

La prima simulazione è stata prevista con una durata di 365 giorni: per i mesi di Gennaio, Febbraio, Marzo e Aprile e Maggio non ci sono differenze con i risultati ottenuti precedentemente (Figura 113, la temperatura del fluido all'uscita dalle serpentine assume il valore di 25,82 °C). La differenza, in questo caso, avviene dal mese di Giugno, mese a partire dal quale l'impianto è stato spento e alla temperatura dell'aria all'interno della sezione è permesso di risalire.

La Figura 124 mostra come sia le temperature all'ingresso, che quelle all'uscita dei tubi tornino ad assumere lo stesso profilo temporale, crescente per tutti i giorni dei tre mesi estivi, ma che la velocità con cui la temperatura torna a salire non è la stessa velocità con cui il fluido si è andato a raffreddare quando si è attivato l'impianto per la prima volta. Ciò è dovuto al fatto che il processo con cui si raffredda è molto rapido, mentre la successiva risalita è dovuta al calore della sorgente interna e alle condizioni al contorno di temperatura ai bordi del modello, che evidentemente impiegano più tempo a far aumentare la temperatura nella galleria. Nei primi 90 giorni, infatti, il parametro termico era sceso di circa 16 °C, per poi risalire di circa 11,4 °C nei 92 giorni di sospensione e riscendere, dopo 90 giorni a partire dal mese di Settembre, di circa 11,47 °C. La durata durante la quale il fluido non circola nelle serpentine

non è sufficiente affinché l'ambiente termico torni ad essere lo stesso che si aveva in condizioni indisturbate, prima che si iniziasse ad estrarre calore dall'aria interna, ma permette comunque al fluido di rialzare la sua temperatura fino a 37,25 °C; se questa sospensione non fosse avvenuta, invece, la temperatura all'uscita sarebbe continuata a scendere fino a 25,7 °C.

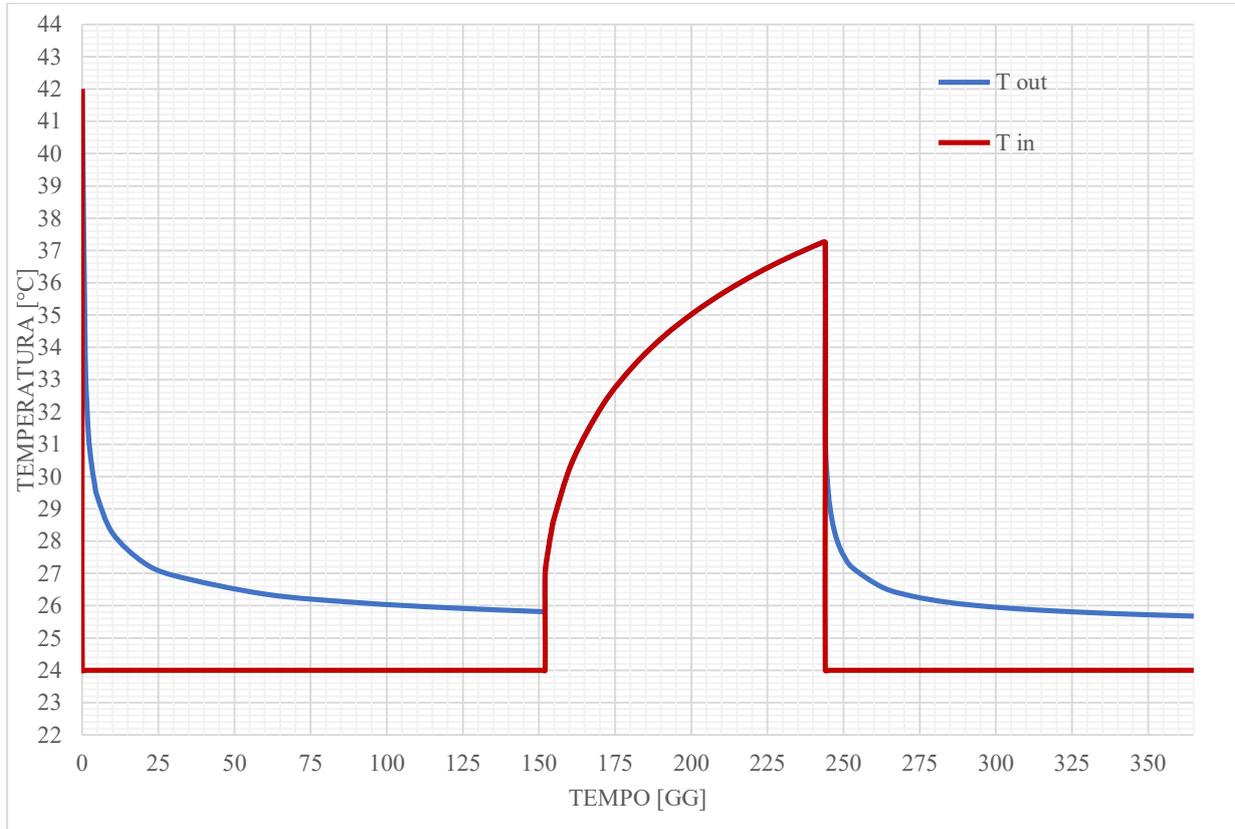


Figura 124. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita (365 gg di funzionamento ciclico), $v=0,6$ m/s

In questo modo, al termine di un anno di simulazione, la temperatura del fluido uscente raggiunge i 25,68 °C, mostrando una differenza rispetto a quella del fluido all'ingresso ΔT di 1,68 °C (si ricorda che per il funzionamento continuo era di 1,53 °C).

La temperatura dell'aria all'interno della galleria assume un profilo abbastanza simile a quello del fluido all'uscita dai tubi, ma leggermente inferiore durante i giorni di estrazione di calore e superiore durante quelli di sospensione, e ciò è dovuto al fatto che il punto interno alla galleria si trova ad una distanza minore dalla fonte di calore di 12 Watt applicata nel nodo centrale rispetto al punto di osservazione del fluido all'uscita, che è, invece, annegato nello strato di calcestruzzo del rivestimento (vedi Figura 108) del tunnel.

5.6.2 Spegnimento nei mesi estivi per 1 anno con $v = 0,8$ m/s

Simili considerazioni possono essere fatte nel caso la simulazione venga ripetuta assumendo una velocità di flusso del fluido termovettore maggiore e pari 0,8 m/s.

L'andamento della temperatura del fluido all'ingresso, come anche di quella all'uscita, del percorso di serpentine è riportata in Figura 125. Dal mese di Giugno la temperatura interna torna a salire, partendo dal valore raggiunto di 25,42 °C (inferiore di 0,4 °C rispetto al caso precedente alla fine del mese di Maggio). Durante i tre mesi di sospensione questo valore ora risale di 11,67 °C (0,2 °C in più in confronto al caso con $v = 0,6$ m/s) e al termine dei 365 giorni si abbassa fino a 25,27 °C, mentre con l'uso di un funzionamento continuo si era raggiunto un valore finale di 25,14 °C. La differenza tra la temperatura del fluido all'uscita e all'ingresso delle serpentine ΔT non è molto diversa dal caso in cui non si fosse mai spento l'impianto (ora 1,27 °C, rispetto ai precedenti 1,14 °C) e questo fa mettere in dubbio l'effettivo beneficio della sospensione dell'estrazione di calore se non in termini di costi.

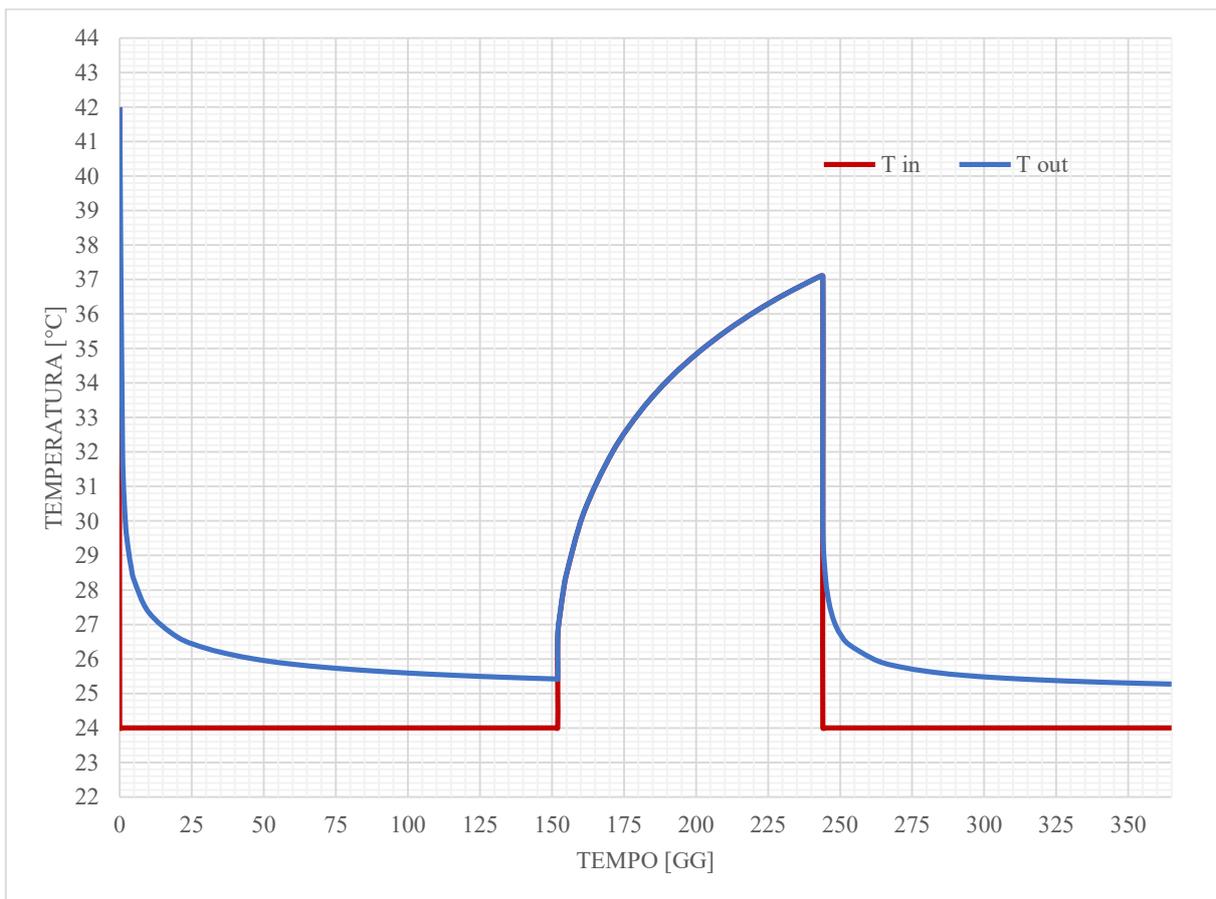


Figura 125. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita (365 gg di funzionamento ciclico), $v=0,8$ m/s

Per poter confrontare i risultati ottenuti fino ad ora, si è inserita la Tabella 25, considerando entrambi i casi di funzionamento (continuo e stagionale), per un anno di simulazione ed adottando entrambe le velocità di flusso del fluido.

Tabella 25. Confronto dei risultati per entrambi i tipi di funzionamento e velocità del fluido (365 gg)

365 gg	Funz. Continuo		Funz. Stagionale	
	v = 0,6 m/s	v = 0,8 m/s	v = 0,6 m/s	v = 0,8 m/s
ΔT [°C]	1.53	1.14	1.68	1.27
Q [W]	773.61	795.98	847.98	855.10
q [kW/m]	0.27	0.28	0.30	0.31
E [MW]	2.76	2.78	3.03	3.05

5.6.3 Spegnimento nei mesi estivi per 10 anni con $v = 0,6$ m/s

Si sono fatte altre due simulazioni con lo stesso tipo di funzionamento ciclico, allungando la finestra temporale fino a 10 anni. I risultati sono racchiusi nel grafico in Figura 126.

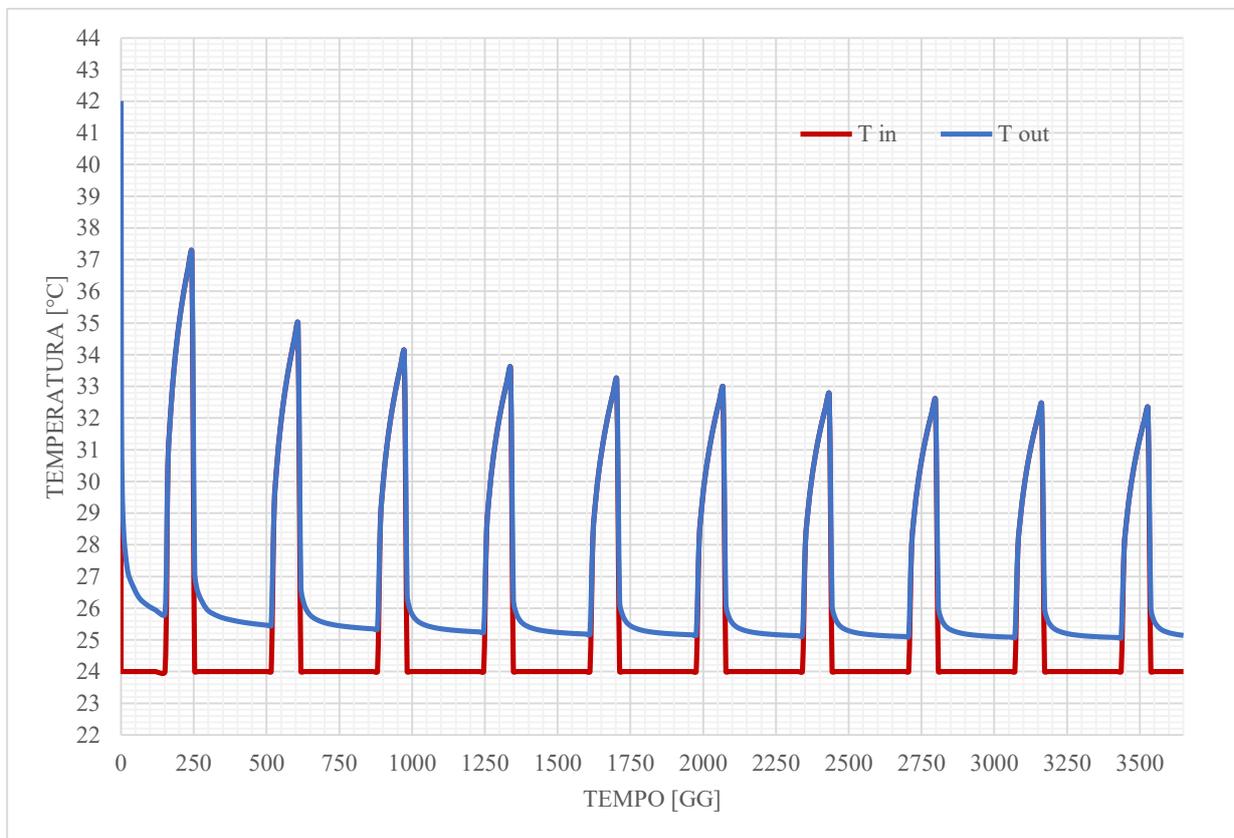


Figura 126. Andamento temporale della temperatura all'ingresso e uscita del fluido dopo 10 anni di funz. ciclico ($v=0,6$ m/s)

Durante i giorni in cui è sospesa l'estrazione di calore, la temperatura del fluido assume come prima un andamento esponenziale di risalita (dovuto sia alla presenza della fonte di calore di 12 W sia all'influenza del terreno più caldo in cui il tunnel si trova) più lento rispetto al processo di raffreddamento (che invece è molto rapido). Inoltre, ogni anno, nonostante i giorni di spegnimento siano sempre 92, le condizioni iniziali sono diverse, la risorsa geotermica si sta prosciugando e, dunque, la temperatura nel punto d'uscita del fluido, come anche quella dell'aria interna, non cresce con la stessa

velocità dell'estate dell'anno precedente: nel primo anno, ad esempio, la risalita è di 11,43 °C e va abbassandosi a 9,53 °C nel secondo anno, 8,76 °C nel terzo e così via, fino a 7,25 °C al decimo anno. La condizione stazionaria viene raggiunta al nono anno di analisi dopo il quale i profili di temperatura tendono quasi a coincidere. Rispetto al funzionamento continuo la temperatura d'uscita è leggermente più alta e assume il valore di 25,14 °C con una differenza ΔT tra fluido all'ingresso e all'uscita di 1,14 °C, contro il valore di 0,97 °C che si aveva alla fine di 10 anni di circolazione ininterrotta del fluido termovettore.

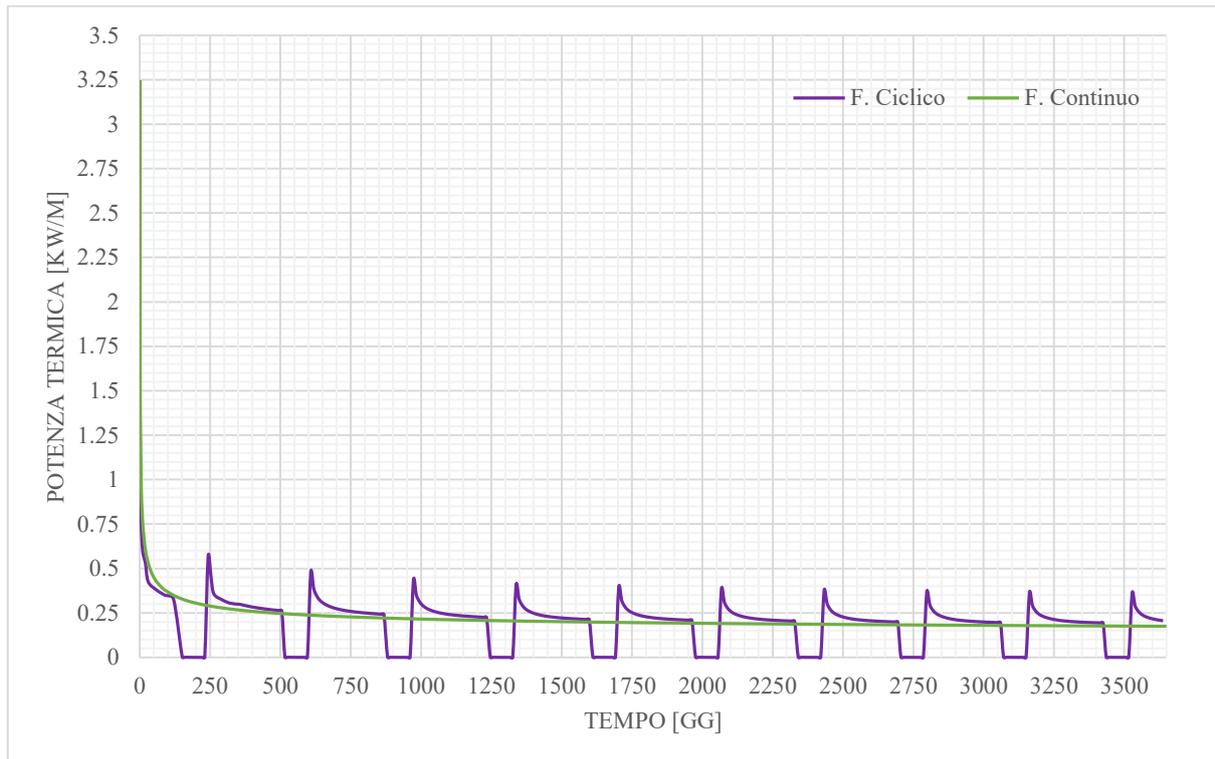


Figura 127. Confronto della potenza di estrazione termica per il caso stagionale e continuo, $v=0,6$ m/s

Ha senso confrontare anche come varino le potenze termiche per le due modalità di funzionamento e valutare quanto si riesca a recuperarne, ipotizzando la sospensione dell'impianto nei mesi estivi. I due andamenti, mostrati in Figura 127, sembrano sovrapporsi, ma in realtà differiscono lievemente e con lo spegnimento dell'impianto si ottiene, dopo 10 anni di simulazione, una potenza termica di 0,205 kW/m, contro i 0,175 kW/m stimati al termine dello stesso periodo con funzionamento continuo.

Si tratta, dunque, di una differenza di 0,03 kW/m, ovvero 30 W/m, a cui corrisponde un recupero di potenza, grazie ai cicli di spegnimento stagionale, di 300 kW. Si aggiunge che, dall'ottavo anno in poi, il profilo di potenza termica lineare al termine della stagione estiva assume un andamento coincidente con quello degli anni successivi.

Mentre per il caso continuo dopo 10 anni di analisi numerica, il potenziale associato al tratto di galleria era di 1,75 MW, ora si aggira attorno ai 2,06 MW. Si proverà comunque ad ipotizzare più scenari per

poter ottenere, per la stessa finestra temporale, una potenza termica che si avvicini quanto più allo scenario meno favorevole stimato al termine dello studio TELT (2021), e che si ricorda valere 3,2 MW (vedi capitolo 3.5).

5.6.4 Spegnimento nei mesi estivi per 10 anni con $v = 0,8$ m/s

Si ripete tutto inserendo il valore di 0,8 m/s per la velocità di flusso del fluido termovettore e si confrontano di nuovo i risultati con il caso di funzionamento continuo ed, infine, con i risultati avuti per il caso precedente.

Durante i giorni in cui è sospesa l'estrazione di calore, la temperatura del fluido assume come prima un andamento esponenziale di risalita (dovuto sia alla presenza della fonte di calore di 12 W sia all'influenza del terreno più caldo in cui il tunnel si trova) più lento rispetto al processo di raffreddamento (che invece è molto rapido), come si vede in Figura 128.

Inoltre, ogni anno, nonostante i giorni di spegnimento siano sempre 92, le condizioni iniziali sono diverse, perché si sta riducendo il potenziale geotermico e questo fatto ha come risultato che la temperatura nel punto d'uscita del fluido, come anche quella dell'aria interna, non cresce con la stessa velocità con la quale è cresciuta nell'estate dell'anno precedente: il periodo di spegnimento dell'impianto è lo stesso, ma le condizioni del terreno attorno alla galleria no. Nel primo anno, ad esempio, la risalita è di 11,6 °C e va abbassandosi a 9,8 °C nel secondo anno, 8,92 °C nel terzo e così via, fino a 7,34 °C al decimo anno. La condizione stazionaria viene raggiunta al nono anno di analisi dopo il quale i profili di temperatura tendono quasi a coincidere. Rispetto al funzionamento continuo la temperatura d'uscita è lievemente più alta, assumendo il valore di 24,88 °C, e la differenza ΔT di temperatura del fluido all'ingresso e all'uscita dei tubi scambiatori è di 0,88 °C al termine della simulazione, maggiore di 0,13 °C rispetto al caso continuo.

I profili di potenza nei due casi sono confrontati in Figura 129: poiché direttamente proporzionale alla differenza ΔT della temperatura del fluido in ingresso e uscita, l'andamento della potenza nel tempo coincide con il profilo termico (nei soli mesi di attivazione ovviamente) a meno di una costante moltiplicativa, in quanto sia la velocità di flusso massica m che la capacità termica c dell'acqua sono invariabili nel tempo.

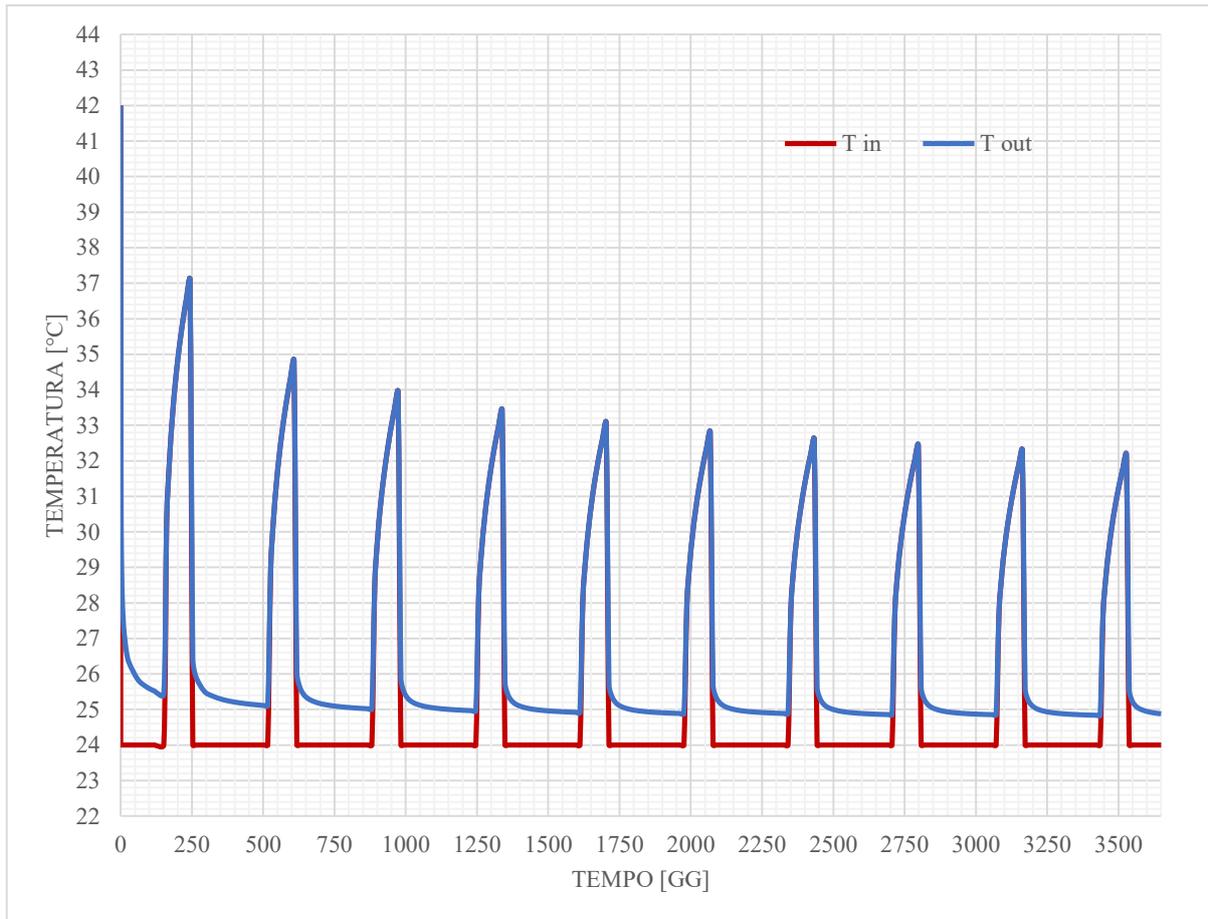


Figura 128. Distribuzione di temperatura del fluido in ingresso e uscita (10 anni con funzionamento ciclico), $v=0,8$ m/s

Al termine di ogni anno la potenza termica va lentamente diminuendo, finché alla fine dell'ottavo, nono e decimo anno subisce un leggerissimo abbassamento di 10 Watt l'anno (0,004 kW/m) e si può definire ormai costante, con un valore di potenza termica al metro di 0,22-0,21 kW/m (e potenza totale stimata, per tutta la porzione scelta di galleria, di circa 2,11 MW). Rispetto alla simulazione continua, la diminuzione di potenziale per gli ultimi tre anni è circa la stessa (10 Watt all'anno) e si può dire che assuma lo stesso valore all'inizio del mese di Giugno passati dieci anni; la potenza termica lineare nel caso continuo è pari a 0,18 kW/m prima dello spegnimento dell'impianto, per un totale stimato per la tratta di galleria in esame pari a 1,81 MW.

Nei periodi in cui si sospende l'estrazione di calore (funzionamento ciclico), la potenza termica riesce comunque a recuperare circa 490-500 Watt nelle ultime tre estati del periodo di indagine; con il caso di funzionamento continuo, negli ultimi tre anni, si registrava una diminuzione praticamente trascurabile di potenza, tra inizio Giugno e fine Agosto, pari a 2 Watt (la potenza termica al metro sarebbe rimasta praticamente costante), ragion per cui si può assumere che, in entrambi i casi, dall'ottavo anno si è stabilita una condizione di regime.

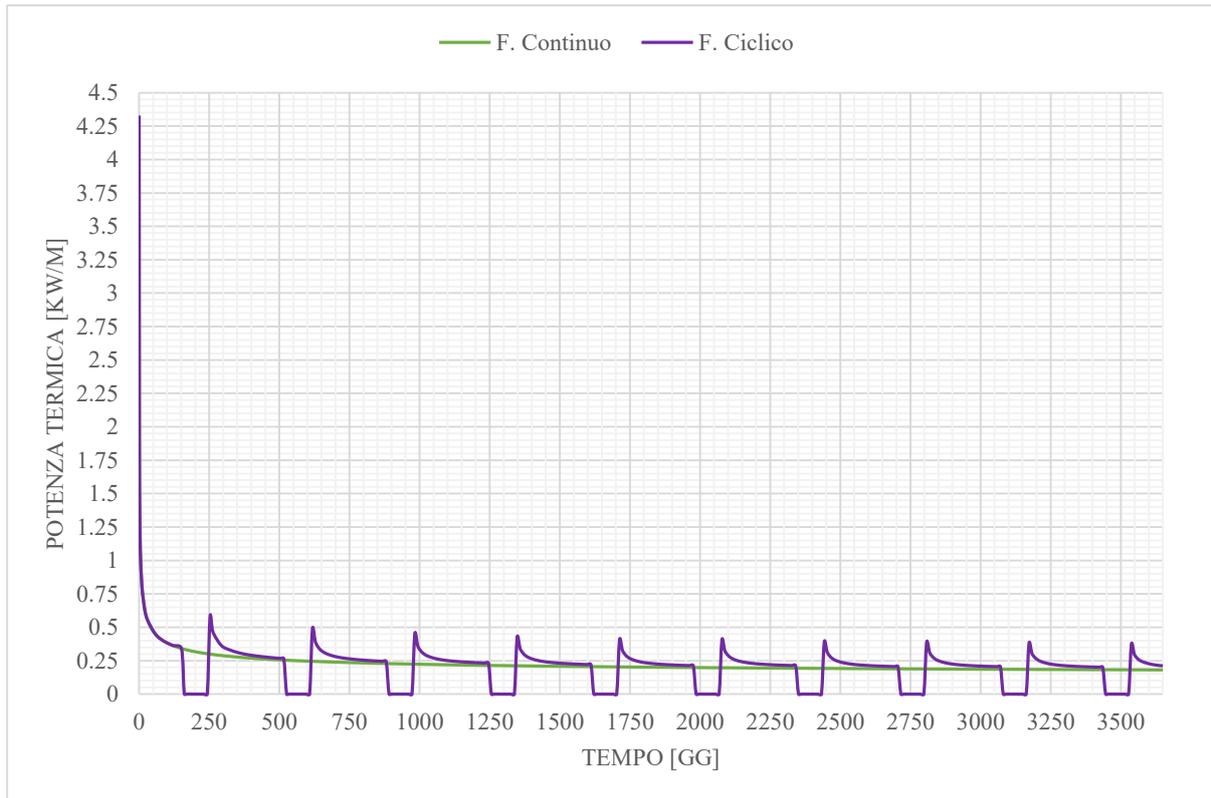


Figura 129. Confronto della potenza di estrazione termica per il caso stagionale e continuo, $v=0,8$ m/s

In tabella 26 si pongono a confronto i risultati, passati dieci anni dall'attivazione termica della galleria, per entrambi i meccanismi di funzionamento: vengono mostrate le differenze di temperatura tra il fluido all'ingresso e all'uscita, le potenze termiche estratte, estratte al metro e infine l'energia quantificabile per la tratta esaminata. Ovviamente, sospendendo la circolazione del fluido nei mesi estivi, si guadagna in potenza termica, ma si perde in energia estraibile in Watt·h avendo ridotto le ore di attivazione annuali.

Tabella 26. Confronto dei risultati per entrambi i tipi di funzionamento e velocità del fluido (10 anni)

3650 gg	Funz. Continuo		Funz. Stagionale	
	$v = 0,6$ m/s	$v = 0,8$ m/s	$v = 0,6$ m/s	$v = 0,8$ m/s
ΔT [°C]	0.97	0.75	1.14	0.88
Q [W]	489.83	507.00	576.34	591.84
q [kW/m]	0.17	0.18	0.21	0.21
E [MW]	1.75	1.81	2.06	2.11

Seppur la differenza di temperatura ΔT sia maggiore assumendo una velocità di flusso del fluido di 0,6 m/s, la potenza termica, come già detto, risente anche della velocità di flusso massica m (direttamente proporzionale alla velocità) e quindi risulta essere leggermente maggiore in caso si adottasse una velocità del fluido di 0,8 m/s. La differenza, comunque, è molto bassa tanto da poter scegliere il valore di 0,6 m/s per analisi e ipotesi di lungo periodo, ottenendo un innegabile vantaggio in termini di costi.

Per entrambe le velocità di flusso, la differenza di potenziale geotermico in MW per la porzione di galleria tra i due tipi di funzionamento, ammonta a 0,3 MW.

Per quanto riguarda i limiti imposti da Normativa sulla temperatura dell'aria all'interno dell'infrastruttura, durante tutti i periodi in cui si sospende l'estrazione di calore, il profilo termico supererà sempre la massima soglia di 32 °C (vedi paragrafo 5.6), seppur non nell'immediato: nelle prime estati, ad esempio, avviene entro la fine di Giugno o a metà di Luglio, motivo per cui sarà necessario o aggiungere un sistema di ventilazione forzata o considerare metodi alternativi.

5.7 Ottimizzazione del funzionamento ciclico dell'impianto

Al fine di ottimizzare l'impianto geotermico e ipotizzare più scenari di disponibilità termica anche in conclusione della presente tesi (dove, però, non si sfrutterebbe il potenziale geotermico delle acque incontrate durante lo scavo, ma quello del calore dell'aria interna alla sezione di scavo del tunnel nel cuore del massiccio d'Ambin, tra i picchetti 42 e 52), sulla scia di quanto fatto nello studio TELT (2021), si è deciso di considerare due ulteriori meccanismi di funzionamento del sistema di conchi energetici ENERTUN (sempre adottando una configurazione 'AIR').

5.7.1 Spegnimento di cinque mesi consecutivi per 10 anni con $v = 0,6$ m/s e $v = 0,8$ m/s

Si è già studiata e calcolata la potenza termica estraibile nel caso di sospensione dei mesi estivi (Giugno, Luglio, Agosto, paragrafo 5.6). Con lo scopo di dare possibilità alla risorsa di recuperare ancora più energia, si è pensato di estendere di altri due mesi il periodo in cui si prevede di spegnere l'impianto geotermico: dal mese di Maggio al mese di Settembre compresi.

La simulazione eseguita è stata fatta durare 10 anni e le condizioni al contorno sono le stesse applicate per le simulazioni precedenti (capitolo 5.5 e 5.6) a funzionamento continuo e ciclico (si ricorda che la velocità dell'aria è di 8 m/s e la sorgente di calore nel nodo centrale di ogni layer è pari a 12 Watt). Diverse saranno, invece, le 'Time series' inserite nei nodi d'ingresso e d'uscita del percorso di tubi scambiatori.

Nella Figura 130 sottostante, vengono mostrati gli andamenti temporali, per i 3650 giorni di analisi numerica studiati, della potenza termica in kW/m: i casi con velocità di flusso di 0,6 e 0,8 m/s sono sovrapposti e si distinguono con due diversi colori.

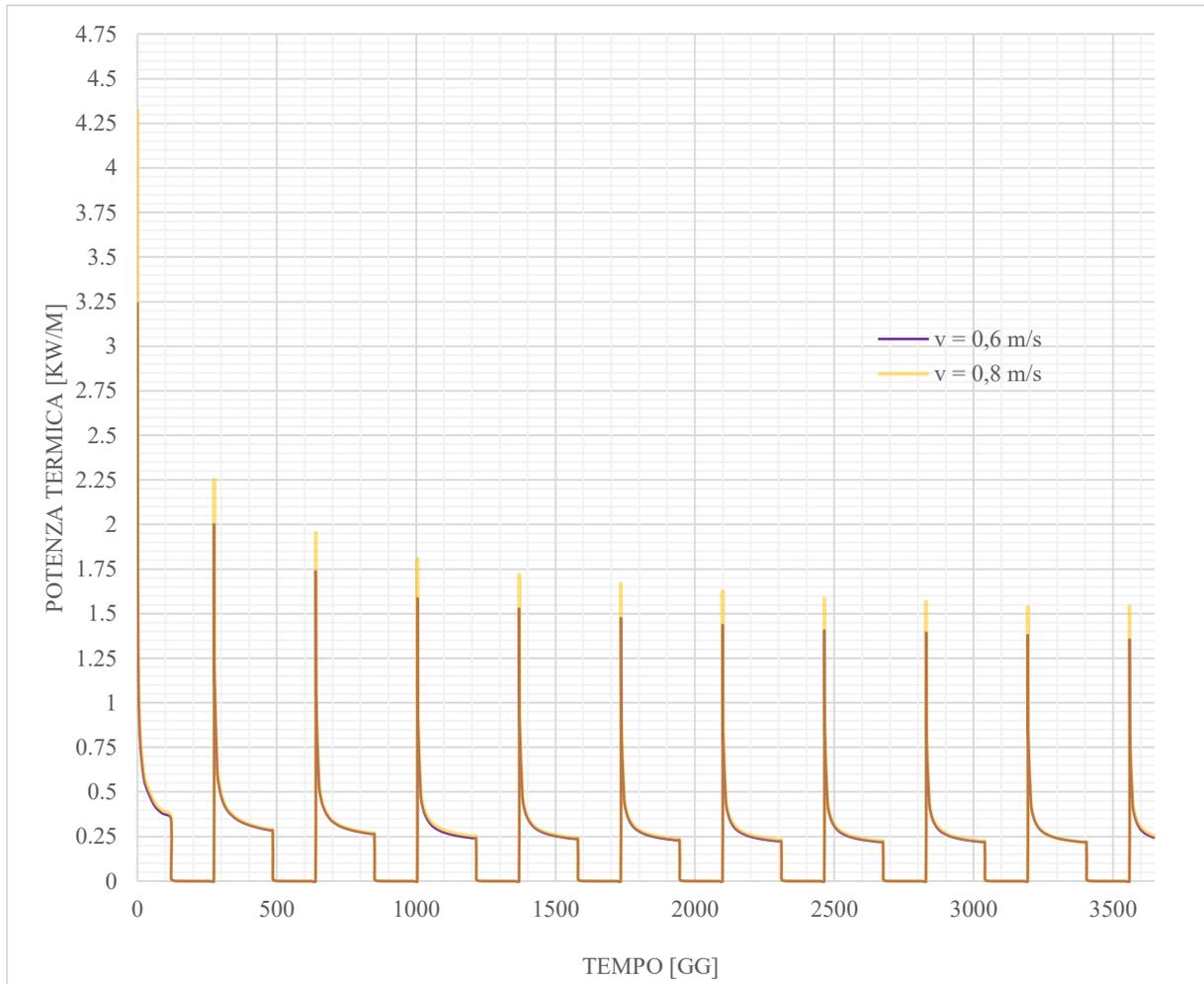


Figura 130. Profilo temporale della potenza termica estraibile dalla galleria

E' evidente, dal confronto dei profili di potenza, che si riscontrano le maggiori differenze (con le due diverse velocità di flusso del fluido termovettore) quando l'impianto viene riacceso (mese di Ottobre), mentre i due profili tendono a sovrapporsi quasi perfettamente già dopo pochi giorni dalla riattivazione. Questo tipo di comportamento, inoltre, col passare degli anni è ancora più evidente: già dal quinto anno la differenza che si ha, in termini di potenza termica al metro per le due velocità, alla fine del mese di Aprile (prima di sospendere la circolazione del fluido) è pari a 0,005 kW/m.

Dall'ottavo anno in poi (alla fine del mese di Aprile, dopo che sono trascorsi 7 mesi di continua estrazione di calore), con una velocità di flusso del fluido di 0,6 m/s, la potenza termica ammonta a 0,218-0,217 kW/m e rimane costante anche negli anni successivi (sempre in riferimento a quello stesso periodo dell'anno). Se la velocità adottata è, invece, di 0,8 m/s, tra l'ottavo e il decimo anno di simulazione, e alla fine del mese di Aprile, la potenza termica tende ancora a subire qualche variazione, passando da 0,224 kW/m nell'ottavo anno fino a 0,217 kW/m nel decimo anno: si nota dunque che ha raggiunto lo stesso valore del caso in cui la velocità di flusso è pari a 0,6 m/s. Per questa ragione si può concludere che, a regime, la potenza termica è di 0,217 kW/m.

I risultati in termini di potenza termica al metro q (kW/m) e potenziale geotermico Q (MW) disponibile per l'intera lunghezza della galleria che si suppone di attivare termicamente (ovvero 10 km) sono racchiusi in Tabella 27.

Tabella 27. Potenza termica e potenza annuale della galleria prima della sospensione

Fine Aprile	$v = 0,6 \text{ m/s}$			$v = 0,8 \text{ m/s}$		
	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]
I anno	1.938	0.350	3.496	1.510	0.363	3.631
II anno	1.566	0.282	2.823	1.192	0.287	2.865
III anno	1.454	0.262	2.623	1.106	0.266	2.660
IV anno	1.325	0.239	2.390	1.041	0.250	2.504
V anno	1.301	0.235	2.347	0.997	0.240	2.399
VI anno	1.262	0.228	2.276	0.974	0.234	2.343
VII anno	1.230	0.222	2.218	0.953	0.229	2.292
VIII anno	1.207	0.218	2.178	0.931	0.224	2.238
IX anno	1.208	0.218	2.180	0.923	0.222	2.219
X anno	1.203	0.217	2.169	0.904	0.217	2.174

Dal confronto dei risultati in Tabella 27, ottenuti al termine della massima durata di esercizio dei concetti energetici sotto questa tipologia di funzionamento (spegnimento di 5 mesi), sembrerebbe più conveniente l'assunzione di una velocità di flusso di 0,6 m/s: si ricorda, infatti, che una velocità più bassa di circolazione del fluido comporta un risparmio in termini economici. Poiché in termini energetici una velocità di 0,8 m/s porterebbe ad un aumento di potenza termica al metro di 0,01 kW/m nel primo anno (che va, infine, ad annullarsi al decimo anno di simulazione) o, in alternativa, porterebbe ad un aumento di 0,13 MW nel primo anno (che si abbassa a 0,004 MW in riferimento al decimo anno di simulazione), si può concludere che non c'è beneficio di potenziale geotermico con l'assunzione del valore di velocità di flusso più elevata.

Le maggiori differenze dovute alle diverse condizioni di flusso esaminate si hanno se ci si focalizza nei giorni in cui l'impianto viene riattivato: i giorni di sospensione sono sempre 154, ma le temperature raggiunte in galleria prima dello spegnimento saranno sicuramente minori nel caso di velocità di 0,8 m/s. In Figura 131 vengono sovrapposti gli andamenti temporali delle temperature d'uscita del fluido dal circuito di serpentine: alla fine del mese di Aprile del decimo anno di analisi numerica, infatti, se con una velocità di flusso di 0,6 m/s veniva raggiunta una temperatura di 25,2 °C (con un ΔT di 1,2 °C), con una velocità di 0,8 m/s, questo valore si abbassa a 24,9 °C (ΔT pari a 0,9 °C). Ci si aspetta allora che, nel momento in cui si ricomincia a fare circolare il fluido nel circuito di tubi presente nei concetti termici, i due ambienti termici all'interno della galleria siano leggermente diversi.

In realtà, se si guarda il decimo anno di simulazione, le temperature nei punti d'uscita del fluido al termine del periodo di pausa differiscono di solo 0,16 °C: nel caso di velocità di 0,6 m/s, la temperatura ad inizio Ottobre ha raggiunto i 34,58 °C, mentre per la velocità di 0,8 m/s, la temperatura è risalita fino a 34,42 °C.

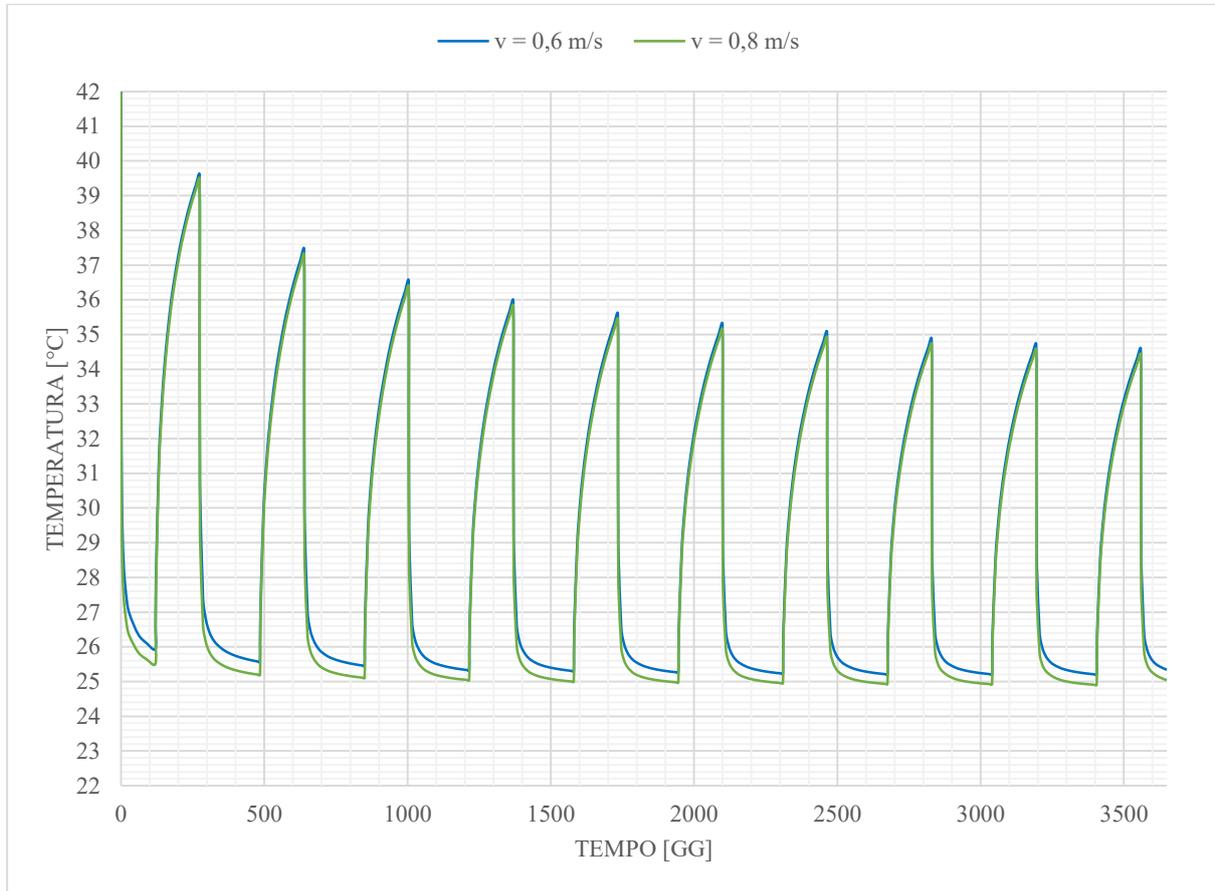


Figura 131. Andamento temporale della temperatura d'uscita del fluido con sospensione di 5 mesi (3650 gg)

La Tabella 28, che segue, ha lo scopo di evidenziare le differenze tra i due casi in termini di potenza e non di temperatura. Si sottolinea, però, che i valori racchiusi nella tabella di seguito fanno riferimento non al primo istante che segue la riaccensione dell'impianto geotermico, ma trascorsa mezza giornata da quando il fluido termovettore ha ricominciato la sua circolazione nel percorso di tubi (cioè nel giorno 274.5 per il primo anno, 639.5 per il secondo ecc.).

Nel caso di velocità di flusso di 0,6 m/s, durante il primo anno la potenza termica al termine del mese di Aprile aveva raggiunto il valore di 0,35 kW/m (3,5 MW per i 10 km di tunnel supposti di attivare termicamente, vedi Tabella 27) e, trascorse 12 ore dalla riattivazione all'inizio del mese di Ottobre, è risalita fino a 2 kW/m (20 MW per l'intero tratto).

Tabella 28. Recupero di potenza termica ed energia dopo la sospensione di 5 mesi, al giorno 274.5 dell'anno considerato

Inizio Ottobre	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]
I anno	11.102	2.002	20.022	9.365	2.252	22.520
II anno	9.636	1.738	17.378	8.126	1.954	19.542
III anno	8.797	1.587	15.865	7.521	1.809	18.086
IV anno	8.476	1.529	15.286	7.153	1.720	17.201
V anno	8.184	1.476	14.760	6.941	1.669	16.691
VI anno	7.969	1.437	14.373	6.767	1.627	16.272
VII anno	7.798	1.406	14.064	6.599	1.587	15.869
VIII anno	7.728	1.394	13.938	6.519	1.568	15.677
IX anno	7.653	1.380	13.803	6.393	1.537	15.374
X anno	7.520	1.356	13.562	6.413	1.542	15.421

I risultati del primo anno non si mantengono costanti anche nei successivi; è dal settimo anno in poi, invece, che si può affermare di riuscire a ripartire, nei mesi autunnali di tutti gli anni successivi, da una potenza termica di picco tra 1,36 -1,4 kW/m (a cui sono associati 13,6 -14 MW, in riferimento alla porzione di galleria ipotizzata termicamente attiva). Si ricorda che, non a caso, è sempre dal settimo anno di simulazione che, al termine di tutti i mesi di Aprile fino al decimo anno (prima di spegnere l'impianto), si raggiunge il medesimo valore di potenza termica al metro di 0,2 kW/m, nel caso si sia adottata la velocità di flusso di 0,6 m/s.

L'analisi con velocità di flusso di 0,8 m/s ha mostrato che, durante il primo anno, la potenza termica alla fine del mese di Aprile aveva raggiunto il valore di 0,36 kW/m (3,6 MW per i 10 km di tunnel che si vorrebbero attivare termicamente, vedi Tabella 27) per poi risalire, trascorse 12 ore dalla riattivazione all'inizio del mese di Ottobre, a 2,25 kW/m (22,5 MW per l'intero tratto). Come nel caso visto precedentemente, i risultati ottenuti al primo anno non si mantengono costanti negli anni successivi e si continua ad avere una diversa diminuzione di potenza termica (prima dello spegnimento dell'impianto) fino all'ottavo anno; durante gli ultimi due anni di analisi numerica, invece, si potrebbe affermare di ripartire, nel mese di Ottobre, dalla potenza termica attorno ai 1,54 – 1,56 kW/m (pari a 15,4 – 15,6 MW, se la si associa all'intera porzione ipotizzata attiva, da pk 42 a 52). Alla fine del mese di Aprile del nono anno di simulazione (e quindi prima di spegnere l'impianto), infatti, si raggiunge il medesimo valore di potenza termica al metro che si ha, in quello stesso periodo, al decimo anno (e che si suppone rimanga invariato anche in riferimento allo stesso periodo degli anni successivi). Il valore a cui si fa riferimento è di 0,2 kW/m ed è lo stesso valore raggiunto al termine del mese di Aprile del settimo anno (e fino alla fine della simulazione), se la velocità di flusso del fluido fosse stata pari a 0,6 m/s.

5.7.2 Spegnimento a mesi alterni di 10 anni con $v = 0,6$ m/s e $v = 0,8$ m/s

Un'altra tipologia di funzionamento dell'impianto che si è simulata, ha previsto l'accensione e spegnimento della pompa secondo cicli on-off di durata mensile (di circa 30 giorni ciascuno, sia in riferimento alla circolazione del fluido termovettore che in riferimento alla sua sospensione).

L'analisi numerica si è protratta per dieci anni e sotto le stesse condizioni al contorno applicate nel modello al caso precedente (capitolo 5.7.1): la velocità del flusso d'aria è sempre pari a 8 m/s, posta nel primo e ultimo layer (con gli opportuni segni algebrici) e la sorgente di calore interna è pari a 12 Watt (di segno negativo e inserita nel nodo centrale di ogni layer). L'unica differenza, in questo caso, riguarda i valori di 'Time series' da applicare nei nodi d'ingresso e uscita dei tubi scambiatori di ogni coppia di anelli per le velocità di flusso del fluido termovettore e per la sua temperatura d'ingresso.

I risultati ottenuti per la potenza termica in kW/m nel corso della simulazione sono riportati nel grafico in Figura 132, dove vengono confrontati gli andamenti temporali con entrambe le velocità di flusso del fluido (0,6 e 0,8 m/s). I valori di potenza termica q (in kW/m) e potenza Q (in MWatt) associata al tratto di 10 km del tunnel di base, in cui si vorrebbero installare i conci termici, si distingueranno in valori di picco (alla riaccensione dell'impianto) e di regime (immediatamente prima della sospensione dell'impianto).

Nell'Allegato 2 vengono riportate le tabelle associate ad ogni anno di simulazione contenenti le potenze al metro, e potenziale geotermico per la porzione scelta nella tesi, ricavate al termine di ogni ciclo di funzionamento, ovvero quei valori raggiunti in condizioni di regime (i quali rappresentano, ovviamente, i risultati più cautelativi). Nel presente capitolo saranno mostrati, invece, solamente i risultati in forma grafica e tabellare, a regime e di picco, associati al primo ed decimo anno di simulazione.

Se si guarda il primo anno di simulazione (Tabella 29), al termine di ogni ciclo, la potenza termica al metro si aggira in un range di 0,53-0,35 kW/m (quella estraibile dalla porzione di galleria in cui si suppone agisca il rivestimento termico è di 5,3-3,5 MW), avendo adottato una velocità di flusso del fluido di 0,6 m/s.

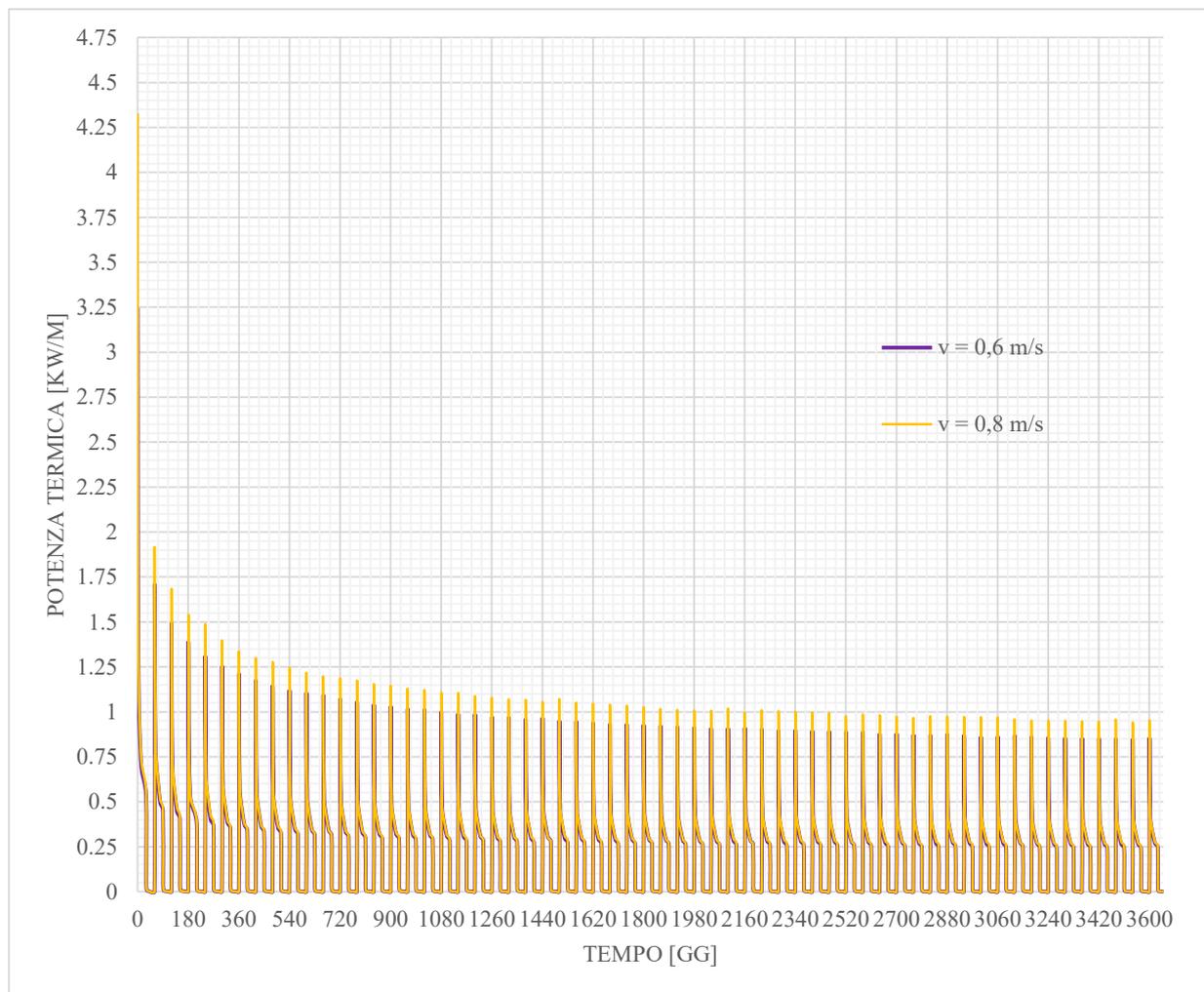


Figura 132. Profilo temporale di potenza termica per la galleria (10 anni)

Nel caso in cui la velocità del fluido sia, invece, 0,8 m/s, si ha un aumento di 0,02 - 0,01 kW/m: l'intervallo di potenza al metro è di 0,55-0,36 kW/m (pari a 5,54-3,6 MW, se ci si riferisce al tratto di galleria ipotizzato termicamente attivo), come mostrato nella tabella 29 sottostante.

Tabella 29. Risultati di potenza al metro e potenza a regime, per ogni ciclo del 1° anno e per le due velocità di flusso del fluido

Primo anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]
1°	2.9404	0.530	5.303	2.3045	0.554	5.542
2°	2.4917	0.449	4.494	1.9287	0.464	4.638
3°	2.2449	0.405	4.049	1.7633	0.424	4.240
4°	2.1214	0.383	3.826	1.6345	0.393	3.930
5°	2.0270	0.366	3.656	1.6049	0.386	3.859
6°	1.9497	0.352	3.516	1.5018	0.361	3.611

Si vuole valutare il potenziale geotermico che si avrebbe sia alla prima attivazione, o alla riaccensione, dell'impianto (o meglio, trascorsa mezza giornata da quando si andrebbe a ricominciare l'estrazione di

calore dalla galleria) e confrontare i valori ottenuti con quelli che si stabilirebbero in condizioni di regime.

Similmente alle simulazioni precedenti (cfr. 5.7.1), i valori di picco sono quelli che mostrano differenze maggiori tra i due casi analizzati (velocità di 0,6 e 0,8 m/s). Dalla Tabella 30 che segue, dopo 12 ore dalla ipotetica riaccensione della pompa geotermica, la potenza termica calcolata per la porzione del tunnel in esame si aggirerà tra un massimo di 23 MW (per il primo ciclo) fino al minimo di 12,53 MW (la massima e minima potenza termica al metro sono, dunque, 2,3 e 1,253 kW/m), se si è adottata la velocità di flusso di 0,6 m/s.

Tabella 30. Risultati di potenza al metro e potenza dopo 12 ore, per ogni ciclo del 1° anno e per le due velocità di flusso del fluido

Primo anno	Valori di picco					
	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]
1°	12.7722	2.303	23.035	10.9761	2.639	26.394
2°	9.4670	1.707	17.074	7.9705	1.917	19.167
3°	8.2656	1.491	14.907	7.0055	1.685	16.846
4°	7.7042	1.389	13.895	6.4025	1.540	15.396
5°	7.2625	1.310	13.098	6.1891	1.488	14.883
6°	6.9502	1.253	12.535	5.8098	1.397	13.971

In confronto ai valori di picco del caso con velocità di flusso di 0,8 m/s, invece, la differenza di potenza in MW, per tutti i 10 km di infrastruttura, è di 3,4 all'inizio (con 26,4 MW), fino a 1,4 MW per il sesto ciclo del primo anno (con 13,97 MW); la potenza termica al metro calcolata dopo mezza giornata è di 2,64 kW/m, mentre il minimo registrato all'ultimo ciclo si è abbassato a 1,4 kW/m circa.

Si nota, inoltre, che la variazione dei risultati di picco registrati con le due diverse velocità di flusso del fluido termovettore tende a ridursi sempre più col tempo, come si vedrà poi nel confronto coi dati associati all'ultimo anno di analisi (Tabella 32): se la differenza tra i due casi, per i valori di picco dell'ultimo ciclo del primo anno, si abbassava fino a 0,14 kW/m, all'ultimo anno raggiunge il valore di 0,009 kW/m.

Volendo vedere come potrebbe funzionare sotto queste condizioni l'impianto geotermico a lungo periodo, si passa alla valutazione dei risultati trascorsi dieci anni di simulazione e in entrambi i casi analizzati. Gli andamenti di potenza termica q (kW/m) nel tempo, dettaglio al decimo anno, sono racchiusi nelle figure 133 e 134.

La tabella 31 racchiude i bilanci in termini energetici di potenza al metro q e potenza Q, al termine di ogni ciclo di funzionamento dell'ultimo anno di simulazione. Come è anche evidente dai grafici (Figura 133 e 134), gli andamenti temporali della potenza termica al metro per tutti gli ultimi sei cicli di

simulazione si andrebbero a sovrapporre sia con la velocità di flusso di 0,6 m/s che con la velocità di 0,8 m/s. Si può allora affermare di aver raggiunto condizioni di stazionarietà e che il quantitativo di potenza estratta, per opera dell'impianto geotermico che si pensa di installare, mostrerà lo stesso andamento nel tempo anche per gli ipotetici cicli successivi al decimo anno.

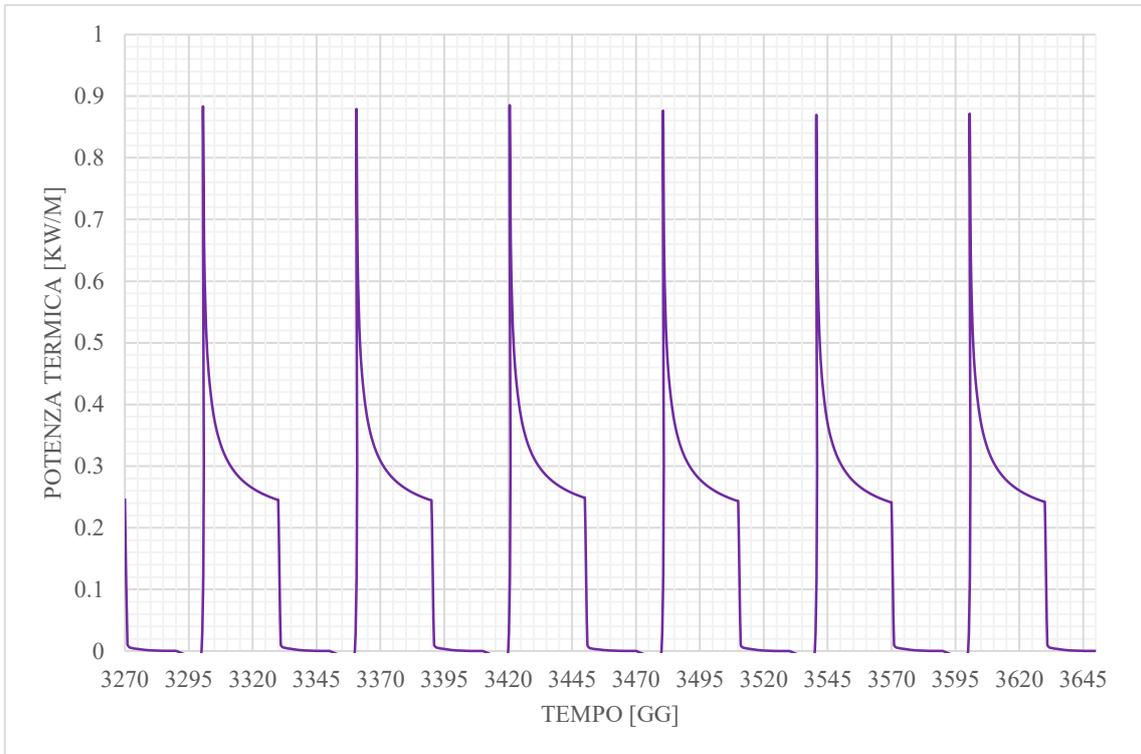


Figura 133. Dettaglio potenza termica al metro al decimo anno ($v=0,6$ m/s)

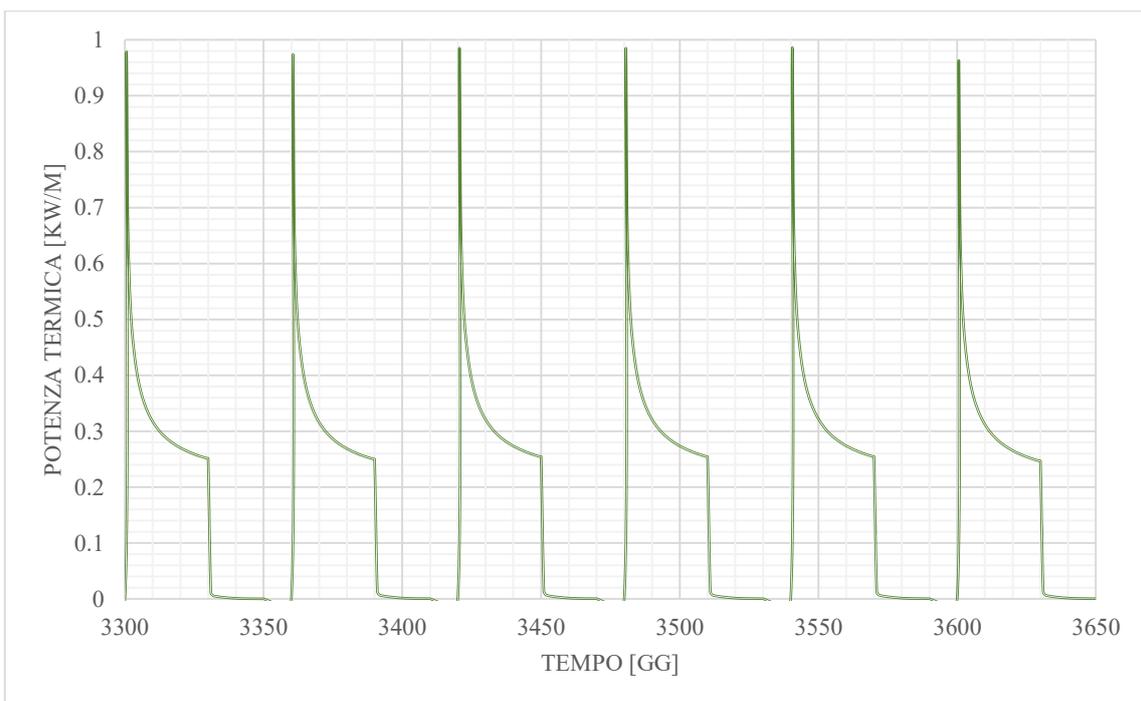


Figura 134. Dettaglio potenza termica al metro al decimo anno ($v=0,8$ m/s)

Tabella 31. Risultati di potenza al metro e potenza a regime, per ogni ciclo del 10° anno e per le due velocità di flusso del fluido

Ultimo anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]
1°	1.359	0.245	2.451	1.044	0.251	2.510
2°	1.355	0.244	2.443	1.038	0.250	2.497
3°	1.378	0.248	2.485	1.057	0.254	2.541
4°	1.348	0.243	2.431	1.057	0.254	2.541
5°	1.336	0.241	2.409	1.058	0.254	2.544
6°	1.341	0.242	2.419	1.025	0.246	2.464

La minima potenza termica che si potrebbe ottenere dalla galleria energetica, associata al tratto d'interesse, è circa 2,42 - 2,45 MW (con una velocità di flusso del fluido di 0,6 m/s), trascorsi 10 anni dalla prima attivazione dell'impianto (vedi Tabella 31), quantità che verrebbe raggiunta già durante il precedente anno di analisi numerica (vedi Tabelle dell'Allegato 2). In termini di potenza termica al metro, questi valori corrispondono a 0,242 - 0,245 kW/m.

Ipotizzando una velocità di fluido di 0,8 m/s, si riuscirebbe ad aumentare il potenziale geotermico di solo 0,05 - 0,045 MW (negli ultimi cicli di simulazione), raggiungendo circa 2,5 MW al termine degli ultimi cicli di funzionamento. E' evidente dalla Tabella 31, come già mostrava la Figura 134, che la potenza termica al metro a regime non subisce variazioni tra un ciclo e l'altro nell'ultimo anno, ma si aggira costantemente sempre attorno ai 0,25 kW/m. Dal confronto dei valori ottenuti alla fine di ogni ciclo, contenuti nelle Tabelle dell'Allegato 2, si può aggiungere che, già dal terzo anno di analisi numerica, le differenze energetiche tra i due casi (velocità di 0,8 e velocità di 0,6 m/s) raggiungono al massimo gli 0,1 MW.

Si può affermare che nel caso di velocità di 0,6 m/s, la potenza termica Q tra la fine del primo e la fine dell'ultimo anno di simulazione, in condizione di regime, si è abbassata di circa 1,1 MW (passando da una potenza al metro di 0,352 a 0,242 kW/m). Con una velocità di 0,8 m/s, la potenza termica Q tra la fine del primo e la fine dell'ultimo anno di simulazione, in condizione di regime, ha subito pressoché lo stesso abbassamento (1,14 MW, passando da 3,6 a 2,46 MW, o analogamente da 0,36 a 0,246 kW/m in termini di potenza al metro q).

Anche nel corso dell'ultimo anno di simulazione, i valori di potenza termica di picco ottenuti mostrano differenze più marcate rispetto al confronto dei valori a regime, se si adottano le due distinte velocità di flusso (racchiusi in Tabella 32). Trascorsa mezza giornata dalla supposta riaccensione dell'impianto geotermico, la potenza Q, calcolata in riferimento alla porzione del tunnel d'interesse, si aggirerebbe tra un massimo di 8,6 MW (per il primo ciclo) al minimo di 8,5 MW (la massima e minima potenza termica al metro sono, dunque, 0,86 e 0,85 kW/m), se si è adottata la velocità di flusso di 0,6 m/s.

Tabella 32. Risultati di potenza al metro e potenza dopo 12 ore, per ogni ciclo del 10° anno e per le due velocità di flusso del fluido

Ultimo anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]
N° ciclo:						
1°	4.767	0.860	8.597	3.965	0.953	9.534
2°	4.744	0.856	8.555	3.945	0.949	9.486
3°	4.779	0.862	8.619	3.990	0.959	9.594
4°	4.729	0.853	8.529	3.991	0.960	9.596
5°	4.691	0.846	8.461	3.994	0.960	9.603
6°	4.702	0.848	8.480	3.902	0.938	9.384

Con la velocità di 0,8 m/s, invece, la massima e minima potenza termica estraibile dopo mezza giornata dall'inizio dei cicli, passerebbe dal massimo di 9,6 al minimo di 9,4 MW (potenza termica q al metro rispettivamente di 0,96 e 0,94 kW/m). A differenza del primo anno di simulazione, dove si registravano (in media) differenze di 2 MW, tra i valori di picco di potenza Q ottenuti con le due velocità di flusso del fluido, al decimo anno d'analisi le differenze tra le potenze termiche Q di picco tra i due casi si dimezzano, registrando all'inizio di ogni ciclo una differenza di potenziale energetico geotermico costante di 1 MW.

Confrontando le Tabelle 31 e 32 dell'ultimo anno indagato, si nota ulteriormente che, tra l'inizio e la fine di ogni ciclo, le differenze di potenza termica Q che si otterrebbe con le due ipotesi di velocità di flusso si andrebbero praticamente a ridurre di 1/20: se, dopo 12 ore da inizio ciclo, la differenza presentava un valore di 1 MW tra i due casi, alla fine del ciclo il valore diverrebbe pari a 0,05 MW.

Infine, si conclude con la verifica delle condizioni interne alla galleria durante tutta l'analisi numerica a mesi alterni per monitorare, attraverso la variazione della temperatura dell'aria nel tempo (vedi Figura 135), se venga o meno rispettata la soglia di 32 °C (LTF, 2013).

Tra i tutti e tre i meccanismi di funzionamento ciclico simulati, va fatto notare che il meccanismo di attivazione della pompa a mesi alterni è l'unico in grado di mantenere la temperatura dell'ambiente interno sotto il massimo limite per tutti quei cicli durante i quali l'estrazione di calore viene sospesa e fino alla fine dell'analisi numerica. Ciò avviene nel mese di Maggio del terzo anno di simulazione, nel caso si assuma una velocità di flusso del fluido di 0,6 m/s, mentre già dal mese di Febbraio dello stesso terzo anno, se la velocità di flusso del fluido adottata sia pari a 0,8 m/s.

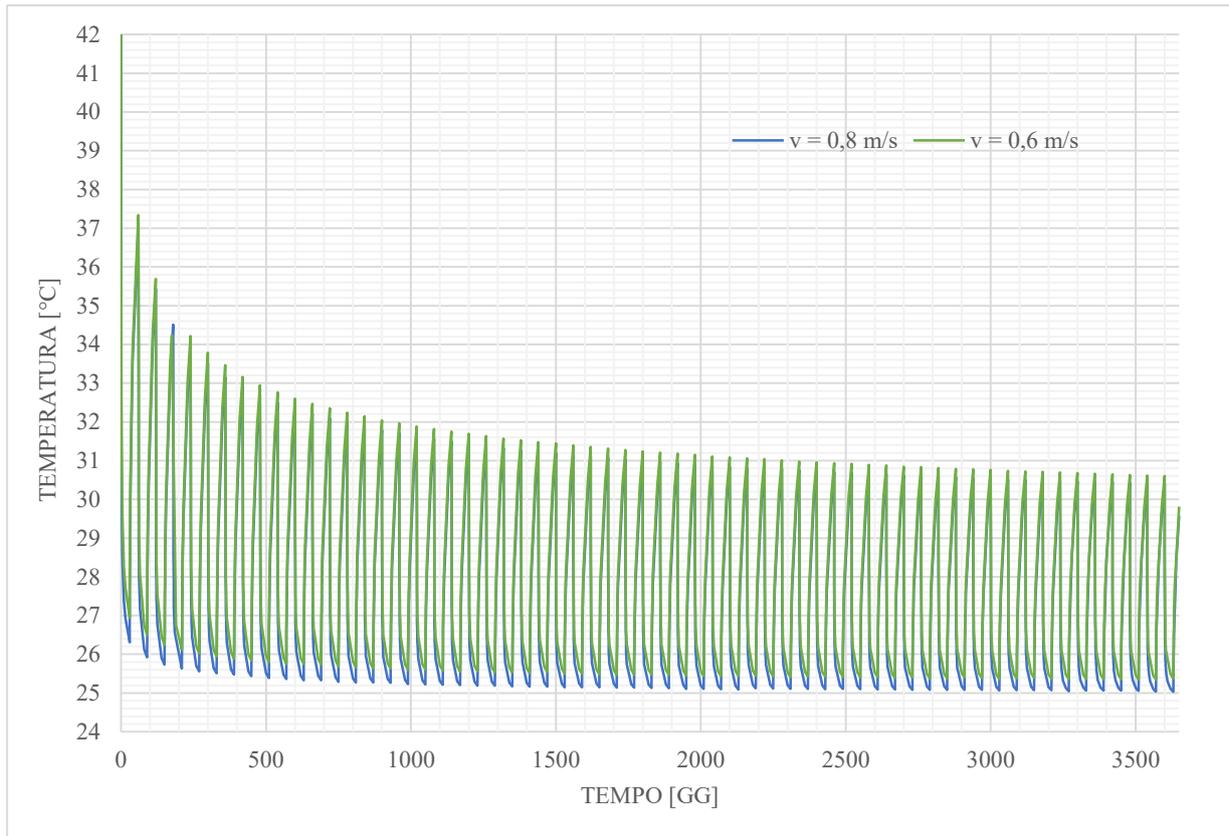


Figura 135. Andamento temporale della temperatura dell'aria interna sotto l'ipotesi di funzionamento ciclico a mesi alterni (per le due velocità di flusso di 0,6 e 0,8 m/s)

Fino ad ora si era riusciti a mantenersi sotto i 32 °C, da un certo istante in poi, solamente attraverso l'ipotesi di funzionamento continuo dell'impianto; con le altre due ipotesi di attivazione (ciclica senza 3 mesi estivi o ciclica senza 5 mesi estivi), invece, la risalita della temperatura andava ad eccedere il valore sopracitato, passato un certo lasso di tempo dallo spegnimento della pompa, in tutti e dieci gli anni indagati.

Al decimo anno, ad esempio, al termine dell'ultimo ciclo di disattivazione del sistema, si registra un valore di 30,6 °C per l'aria interna, avendo adottato la velocità di flusso di 0,6 m/s, e di 30,4 °C con la velocità di 0,8 m/s.

6. STUDIO DELLE CONDIZIONI DI ESERCIZIO DELLA TECNOLOGIA

Approfondendo quanto detto al paragrafo 3.5, si puntualizza che la TELT (2021) ha tenuto sotto controllo le sorgenti e i fiumi delle valli Susa (versante italiano) e Maurienne (versante francese) per lo studio che ha redatto in questi anni. Sulla base delle evidenze scientifiche riscontrate nel corso dei lavori per il cunicolo esplorativo (che ha permesso di approfondire questa potenzialità), l'obiettivo è stato quello di elaborare alcuni scenari di disponibilità della risorsa per lo scavo del tunnel di base del Moncenisio e quantificarne il potenziale di utilizzo a fini energetici o idropotabili. L'acqua che è stata incontrata nel cunicolo del Chiomonte non proviene dalla superficie o dalle falde, ma verosimilmente è acqua interstiziale (intrappolata nelle fessure nel corso degli anni) e le portate d'acqua incontrate con lo scavo sono state inferiori rispetto a quelle previste.

La modalità di raccolta delle risorse può dare origine a scenari diversi; lo studio TELT (2021) ne ha ipotizzati tre:

- Primo scenario di disponibilità termica nominale, per il quale si è considerato la potenza termica minima individuata nella fase prima fase di progetto, pari a 9,3 MW;
- Secondo scenario di disponibilità media, per il quale si è considerato una riduzione della potenza disponibile di circa un terzo rispetto a quella nominale (5,9 MW);
- Terzo scenario di disponibilità bassa, per il quale si è considerato una riduzione della potenza disponibile di circa due terzi rispetto a quella nominale (3,2 MW).

Il metodo più economico e semplice per l'impegno di queste acque prevede la raccolta mediante tubazioni per il trasporto fino al portale del tunnel, cercando di minimizzare la perdita di temperatura. Se questa, all'uscita del tunnel, risultasse troppo bassa, verrà potenziata tramite pompe di calore.

6.1 Scenari di ipotesi di disponibilità

Sulla base dei risultati ottenuti per i quattro meccanismi di esercizio (continuo più tre alternative ad utilizzo ciclico) sono stati elaborati dei possibili di scenari di potenziale geotermico per il tratto del tunnel di base in cui è si è ipotizzato di installare il rivestimento termico (da pk 42 a pk 52, riferimento in Figura 86).

Poiché tutte e quattro le tipologie di funzionamento sono state indagate attraverso delle analisi numeriche svolte mediante il software FEFLOW, per una durata complessiva di 10 anni, sono stati stabiliti tre scenari di disponibilità di energia:

- Primo scenario di breve termine;
- Secondo scenario intermedio;
- Terzo scenario a lungo termine.

Si è scelto di assegnare una prima soglia (*primo scenario*) del potenziale della risorsa di calore del terreno, quando si è raggiunta la fine del primo anno di simulazione e a partire da quando si vorrebbe installare e attivare il rivestimento in concetti energetici: il valore di energia termica calcolata fino a quel momento corrisponderà, dunque, all'energia ottenibile dall'impianto al pieno delle sue potenzialità.

Al termine del primo anno di funzionamento si ipotizza l'entrata nel *secondo scenario*, in cui la potenza termica della galleria Q varierà in un intervallo che parte dal massimo registrato al termine del primo anno fino ad un minimo stimato alla fine del quinto anno (riferimento nelle Tabelle 33 e 34), per concludere con il *terzo scenario* di disponibilità della risorsa, il cui range della potenza Q manifesterà il suo massimo nel valore calcolato al trascorrere del quinto anno e il suo minimo al termine della simulazione. Poiché le analisi numeriche hanno tutte una durata di 10 anni, questo diviene il limite temporale a partire dal quale il funzionamento dell'impianto e la stima della potenza termica raggiungono le condizioni di stazionarietà.

L'attribuzione dei tre scenari di potenziale geotermico è stata fatta in riferimento ad ogni tipologia di funzionamento simulata in FEFLOW (quattro nella presente tesi): queste stime di potenza termica sono state quantificate e riassunte in Tabella 33, per i casi con impianto attivo in maniera continuativa e ciclica con sospensione nei tre mesi estivi, e Tabella 34, per quei casi in cui la pompa di calore è attiva in maniera ciclica secondo le ultime due modalità esposte ai paragrafi 5.7.1 e 5.7.2 (ovvero a mesi alterni o con lo spegnimento dell'impianto nei mesi di Maggio, Giugno, Luglio, Agosto e Settembre).

Tabella 33. Scenari di disponibilità della risorsa per i 10 km d'interesse (funzionamento 1 e 2) in termini di potenza termica

Scenario di disponibilità	Q [MW]			
	Continuo		Ciclico [No 3 mesi estivi]	
	v =0,6 m/s	v =0,8 m/s	v =0,6 m/s	v =0,8 m/s
1°	2.76	2.78	3.03	3.05
2°	2.76 -1.94	2.78 - 2.01	3.03 - 2.25	3.05 - 2.30
3°	1.94 - 1.75	2.01 - 1.81	2.25 - 2.06	2.30 - 2.11

Tabella 34. Scenari di disponibilità della risorsa per i 10 km d'interesse (funzionamento 3 e 4) in termini di potenza termica

Scenario di disponibilità	Q [MW]			
	Ciclico [No 5 mesi]		Ciclico [Mesi alterni]	
	v =0,6 m/s	v =0,8 m/s	v =0,6 m/s	v =0,8 m/s
1°	3.38	3.43	3.52	3.61
2°	3.38 - 2.61	3.43 - 2.68	3.52 - 2.66	3.61 - 2.7
3°	2.61 - 2.42	2.68 - 2.51	2.66 - 2.42	2.7 - 2.46

In alternativa e seguendo lo stesso ragionamento dello studio TELT (2021), si sono distinte alcune fasi di sfruttamento del potenziale calore in sito. A partire da una fase iniziale di piena disponibilità e massimizzazione dell'impianto (fase che si ipotizzi avere come valore di riferimento la potenza calcolata dopo un mese dalla supposta attivazione del circuito idraulico), si procede ad un secondo step che vede la diminuzione della potenza disponibile di 1/3 rispetto alla sua potenzialità nominale, per terminare in un ultimo scenario in cui si manifesta una riduzione della potenza termica di 2/3 rispetto al valore nominale. Riassumendo:

- **Fase 1:** scenario di disponibilità termica nominale, per il quale si è considerato la potenza termica minima che si ottiene trascorso un mese (limite arbitrariamente scelto) dall'attivazione a funzionamento continuo dell'impianto e stimata, quindi, pari a 5,50 MW con velocità di flusso del fluido pari a 0,6 m/s o 5,58 MW con velocità di 0,8 m/s.
- **Fase 2:** scenario di disponibilità media per il quale si è considerata una riduzione del potenziale termico nominale, ottenuta al termine della fase 1, di circa 1/3 del suo valore. Se si considerasse che l'impianto geotermico operasse a funzionamento continuo (o anche con spegnimento della pompa nei tre mesi, o cinque, estivi), questa diminuzione verrebbe raggiunta trascorsi 110 giorni dal primo istante di attivazione per entrambe le velocità di flusso scelte. Adottando un meccanismo di esercizio ciclico a mesi alterni, la soglia di potenza competente alla fase 2 si stima venga estratta al termine del mese di Settembre del primo anno di simulazione con una velocità di 0,6 m/s, mentre, assunto un valore di 0,8 m/s per il flusso, viene raggiunta alla fine del mese di Novembre dello stesso anno.

- **Fase 3:** ultimo scenario di disponibilità termica bassa, per il quale si è considerata una riduzione della potenza termica nominale, ottenuta al termine della fase 1, di circa 2/3 del suo valore. Nel caso in cui l'impianto ipotizzato agisse in maniera continuativa e con una velocità di flusso del fluido di 0,6 m/s, la potenza termica competente alla fase 3 verrebbe raggiunta trascorsi 2690 giorni dal primo istante d'attivazione; con il valore di velocità di flusso di 0,8 m/s, invece, il limite di potenza di questa ultima fase si stima venga estratto dopo 3040 giorni dalla supposta messa in esercizio dell'impianto. E' interessante notare che, attraverso l'assunzione di un meccanismo di tipo ciclico dell'impianto, le soglie associate alla fase 3 non vengano mai raggiunte.

A differenza della precedente, comunque, in questa seconda valutazione non ci sarebbe distinzione tra un meccanismo di funzionamento dell'impianto e l'altro, per quanto riguarda le soglie di competenza di ogni fase, mentre si potrebbe distinguere tra di loro in riferimento al limite temporale in cui questi limiti vengono raggiunti; i valori di potenza termica calcolati che competono a ciascuna fase sono racchiusi in Tabella 35.

Tabella 35. Nuovi scenari di disponibilità della risorsa distinti in base alla riduzione di potenza

Fase	Q [MW]	
	v = 0,6 m/s	v = 0,8 m/s
1°	5.5	5.58
2°	3.67	3.72
3°	1.83	1.86

6.1.1 Confronto con gli scenari dello studio TELT

Anche lo studio TELT pubblicato nel 2021 (capitolo 3.5.2.) aveva stabilito tre possibili scenari di disponibilità del potenziale geotermico (disponibilità nominale, media e massima), a seconda delle ipotesi fatte sulle portate e temperatura delle acque. La distinzione era stata giustificata dal fatto che il massimo potenziale geotermico calcolato faceva riferimento alle migliori condizioni di disponibilità della risorsa, ovvero quando le acque incontrate durante lo scavo non eccedessero una temperatura di 20 °C e coincidessero, in termini di portate, con le stime fatte in fase progettuale (e che, nella realtà, durante lo scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena, sono risultate inferiori a quanto previsto).

La differenza tra gli scenari discussi in precedenza (cfr. 6.1) e quelli ad opera della TELT (2021), sta soprattutto nel fatto che, mentre nello studio di questa tesi si è ipotizzato di installare il rivestimento in conci energetici solamente nel tratto di 10 km che va da pk 42 a pk 52, TELT (2021) ha indagato il potenziale geotermico lungo tutta la lunghezza del tunnel di base, che si estende per 57,5 km. I risultati di potenza termica, che sono già stati mostrati, ma vengono ripetuti nella Tabella 36 sottostante, si

riferiscono alla lunghezza complessiva del tunnel e non sarebbe del tutto adeguato confrontarli direttamente con le stime ricavate nella presente tesi.

Tabella 36. Scenari di potenza termica stimata per l'intera lunghezza del tunnel di base, da TELT (2021)

SCENARIO	1	2	3
Disponibilità della risorsa	Nominale	Media	Bassa
Potenza termica disponibile [MW]	9,3	5,9	3,2

Supponendo di poter distribuire uniformemente le portate da loro ipotizzate durante lo scavo lungo tutto il tunnel di base (e dunque anche le potenze termiche da loro stimate e mostrate nella tabella precedente), si potrebbe calcolare la potenza termica al metro in kW/m e la risorsa geotermica per quella stessa porzione di 10 km considerata nella presente tesi. I risultati ottenuti, riassunti in Tabella 37, fornirebbero, per lo stesso tratto da pk 42 a 52 e nella condizione di massimo sfruttamento della risorsa geotermica estraibile dalle portate (e temperature di queste) incontrate durante lo scavo della galleria, una potenza termica di 1,62 MW. TELT (2021) non distingue i suoi scenari sulla base di limiti temporali, quanto, piuttosto, sulla base della modalità di raccolta delle acque lungo l'infrastruttura. Nel caso la modalità di intercettazione della risorsa comporti una riduzione della potenza nominale di 1/3, il potenziale geotermico competente alla porzione del tunnel di base estesa 10 km risulterà pari a 1,03 MW; se, invece, la risorsa disponibile diminuisse di 2/3 dal suo valore nominale (scenario 3 di TELT, 2021), per quello stesso tratto di 10 km di galleria, la potenza geotermica assumerà un valore di 0,56 MW.

Tabella 37. Risorsa geotermica disponibile con lo sfruttamento delle acque (da studio TELT, 2021) lungo il tunnel di base

Scenario	1	2	3
Potenza geotermica tunnel di base [MW]	9.3	5.9	3.2
Potenza geotermica [kW/m]	0.162	0.103	0.056
Potenza geotermica per 10 km [MW]	1.617	1.026	0.557

Il sistema ENERTUN, invece, attraverso lo sfruttamento dell'elevato calore presente nell'ambiente interno alla sezione dell'infrastruttura, ottiene dei risultati in termini di potenziale geotermico, per la sola tratta del tunnel di base scelta in questo studio (a cui sono associate le coperture maggiori, persino sopra i 2000 m), che risulterebbero differenti. Nello specifico, attraverso questa tipologia di concetti energetici in configurazione 'Air', e nello scenario più cautelativo (ovvero a regime, trascorsi almeno 10 anni dalla supposta attivazione termica del rivestimento), si avrebbero: con un funzionamento di tipo continuo una differenza di circa 0,16 MW (media tra i valori ottenuti attraverso le due velocità di flusso del fluido, ovvero 1,81 e 1,75 MW) rispetto alla potenza estraibile dalla risorsa geotermica ottenuta dalle acque interstiziali incontrate lungo 10 km del tunnel di base; supponendo un meccanismo di tipo ciclico, con sospensione nei tre mesi estivi, la differenza tra le due potenze geotermiche ottenute risulterebbe pari a 0,47 MW (media tra i valori avuti con le due velocità di flusso del fluido, ovvero 2,11 e 2,06 MW).

Sotto l'ipotesi di funzionamento di tipo ciclico, con sospensione dei 5 mesi consecutivi (da Maggio a Settembre inclusi), tra i due potenziali geotermici vi sarebbe un intervallo di 0,85 MW (media tra i valori ottenuti attraverso le due velocità di flusso del fluido, ovvero 2,51 e 2,42 MW) ed, infine, se si attivasse termicamente la porzione di galleria a mesi alterni, si registrerebbe una differenza tra le due potenze di 0,82 MW (media tra i valori avuti con le due velocità di flusso del fluido, ovvero 2,46 e 2,42 MW).

Si fa notare, comunque, che questo confronto è stato fatto scegliendo lo scenario 1 di piena disponibilità della risorsa (quindi potenza nominale) in riferimento al potenziale geotermico ottenuto da TELT (2021) con lo sfruttamento delle acque incontrate lungo lo scavo, mentre, per il potenziale geotermico estraibile grazie al calore elevato presente in quella stessa tratta della galleria, si è fatto il confronto con la potenza termica nelle condizioni più cautelative possibili (e quindi nello scenario più pessimistico stimato al termine delle simulazioni, ovvero trascorsi 10 anni dall'ipotetica accensione della pompa geotermica).

Di seguito, vengono riassunti nella Figura 136 i risultati tabellari di TELT (2021) e quelli ottenuti al termine delle analisi numeriche svolte nella presente tesi (con velocità di flusso di 0,8 m/s, in quanto risulta essere il valore ottimale per il funzionamento dell'impianto geotermico soprattutto nel lungo periodo); per distinguere le due diverse modalità di raccolta della risorsa in sito, assieme alle loro lunghezze di competenza, si può fare riferimento alla Figura 137.

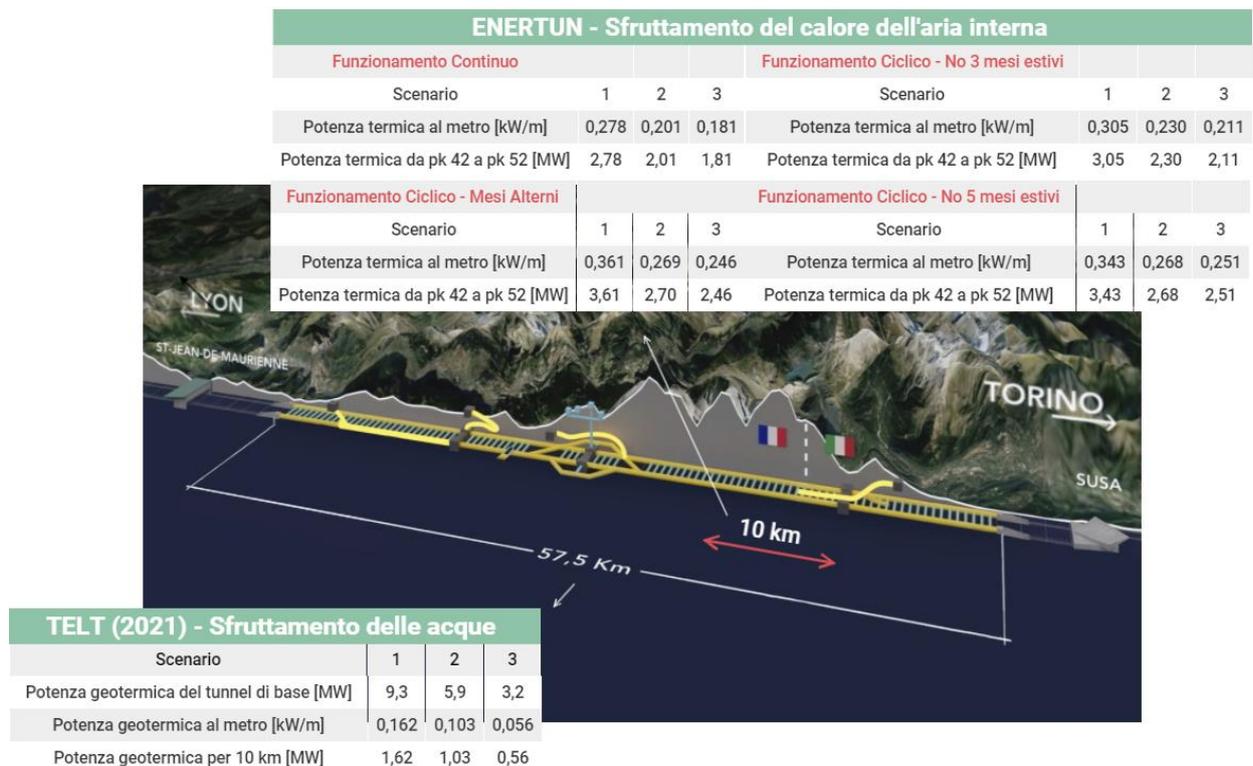


Figura 136. Inquadramento e risultati del potenziale geotermico di TELT (2021) e di ENERTUN per le lunghezze di competenza

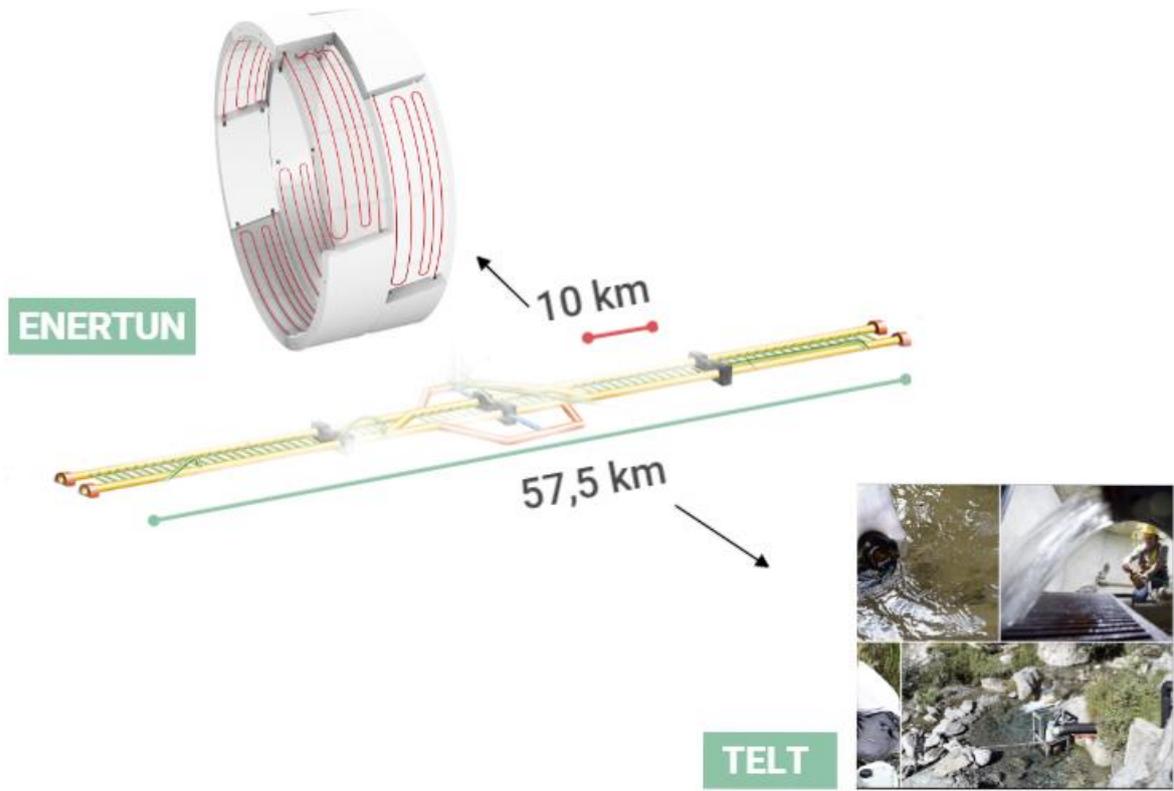


Figura 137. Lunghezze di riferimento di TELT e ENERTUN per lo sfruttamento della risorsa nel tunnel di base

7. CONCLUSIONI

Lo studio svolto nella tesi ha avuto lo scopo di valutare il potenziale geotermico e sfruttamento delle elevate temperature registrate nell'ammasso roccioso d'Ambin, lungo il tunnel di base del Moncenisio (lungo complessivamente 57,5 km), elemento principale della nuova infrastruttura che andrà a collegare le città di Torino e Lione. Nello specifico, la porzione dell'infrastruttura considerata è lunga 10 chilometri e comprende il confine di stato Italia-Francia, da pk 42 a pk 52, dove vengono raggiunti i massimi valori.

Lo sfruttamento del potenziale termico disponibile nella porzione immaginata nella presente tesi sarebbe reso possibile attraverso l'installazione, attorno al tunnel, di una serie di anelli costituiti da conci energetici modulari prefabbricati (di nome ENERTUN e di semplice manutenzione e fabbricazione) utilizzati nella realizzazione di rivestimenti per gallerie energetiche.

La prima parte della tesi è servita ad introdurre i principi fondamentali dell'energia geotermica, la sua classificazione (distinzione di sistemi a bassa o alta entalpia) e la descrizione del funzionamento di una pompa di calore. Gettando lo sguardo sui sistemi a bassa entalpia, in cui si fa un uso diretto del calore, si sono distinte le tipologie di impianto a circuito chiuso ed aperto e si è introdotta la normativa italiana di riferimento. L'utilizzo delle strutture sotterranee come fonti di energia geotermica è iniziato una trentina di anni fa in Austria e si è poi esteso ad altri Paesi europei. In linea di principio, qualsiasi struttura sotterranea (pali e platee di fondazione, diaframmi, gallerie, tiranti) può essere attrezzata in modo da diventare uno scambiatore di calore: queste strutture possono essere attivate termicamente installando all'interno del calcestruzzo una rete di tubi, generalmente in materiale plastico. Il fluido che scorre in essi costituisce il mezzo per il trasferimento del calore dal terreno agli edifici e viceversa. L'estrazione del calore dal fluido termovettore viene eseguita dalle pompe di calore, il cui funzionamento è sostanzialmente simile a quello di un frigorifero con ciclo invertito.

Il tunnel energetico ipotizzato viene attivato attraverso conci prefabbricati con tubi che vengono annegati nel calcestruzzo in stabilimento. La tecnologia dei conci ENERTUN è stata descritta

brevemente, presentandone i vantaggi e le caratteristiche: con l'estrazione di calore, soprattutto nel presente caso studio, non solo si riesce a produrre un'energia sfruttabile sul lato italiano, secondo diverse finalità nei comuni limitrofi di Susa e Chiomonte, ma anche a limitare il surriscaldamento interno della galleria dovuto al traffico in esercizio, controllandone la temperatura, e riducendo la necessità di una ventilazione forzata. Si ricorda, inoltre, che delle tre possibili configurazioni del concio, distinte in base al posizionamento dei tubi ('Air', 'Ground' e 'Ground & Air'), è stata adottata la sola configurazione 'Air': quest'ultima prevede che la rete di tubi sia posizionata in prossimità dell'intradosso del rivestimento, mentre le altre due vorrebbero le serpentine in prossimità dell'estradosso ('Ground') o di entrambi estradosso e intradosso ('Ground & Air'). Lo scambio termico nel caso studio avviene principalmente con l'ambiente interno della galleria.

Con il software ad elementi finiti FEFLOW è stato costruito il modello, spiegandone la geometria, giustificando le proprietà adottate per i materiali e tutte le condizioni al contorno inserite (sia idrauliche che termiche). La modellazione ha coinvolto tre coppie di anelli in serie, ognuno di lunghezza di 1,4 m, per un'estensione complessiva di 8,4 m.

Le prime analisi numeriche hanno voluto studiare l'influenza della velocità dell'aria dovuta all'effetto di pistonamento dei treni, per poi indagare, attraverso un'analisi parametrica, quali fossero le condizioni al contorno di temperatura e velocità del fluido termovettore in circolo nelle serpentine più adeguati al fine di ottimizzare l'impianto geotermico. Lo studio svolto ha mostrato che, seppur la temperatura più idonea mostrasse un unico valore pari a 24 °C per ambo le velocità di flusso che massimizzassero la potenza termica al metro q (kW/m), non si era in grado di stabilire un unico valore tra le due: piuttosto, si è scelto di analizzare il funzionamento dell'impianto e l'andamento della potenza termica con entrambi i valori di 0,6 e 0,8 m/s.

Il calcolo della potenza termica estraibile dal sistema di conci immaginati installati in galleria è stato fatto inizialmente sotto l'ipotesi di funzionamento continuo e per una durata di 10 anni: con entrambe le velocità adottate si riesce a scendere sotto i 26 °C dopo al massimo 120 giorni dall'attivazione del circuito e, quindi, sotto la massima soglia imposta da LTF (2013) di 32 °C. Dopo un anno di simulazione, la configurazione 'Air' riuscirebbe ad estrarre una potenza termica a monte della pompa di 2,76 - 2,78 MW, per l'intera lunghezza supposta termicamente attiva, potenza che nel tempo continuerebbe a ridursi fino al minimo stazionario di 1,75 MW (con $v = 0,6$ m/s) e 1,81 MW (con $v = 0,8$ m/s). A lungo termine sembrerebbe, dunque, più conveniente l'adozione del più alto valore di velocità del fluido, a scapito di un maggior costo operativo della pompa rispetto al valore più basso di 0,6 m/s.

Per poter dare possibilità alla risorsa di calore di ricaricarsi nel tempo, sono state svolte più analisi numeriche di tipo ciclico, così da poter anche cercare di ottenere una maggiore varietà di scenari di potenziale dall'impianto geotermico in esame; si vedrà, però, che, durante i mesi di sospensione

dell'estrazione di calore, la temperatura in galleria risalirà inevitabilmente oltre il limite stabilito di 32 °C (LTF, 2013) e sarà necessario un sistema di ventilazione forzata o un'alternativa a quest'ultimo per poter rientrare nei limiti imposti.

Sotto l'ipotesi di spegnimento della pompa di calore per i tre mesi estivi di Giugno, Luglio e Agosto, la potenza termica per l'intero tratto di galleria di 10 km è stato stimato pari a 3,03 - 3,05 MW dopo un anno dalla prima attivazione del sistema, per abbassarsi fino a 2,06 MW e 2,11 MW dopo dieci anni (condizioni raggiunte già all'ottavo anno di simulazione e che si manterranno costanti per gli anni successivi) con una velocità del flusso di 0,6 e 0,8 m/s rispettivamente. Anche in questo caso, dunque, si registrerebbero differenze maggiori in termini di potenziale termico ottenuto con i due diversi valori di velocità al crescere degli anni indagati attraverso le analisi numeriche.

In alternativa, si è pensato di sospendere per cinque mesi consecutivi (i tre estivi a cui si aggiungono Maggio e Settembre) e ripetere le simulazioni. Dopo un anno di analisi la potenza estraibile risulterebbe di 3,38 - 3,43 MW, rispettivamente per le velocità di 0,6 e 0,8 m/s: è dunque il tipo di funzionamento che fino ad ora manifesterebbe differenze maggiori tra i potenziali termici ottenuti adottando i due diversi tipi di flusso in riferimento ai primi 365 giorni. Dopo 10 anni, invece, questa potenza si abbasserebbe fino a 2,42 - 2,51 MW, mostrando una differenza di quasi 0,1 MW, a seconda della velocità di fluido adottata e si potrebbe concludere che l'assunzione del valore maggiore di 0,8 m/s porterebbe indubbiamente benefici più evidenti in termini di potenziale geotermico estraibile. Le condizioni stazionarie sono state raggiunte praticamente già all'ottavo anno di simulazione e, in confronto al caso continuo, permetterebbero una crescita della potenza termica associata al tunnel energetico di circa 0,7 MW o di 0,4 MW, rispetto al caso in cui si pensava di sospendere solamente per i tre mesi estivi consecutivi.

L'ultima ipotesi di funzionamento ha voluto far lavorare il circuito, e la pompa di calore, attivando quest'ultima in maniera ciclica, a mesi alterni. Dopo i primi 12 mesi, si riuscirebbe ad ottenere un range del potenziale di 3,51 - 3,61 MW (con velocità di flusso di 0,6 e 0,8 m/s), sicuramente i maggiori valori calcolati fino ad ora tra i vari meccanismi di lavoro supposti: rispetto al caso continuo si otterrebbe un incremento di potenza di 0,8 MW per il tratto che si vorrebbe attivare termicamente, incremento che si ridurrebbe fino a 0,5 MW rispetto alla tipologia di funzionamento in cui l'estrazione di calore verrebbe sospesa nei tre mesi estivi o, ancora, a circa 0,15 MW, se si andasse a spegnere l'impianto per i cinque mesi successivi da Maggio fino a Settembre. A lungo termine, le condizioni di stazionarietà verrebbero raggiunte dall'ottavo anno di simulazione e il potenziale termico associato alla galleria energetica immaginata risulterebbe circa pari a 2,5 MW, superando di circa 1,25 MW quella a lungo termine ottenuta nel caso di funzionamento continuo, di 0,45 MW circa quella ottenuta con spegnimento dell'impianto durante i tre mesi estivi e di soli 45 kW, se posto a confronto con il funzionamento con sospensione nei 5 mesi consecutivi da Maggio a Settembre.

Il funzionamento a mesi alterni è l'unico caso in cui le differenze energetiche, dovute ai due diversi valori di velocità di flusso del fluido, sono più evidenti nei brevi periodi, mentre si andrebbero a ridurre leggermente al crescere degli anni. Di conseguenza, adottare un valore maggiore di velocità non comporterebbe benefici energetici a lungo termine, soprattutto rispetto all'aumento delle spese economiche previste per il funzionamento della pompa di calore. Inoltre, è anche l'unico tipo di simulazione per la quale, dopo 2 anni e 8 mesi e per entrambe le velocità di flusso utilizzate, si riuscirebbe a mantenere la temperatura dell'aria interna, nei mesi in cui l'impianto viene spento, sotto la massima soglia stabilita da LTF (2013) di 32 °C.

Infine, in linea con quanto fatto dallo studio TELT (2021), si sono individuati tre scenari di disponibilità della risorsa: il **primo scenario** associato al potenziale termico estraibile nei primi 365 giorni, il **secondo scenario** associato alla potenza stimata nel tratto supposto attivo del tunnel fino al termine del quinto anno, mentre il **terzo scenario** riferito alla disponibilità di risorsa che si avrebbe in condizioni di stazionarietà. I risultati hanno mostrato che, in media, per le due velocità di flusso adottate di 0,6 e 0,8 m/s:

- i. Il funzionamento continuo dell'impianto fornirebbe un potenziale termico di 2,77 MW nel primo scenario, per passare ad un range di 2,77 - 1,98 MW per il secondo scenario e terminare in un intervallo di 1,98 - 1,78 MW con il terzo scenario di disponibilità della risorsa a lungo termine.
- ii. Attraverso un funzionamento che considererebbe lo spegnimento nei tre mesi estivi, una potenza termica di 3,04 MW sarebbe ottenuta nel primo scenario, per poi proseguire in un intervallo di 3,04 - 2,28 MW nel secondo scenario e terminare con una variazione di 2,28 - 2,09 MW nel terzo scenario di disponibilità della risorsa a lungo termine.
- iii. Per un funzionamento ciclico con sospensione di circolazione del fluido nei cinque mesi consecutivi da Maggio a Settembre si avrebbe una disponibilità della risorsa di 3,41 MW nel primo scenario, per passare ad un intervallo di 3,41 - 2,65 MW per il secondo scenario e terminare con una variazione di 2,65 - 2,47 MW con il terzo scenario di disponibilità a lungo termine.
- iv. Con un impianto pensato attivo per mesi alterni si calcolerebbe un potenziale termico di 3,57 MW nel primo scenario, per avere poi una variazione di quella quantità tra 3,57 e 2,68 MW per il secondo scenario e terminare con una variazione di 2,68 - 2,44 MW nel terzo scenario di disponibilità della risorsa.

Un'altra opzione potrebbe essere quella di immaginare tre fasi di disponibilità della risorsa in termini puramente quantitativi e non temporali. La **fase 1** iniziale di massimizzazione della potenza termica è stata assegnata ad una risorsa di 5,54 MW (media tra i risultati avuti per le due velocità di flusso del

fluido di 0,6 e 0,8 m/s) estraibile dall'impianto al termine del primo mese dall'attivazione in regime continuo (limite arbitrariamente scelto). Quando questo valore, a cui è stato attribuito la soglia massima del potenziale geotermico, si ridurrebbe di 1/3, si entra nella *fase 2* (scenario di disponibilità media), a cui è associata una potenza termica di 3,70 MW. Infine, quando il potenziale termico che sarebbe ottenuto per i 10 km di galleria energetica ipotizzata attiva termicamente, raggiunge i 1,85 MW (ovvero con un abbassamento di 2/3 rispetto al valore nominale di potenza), si sarebbe giunti allo scenario di disponibilità bassa (o *fase 3*).

Anche lo studio TELT (2021) aveva stabilito tre possibili scenari di disponibilità della risorsa geotermica, a seconda delle ipotesi sulle portate e temperatura delle acque incontrate durante lo scavo e delle loro modalità di canalizzazione. Nella condizione di massima ottimizzazione di quest'ultime, la potenza nominale stimata risultava pari a 9,3 MW, ma, come è stato detto, i loro risultati sono associati alla lunghezza totale del tunnel di base (57,5 km) e non ai 10 km di galleria energetica a cui si fa riferimento nello studio svolto in questa tesi. Estendere i risultati avuti dall'attivazione dell'impianto geotermico (con installazione dei conchi energetici) a tutto il tunnel di base non sarebbe, però, corretto, poiché queste stime dipendono da più fattori (quali i valori di temperatura presenti lungo la progressiva, le condizioni idrauliche e le caratteristiche geologiche e di permeabilità dell'ammasso roccioso in cui il tunnel sarà scavato) che varieranno a seconda della porzione dell'infrastruttura considerata.

Per poter fare un confronto in termini di potenziale tra le due possibili modalità di sfruttamento della risorsa geotermica (la prima mediante canalizzazione delle portate incontrate durante lo scavo, la seconda attraverso l'estrazione di calore dalla tratta dell'infrastruttura che presenta le temperature più elevate) e in riferimento alla stessa porzione di tunnel simulata nel presente studio, si sono divise le potenze termiche stimate da TELT (2021), mostrate nei tre scenari, per la lunghezza complessiva di 57500 metri. Queste potenze al metro, calcolate su una lunghezza generica di 10 km di galleria (che può essere, quindi, anche la stessa porzione da cui si va ad estrarre calore dall'aria interna, da pk 42 a pk 52), hanno fornito una potenza nominale di 1,62 MW, una potenza media di 1,03 MW e, infine, una potenza geotermica bassa di 0,56 MW. Dal confronto quantitativo tra la potenza nominale stimata con lo sfruttamento delle acque (TELT, 2021) e le potenze che si potrebbero ottenere attraverso l'estrazione di calore da quella stessa porzione scelta di galleria (nel terzo scenario più cautelativo di lungo termine), si sono potute calcolare differenze di 0,16 MW e 0,47 MW, con l'utilizzo di un meccanismo di attivazione continuo e ciclico rispettivamente (che avrebbe previsto la sospensione nei tre mesi estivi). Sotto l'ipotesi di un funzionamento di tipo ciclico (con sospensione dei 5 mesi consecutivi da Maggio a Settembre) e a mesi alterni, le differenze raggiungerebbero addirittura i 0,85 MW e 0,82 MW rispettivamente.

Si può concludere, allora, che la porzione del tunnel di base in cui si è immaginato di installare e attivare il rivestimento di conci energetici ENERTUN (in configurazione 'Air') in questa tesi, manifesti un elevato potenziale geotermico anche nella possibilità di sfruttamento del calore in essa presente.

La geotermia è una risorsa che, inoltre, deve fare i conti con le distanze e la sua efficacia è legata alla lontananza tra il punto di produzione e quello di utilizzo. Il territorio che più beneficia dell'energia che si potrebbe estrarre dall'impianto è quello immediatamente limitrofo alla pompa di calore; per questa ragione si potrebbe valutare di attivare termicamente la porzione del tunnel di base da pk 42 a 52 e sfruttare il potenziale geotermico delle acque intercettate dallo scavo solamente in quei tratti dove risulta più conveniente o più vicine alle zone in cui si prevede di adoperare questa energia geotermica, secondo le soluzioni pensate in fase progettuale (serre, teleriscaldamento, alimentazione piscine e zone di cantiere). Un altro suggerimento potrebbe riguardare l'utilizzo in maniera ciclica di entrambe le soluzioni (attivazione del rivestimento in conci energetici e sfruttamento delle acque intercettate durante lo scavo), così da permettere l'impiego di una delle due risorse (termica o idraulica) per un certo tempo, lasciando all'altra il tempo di ricaricarsi (data la natura interstiziale delle acque incontrate lungo lo scavo nel tratto dell'infrastruttura nella zona del massiccio d'Ambin, questo discorso avrebbe validità solamente per la risorsa di calore), e poi utilizzare l'altra nel periodo successivo: si avrebbe così una disponibilità continua di potenza termica nel più lungo periodo e tale da soddisfare i fabbisogni energetici previsti in quelle zone.

ALLEGATO 1

Tabella 38. Risultati e parametri utilizzati nell' analisi parametrica ($v = 0,3 \text{ m/s}$)

$v = 0,3 \text{ m/s}$

T [°C]	T _{out} [°C]	ΔT [°C]	Q [W]	q [kW/m]
20	23.082	3.082	778.128	0.278
21	23.961	2.961	747.670	0.267
22	24.842	2.842	717.648	0.256
23	25.722	2.722	687.275	0.245
24	26.602	2.602	656.880	0.235
25	27.493	2.493	629.362	0.225
26	28.364	2.364	596.953	0.213
27	29.247	2.247	567.238	0.203
28	30.128	2.128	537.280	0.192

v [m/s] =	0.3
ρ_w [kg/m ³] =	1000
A [m ²] =	0.000201
c [J/kgK] =	4186
m [kg/s] =	0.0603

Tabella 39. Risultati e parametri utilizzati nell' analisi parametrica ($v = 0,4 \text{ m/s}$)

$v = 0,4 \text{ m/s}$

T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	ΔT [°C]	Q [W]	q [kW/m]
20	22.434	2.434	819.332	0.293
21	23.340	2.340	787.649	0.281
22	24.245	2.245	755.949	0.270
23	25.151	2.151	724.276	0.259
24	26.057	2.057	692.589	0.247
25	26.963	1.963	660.901	0.236
26	27.869	1.869	629.213	0.225
27	28.775	1.775	597.524	0.213
28	29.681	1.681	565.836	0.202

Allegato 1

v [m/s] =	0.4
ρ_w [kg/m ³] =	1000
A [m ²] =	0.000201
c [J/kgK] =	4186
m [kg/s] =	0.0804

Tabella 40. Risultati e parametri utilizzati nell' analisi parametrica ($v = 0,5$ m/s)

$v = 0,5$ m/s

T_{in} [°C]	T_{out} [°C]	ΔT [°C]	Q [W]	q [kW/m]
20	22.076	2.076	873.486	0.312
21	22.999	1.999	841.173	0.300
22	23.916	1.916	806.305	0.288
23	24.833	1.833	771.452	0.276
24	25.751	1.751	737.052	0.263
25	26.670	1.670	702.641	0.251
26	27.586	1.586	667.599	0.238
27	28.551	1.551	652.657	0.233
28	29.463	1.463	615.668	0.220

v [m/s] =	0.5
ρ_w [kg/m ³] =	1000
A [m ²] =	0.000201
c [J/kgK] =	4186
m [kg/s] =	0.1005

Tabella 41. Risultati e parametri utilizzati nell' analisi parametrica ($v = 0,6$ m/s)

$v = 0,6$ m/s

T_{in} [°C]	T_{out}	ΔT	Q [W]	q [kW/m]
20	21.742	1.742	879.480	0.314
21	22.696	1.696	856.312	0.306
22	23.631	1.631	823.416	0.294
23	24.559	1.559	787.052	0.281
24	25.532	1.532	773.613	0.276
25	26.455	1.455	734.680	0.262
26	27.379	1.379	696.230	0.249
27	28.304	1.304	658.556	0.235
28	29.231	1.231	621.444	0.222

Allegato 1

v [m/s] =	0.6
ρ_w [kg/m ³] =	1000
A [m ²] =	0.000201
c [J/kgK] =	4186
m [kg/s] =	0.1206

Tabella 42. Risultati e parametri utilizzati nell'analisi parametrica ($v = 0,7$ m/s)

$v = 0,7$ m/s

T [°C]	T _{out}	ΔT	Q [W]	q [kW/m]
20	21.523	1.523	897.005	0.320
21	22.464	1.464	862.545	0.308
22	23.404	1.404	827.015	0.295
23	24.345	1.345	792.417	0.283
24	25.286	1.286	757.800	0.271
25	26.227	1.227	723.171	0.258
26	27.168	1.168	687.927	0.246
27	28.111	1.111	654.741	0.234
28	29.053	1.053	620.189	0.221

v [m/s] =	0.7
ρ_w [kg/m ³] =	1000
A [m ²] =	0.000201
c [J/kgK] =	4186
m [kg/s] =	0.1407

Tabella 43. Risultati e parametri utilizzati nell'analisi parametrica ($v = 0,8$ m/s)

$v = 0,8$ m/s

T [°C]	T _{out}	ΔT	Q [W]	q [kW/m]
20	21.352	1.352	910.486	0.325
21	22.300	1.300	875.000	0.313
22	23.248	1.248	840.103	0.300
23	24.195	1.195	804.449	0.287
24	25.155	1.155	777.701	0.278
25	26.093	1.093	735.664	0.263
26	27.049	1.049	706.619	0.252
27	27.987	0.987	664.816	0.237
28	28.934	0.934	629.005	0.225

Allegato 1

v [m/s] =	0.8
ρ_w [kg/m ³] =	1000
A [m ²] =	0.000201
c [J/kgK] =	4186
m [kg/s] =	0.1608

Tabella 44. Risultati e parametri utilizzati nell'analisi parametrica ($v = 0,9$ m/s)

$v = 0,9$ m/s

T [°C]	T out	ΔT	Q [W]	q [kW/m]
20	21.217	1.217	921.549	0.329
21	22.169	1.169	885.429	0.316
22	23.122	1.122	849.840	0.304
23	24.075	1.075	814.368	0.291
24	25.028	1.028	778.438	0.278
25	25.981	0.981	742.917	0.265
26	26.933	0.933	706.887	0.252
27	27.889	0.889	673.250	0.240
28	28.840	0.840	636.235	0.227

v [m/s] =	0.9
ρ_w [kg/m ³] =	1000
A [m ²] =	0.000201
c [J/kgK] =	4186
m [kg/s] =	0.1810

Tabella 45. Risultati e parametri utilizzati nell'analisi parametrica ($v = 1,0$ m/s)

$v = 1,0$ m/s

T [°C]	T out	ΔT	Q [W]	q [kW/m]
20	21.106	1.106	931.100	0.333
21	22.064	1.064	895.603	0.320
22	23.019	1.019	857.876	0.306
23	23.979	0.979	823.692	0.294
24	24.934	0.934	785.810	0.281
25	25.891	0.891	749.695	0.268
26	26.849	0.849	714.419	0.255
27	27.806	0.806	678.147	0.242
28	28.764	0.764	642.767	0.230

v [m/s] =	1
ρ_w [kg/m ³] =	1000
A [m ²] =	0.0002011
c [J/kgK] =	4186
m [kg/s] =	0.2011

ALLEGATO 2

Tabella 46. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 1° anno

Primo anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
	N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]
1°	2.9404	0.530	5.303	2.3045	0.554	5.542
2°	2.4917	0.449	4.494	1.9287	0.464	4.638
3°	2.2449	0.405	4.049	1.7633	0.424	4.240
4°	2.1214	0.383	3.826	1.6345	0.393	3.930
5°	2.0270	0.366	3.656	1.6049	0.386	3.859
6°	1.9497	0.352	3.516	1.5018	0.361	3.611

Tabella 47. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 2° anno

Secondo anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
	N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]
1°	1.8896	0.341	3.408	1.4437	0.347	3.472
2°	1.8450	0.333	3.328	1.4078	0.339	3.385
3°	1.7991	0.324	3.245	1.3902	0.334	3.343
4°	1.7604	0.317	3.175	1.3548	0.326	3.258
5°	1.7469	0.315	3.151	1.3260	0.319	3.189
6°	1.7344	0.313	3.128	1.3051	0.314	3.138

Tabella 48. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 3° anno

Terzo anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]
1°	1.6924	0.305	3.052	1.2962	0.312	3.117
2°	1.6691	0.301	3.010	1.2844	0.309	3.089
3°	1.6361	0.295	2.951	1.2613	0.303	3.033
4°	1.6297	0.294	2.939	1.2547	0.302	3.017
5°	1.6024	0.289	2.890	1.2372	0.298	2.975
6°	1.6080	0.290	2.900	1.2290	0.296	2.955

Tabella 49. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 4° anno

Quarto anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]
1°	1.5800	0.285	2.850	1.2107	0.291	2.911
2°	1.5596	0.281	2.813	1.2131	0.292	2.917
3°	1.5657	0.282	2.824	1.1893	0.286	2.860
4°	1.5305	0.276	2.760	1.1789	0.283	2.835
5°	1.5355	0.277	2.769	1.1706	0.282	2.815
6°	1.5137	0.273	2.730	1.1720	0.282	2.818

Tabella 50. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 5° anno

Quinto anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]
1°	1.5448	0.279	2.786	1.1550	0.278	2.777
2°	1.5021	0.271	2.709	1.1839	0.285	2.847
3°	1.5012	0.271	2.707	1.1551	0.278	2.778
4°	1.4810	0.267	2.671	1.1469	0.276	2.758
5°	1.4692	0.265	2.650	1.1406	0.274	2.743
6°	1.4800	0.267	2.669	1.1362	0.273	2.732
7°	1.4752	0.266	2.660	1.1237	0.270	2.702

Tabella 51. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 6° anno

Sesto anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]
1°	1.4667	0.265	2.645	1.1113	0.267	2.672
2°	1.4503	0.262	2.616	1.1061	0.266	2.660
3°	1.4441	0.260	2.605	1.1012	0.265	2.648
4°	1.4392	0.260	2.596	1.1038	0.265	2.654
5°	1.4431	0.260	2.603	1.1248	0.270	2.705
6°	1.4542	0.262	2.623	1.0895	0.262	2.620

Allegato 2

Tabella 52. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 7° anno

Settimo anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
	N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]
1°	1.4355	0.259	2.589	1.1145	0.268	2.680
2°	1.4145	0.255	2.551	1.1103	0.267	2.670
3°	1.4282	0.258	2.576	1.1050	0.266	2.657
4°	1.4243	0.257	2.569	1.1067	0.266	2.661
5°	1.4189	0.256	2.559	1.1019	0.265	2.650
6°	1.4140	0.255	2.550	1.0756	0.259	2.587

Tabella 53. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 8° anno

Ottavo anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
	N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]
1°	1.4123	0.255	2.547	1.0917	0.263	2.625
2°	1.3865	0.250	2.501	1.0880	0.262	2.616
3°	1.3989	0.252	2.523	1.0756	0.259	2.587
4°	1.3802	0.249	2.489	1.0666	0.256	2.565
5°	1.3763	0.248	2.482	1.0851	0.261	2.609
6°	1.3998	0.252	2.525	1.0800	0.260	2.597

Tabella 54. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 9° anno

Nono anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
	N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	E [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]
1°	1.3829	0.249	2.494	1.0801	0.260	2.597
2°	1.3632	0.246	2.459	1.0773	0.259	2.591
3°	1.3735	0.248	2.477	1.0770	0.259	2.590
4°	1.3911	0.251	2.509	1.0602	0.255	2.550
5°	1.3681	0.247	2.467	1.0501	0.253	2.525
6°	1.3629	0.246	2.458	1.0534	0.253	2.533

Tabella 55. Risultati di potenza q (kW/m) e energia E (MW) a regime, per ogni ciclo del 10° anno

Ultimo anno	v = 0,6 m/s			v = 0,8 m/s		
	N° ciclo:	ΔT [°C]	q [kW/m]	Q [MW]	ΔT [°C]	q [kW/m]
1°	1.359	0.245	2.451	1.044	0.251	2.510
2°	1.355	0.244	2.443	1.038	0.250	2.497
3°	1.378	0.248	2.485	1.057	0.254	2.541
4°	1.348	0.243	2.431	1.057	0.254	2.541
5°	1.336	0.241	2.409	1.058	0.254	2.544
6°	1.341	0.242	2.419	1.025	0.246	2.464

BIBLIOGRAFIA

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

Barla G., Brino L., Gamba F., Hugot E. (2017), “A TBM assembly cavern in the French Alps”, *Geomechanics and Tunneling*, 10(3):256-264;

Barla M. e Di Donna A., “Gallerie energetiche in ambiente urbano”, *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2015- IARG 2015, Cagliari, 24-26 giugno 2015*;

Barla M., Di Donna, A., & Santi, A. (2018), “Energy and mechanical aspects on the thermal activation of diaphragm walls for heating and cooling”, *Renewable Energy*, 147, 2654-2663;

Barla M., Di Donna A., Insana A. (2019), “A novel real-scale experimental prototype of energy tunnel”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 87, 1-14;

Barla M., Di Donna A. (2018), “Energy tunnels: concepts and design aspects. *Underground Space* 3 (4), 268-276;

Barla M., Di Donna A., Perino A. (2016), “Application of energy tunnels to an urban environment”, *Geothermics*, vol. 61, pp. 104-113;

Bear J. (1972), "Dynamics of fluids in porous media", *Elsevier*, New York, p.764;

Bear J., Batchman Y. (1990), “Introduction to modeling of transport phenomena in porous media”, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, the Netherlands;

Bergman T. L., Dewitt D. P., Incropera F. P., Lavine A. S., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 6th Edition - John Wiley & Sons, 2007;

Bibliografia

- Bidarmaghz A., Narsilio G. (2018), “Heat exchange mechanisms in energy tunnels”, *Geomechanics for Energy and the Environment (16)*; <https://doi.org/10.1016/j.gete.2018.07.004>;
- Brandl H. (2006), “Energy foundations and other thermo-active ground structures”, *Géotechnique*, 229-236;
- Brandl H. (2016), *Geothermal Geotechnics for Urban Undergrounds*, 15th International scientific conference “Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development”, *Procedia Engineering* (165);
- Bufalini M., Dati G., Rocca M., Scevaroli R. (2017), “The Mont Cenis Base Tunnel”, *Geomechanics and Tunnelling*, 10(5): 246-255;
- Candito G. (2020), “Studio di ottimizzazione dell’impianto idraulico di una galleria energetica”, *Tesi di laurea magistrale*, Politecnico di Torino;
- Capozza, A., De Carli, M., Galgaro, A., Zarrelle, A. (2012), “Linee guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore”, Padova (Italy);
- Clauser C., Huenges E. (1995), “Thermal conductivity of rocks and minerals”, *Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*, pp. 105–126;
- COMSOL Multiphysics, “Heat transfer User’s Guide”, COMSOL 5.4, © 1998–2018 COMSOL;
- Cravero M., Fidelibus C. (1999), “A code for scaled flow simulations on generated fracture networks”, *Computers and Geosciences*, 25:191-195;
- Decreto del Presidente della Repubblica n. 412 del 26 agosto 1993, “Regolamento recante norme per la progettazione, l’installazione, l’esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell’art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10”;
- Di Donna A., Laloui L. (2011), “Understanding the behaviour of energy geo-structures”, *Civil Engineering*, 164(4):184-191;
- Dickson M. H., Fanelli M. (2004), “Che cos’è l’energia geotermica”, *Istituto di Geoscienze e Georisorse*, CNR, Pisa, Italy, <http://www.geothermal-energy.org>;
- DHI-WASY (2010), White Papers Vol.V (FEFLOW), DHI-WASY GmbH, Berlino
- European Parliament and European Council (2002), DIRECTIVE 2002/91/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2002 on the energy performance of buildings, *Official Journal of the European Communities*, (1), 65–71;

Bibliografia

- Fanizzi L. (2008), “Geotermia per la climatizzazione: Applicazioni – tecnologia- analisi costi-benefici”, Collana Energie, Dario Flaccovio Editore;
- Franzius J., Pralle N. (2011), “Turning segmental tunnels into sources of renewable energy”, *ICE Proceedings Civil Engineering*, 164 (1): pp. 35-40;
- Gabalda S. (2008), “Processus d’exhumation dans les Alpes occidentales: modélisation géométrique et reconstitution géodynamique sur la transversale Chartreuse-Maurienne, une approche multi-échelle”, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008;
- Guozhu Z., Caichu X., Meng S., Yichuan Z. and Suguang X. (2013), “A new model and analytical solution for the heat conduction of tunnel lining ground heat exchangers”, *Cold regions science and technology* 88, 59-66;
- Insana A., Barla M. (2020), “Experimental and numerical investigations on the energy performance of a thermo-active tunnel”, Dept. of Structural, Building and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino;
- Lindal B. (1973), “Industrial and other applications of geothermal energy”, *Geothermal Energy*, Paris, UNESCO, pp. 135-148;
- Long JCS, Remer JS, Wilson CR, Witherspoon PA (1982), “Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures”, *Water Resources Research*; 18(3):645-658;
- LTF (2001), “Progetto preliminare in variante: Valutazione e gestione dei rischi relativi a radioattività, gas radon, rocce amiantifere e intercettazione di acque calde”;
- LTF (2006), “Analisi degli studi condotti da LTF in merito al progetto Lione-Torino (sezione internazionale)”;
- LTF (2010), “C30_1141_55-01-14_10-01- Progetto preliminare in variante: Idrogeologia”;
- LTF (2010), “PP2/C3B/TS3/0054 – Profilo idrogeologico di sintesi”;
- LTF (2012), “Progetto preliminare in variante: Trattamento dell’aria in ambiente chiuso”;
- LTF (2013), “Revisione del progetto definitivo – Ventilazione: studio degli scenari di estrazione fumi dal tunnel”;
- National Association of Hydrogeology and Water Wells (ANIPA) (2012), “Acque sotterranee”, *Italian Journal of Groundwater*;
- Ma C., Di Donna A., Dias D., Zhang J. (2021), “Numerical investigations of the tunnel environment effect on the performance of energy tunnels”, *Renewable Energy* 172, 1279-1292;

Bibliografia

- Manzella A., Ungarelli C. (2011), “La Geotermia, l’energia sotto i nostri piedi”, Società editrice il Mulino, Bologna;
- Min KB (2004), “Fractured rock masses as Equivalent Continua - A numerical study”, KTH Land and Water research engineering;
- Nicholson D. P., Chen Q., Pillai A., Chendorain M, “Developments in thermal pile and thermal tunnel linings for city scale GSHP systems”, *Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, February 11-13, 2013;
- Osservatorio per il collegamento ferroviario Torino-Lione (2015), ““Storia, evoluzione, attività e risultati raggiunti dalla prima esperienza di ‘progettazione partecipata’ in Italia””;
- Parisi M., Rocca M., Viat S. (2021), “La risorsa geotermica come opportunità di sviluppo green: lo
- Peltier M., Rotta Loria A.F., Lepage L., Garin E., Laloui L. (2019), “Numerical investigation of the convection heat transfer driven by airflows in underground tunnels”, *Applied Thermal Engineering*, 159:113844;
- Rotta Loria A.F. (2020), “Energy geostructures: Theory and application”, E3S Web of Conferences, Volume 205, 2nd International Conference on Energy Geotechnics (ICEGT 2020);
- Self J., Reddy B., Rosen M.A. (2013), “Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options”, *Applied Energy* 101, 341-348;
- Singh R. M., Sani A. K., Amis T. (2019), “An overview of ground-source heat pump technology”, *Managing Global Warming - An Interface of Technology and Human Issues*, pp: 455 - 485;
- Sterpi D., Coletto A., Mauri L. (2017), “Investigation on the behaviour of a thermo-active diaphragm wall by thermo-mechanical analyses”, Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano;
- TELT (2017), “Progetto definitivo: relazione idrogeologica di sintesi – lato Italia”;
- TELT (2020), “ELABORATI GENERALI: Relazione illustrativa sullo stato dell’arte relativo alla progettazione/autorizzazioni ed esecuzione sezione transfrontaliera - parte italiana”;
- TELT (2021), “La risorsa geotermica come opportunità di sviluppo green”, studio condotto con i Dipartimenti DIATI e DENERG del Politecnico di Torino;
- Tinti F. (2008), “Geotermia per la climatizzazione”, D. Flaccovio Editore;

Bibliografia

Torri R., Brino L., Monin N., Glarey L., Dematteis A., Parisi E. (2014), “Methodological Approach for the Valorisation of the Geothermal Energy Potential of Water Inflows Within Tunnels”, *Engineering Geology for Society and Territory*, 6:963-966, G. Lollino et al. (eds);

Wei Z. Q., Egger P., Descoedres F. (1995), “Permeability predictions for jointed rock masses”, *International Journal Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, Vol. 32 (3), pp: 251 - 261;

Weizhong C., Xianjun T., Hongdan Y., Guojun W., Shanpo J. (2009), “A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for unsaturated porous media”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1 (1): 31–40 ;

Weizhong C., Xianjun T., Diansen Y., Yonghao D., Guojun W., Jianping Y., Hongdan Y., Hongming T., Wusheng Z. (2014), “Study on the influence of airflow on the temperature of the surrounding rock in a cold region tunnel and its application to insulation layer design”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 67 (1–2), pp: 320-334;

Zhang Z., Cheng X. (2017), “A fully coupled THM model based on a non-equilibrium thermodynamic approach and its application”, *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 41:527-554;

[www.bbt-se.com/it/galleria/quadro-generale-del-progetto/;](http://www.bbt-se.com/it/galleria/quadro-generale-del-progetto/)

www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/la-geothermie-en-chiffres;

[http://old.tekneco.it/energia/perche-la-geotermia-puo-contribuire-a-superare-il-deficit-energetico/;](http://old.tekneco.it/energia/perche-la-geotermia-puo-contribuire-a-superare-il-deficit-energetico/)

<https://www.gsamasternews.it/?p=2263;>

[https://www.htflux.com/en/documentation/materials/air-cavities/;](https://www.htflux.com/en/documentation/materials/air-cavities/)

[http://www.ltf-sas.com/iltunnel-di-base/;](http://www.ltf-sas.com/iltunnel-di-base/)

[https://quickfield.com/air_cavity_thermal_conductivity.htm;](https://quickfield.com/air_cavity_thermal_conductivity.htm)

www.issmge.org/committees/technical-committees/impact-on-society/energy-geotechnics;

[https://undertheground.org/2014/04/11/monitoring-long-term-performance-of-energy-piles/;](https://undertheground.org/2014/04/11/monitoring-long-term-performance-of-energy-piles/)

[https://www.telt-sas.com/it/la-sezione-transfrontaliera/;](https://www.telt-sas.com/it/la-sezione-transfrontaliera/)

[www.unionegeotermica.it/stime-crescita-geotermia-italia.asp;](http://www.unionegeotermica.it/stime-crescita-geotermia-italia.asp)

[https://kuehnbuilding.com/geothermal.html;](https://kuehnbuilding.com/geothermal.html)

Bibliografia

C3B_0062_00-06-01-10-01_Modello Geotermico_B (regione.piemonte.it)

C30_1021_55-01-02_10-01_Ambito Programmatico_Progettuale_Gestione Emergenze_0 (regione.piemonte.it)

Ringraziamenti

Giunti alla conclusione, mi sento in dovere di ringraziare coloro che mi hanno aiutato e accompagnato alla fine di questo percorso, anche con un semplice messaggio, una parola o una stretta di mano.

Innanzitutto, vorrei ringraziare i miei professori, il *professore Marco Barla* per la sua disponibilità, professionalità e per avermi permesso di averlo come relatore e l'*Ing. Alessandra Insana*, per tutti i consigli, attenzione e cura con cui mi ha seguito nel lavoro svolto. La loro esperienza e cooperazione è stata fondamentale.

Un ruolo cruciale lo ha svolto tutta la mia famiglia, nello specifico *mia madre*, di cui riconosco il doppio sacrificio, in quanto mai come in questi ultimi anni ha provato a fare sia da figura paterna che materna. I *miei nonni* e *mio zio*, che hanno sempre creduto in me. Sono loro che, assieme a mia madre e a 600 km di distanza, hanno permesso l'inizio di questo percorso di formazione, sostenendomi nei momenti più difficili, con parole o in silenzio, ed anche economicamente.

Dopo i legami di sangue, non posso non ricordare la 'family', quella adottiva, fatta degli *amici* con cui sono cresciuta e quelli che ho conosciuto più avanti. Parlo soprattutto di mia cugina, sorella acquisita, *Caterina, Serena* ed *Arianna*, le 'stalkerine', con cui ho e condivido ogni cosa e *Silvia* (con te ci siamo conosciute più tardi, ma è sembrato che ci conoscessimo già da una vita). Senza il vostro supporto, risate e anche pianti, non so come avrei fatto in questi anni.

Vanno nominati indubbiamente i *VSP*, che hanno reso indimenticabile anche questa estate, arricchendola di memorie e istanti indimenticabili. E' stato davvero importante avervi accanto, soprattutto in questi ultimi mesi in cui portavo a conclusione il mio percorso.

Momenti fantastici ci sono stati anche con quegli amici e compagni torinesi, conosciuti durante il mio percorso, durante i gruppi di studio e a lezione (in presenza, ma anche online). Grazie per tutte le risate. *Simona*, compagna di studi e di (tante) ansie: fondamentali i nostri confronti pre-esame e gli istanti trascorsi assieme; con te ho capito che tutte le difficoltà universitarie si affrontano in un modo o

nell'altro. E *Tiziana*, che mi ha sostenuto e con cui ci siamo aiutate sia quando eravamo entrambe studentesse che quando una delle due aveva terminato il suo percorso. Grazie per i mille consigli! Infine, anche *Martina*, la mia quasi-coinquilina che ho conosciuto a Torino e con cui abbiamo condiviso luoghi, cene e problemi da fuori sede. Non vedo l'ora di riabbracciarti nel capoluogo piemontese.

Le parole non saranno mai abbastanza per farvi capire quanto siete stati importanti soprattutto nel momento peggiore, quando ero abbattuta e nel pieno della malattia, quasi certa di lasciare tutto e ricominciare da capo. Grazie a voi sono riuscita a crederci sempre.