POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

De-icing di infrastrutture tramite gallerie energetiche

Relatori:
Prof. Marco Barla
Ing. Fabrizio Zacco
Ing. Matteo Baralis

Candidato:
Lari Emanuele

Firma dei relatori:

……
……
……

Firma del candidato:

……

Anno Accademico 2017/2018

Ringraziamenti

Si ringrazia sentitamente lo studio AK Ingegneria Geotecnica, ed in particolar modo il Dott. Ing. Georgios Kalamaras, per la disponibilità ed il materiale fornito che si è rivelato prezioso per la stesura della tesi.

INDICE

Indice delle Figure 3
Indice delle Tabelle 7
1 Introduzione 9
2 L'Energia Geotermica e il suo Sfruttamento 11
2.1 Cenni sulla Geotermia 11
2.1.1 Il Gradiente Geotermico 12
2.1.2 Il Sistema Geotermico 13
2.1.3 La Classificazione dei sistemi geotermici 15
2.2 Utilizzo delle Risorse Geotermiche 17
2.3 La Geotermia Superficiale 19
2.3.1 La Pompa di Calore e il Ciclo Termodinamico 19
2.3.2 Circuiti Aperti 24
2.3.3 Circuiti Chiusi 26
2.4 Le Geostrutture energetiche 28
2.4.1 I Pali Energetici 28
2.4.2 I tunnel Energetici 31
2.4.3 Un esempio di Concio Energetico: Enertun 35
3 Metodologie per il De-icing 39
3.1 Metodi di De-icing classici 39
3.1.1 Utilizzo di Prodotti Chimici 42
3.1.2 Utilizzo di Abrasivi 46
3.1.3 Utilizzo di Mezzi Spazzaneve 47
3.2 Metodi Alternativi per il De-icing 49
3.2.1 Il Calcestruzzo Conduttore Elettrico 50
3.2.2 L'Energia Geotermica per il De-icing 51
4 Ipotesi di Applicazione al Viadotto "Turinella" 55
4.1 Inquadramento dell'Opera 55
4.2 Inquadramento Geologico 56
4.3 Acclività e DTM dell'Area 59
4.4 Clima e Temperature 61

4.5 Geometria dell'Opera 62
5 Modello Numerico 67
5.1 Descrizione Delle Simulazioni 67
5.2 Costruzione Del Modello Con FEFLOW 69
5.3 Modello Esteso dell'area 71
5.3.1 Geometria e Caratteristiche dei Materiali 71
5.3.2 Condizioni al Contorno 75
5.3.3 Risultati della Simulazione 76
5.4 Simulazione della Galleria Energetica 88
5.4.1 Geometria e Caratteristiche dei Modelli Ridotti 90
5.4.2 Condizioni al Contorno 92
5.4.3 Risultati della Simulazione 97
6 Conclusioni 111
Bibliografia 115

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1: Schematizzazione degli strati della Terra (Dickson & Fanelli, 2004)..... 12
Figura 2-2: Andamento stagionale delle temperature del suolo medie al variare della profondità (tratta da www.robur.it). 13
Figura 2-3: Rappresentazione schematica di un sistema geotermico (Dickson & Fanelli, 2004).... 14
Figura 2-4: Diagramma di Lindal per l'utilizzo dei fluidi geotermici in funzione della temperatura. (Dickson & Fanelli, 2004)..... 17
Figura 2-5: Esempio di utilizzo a cascata di un fluido geotermico (Dickson & Fanelli, 2004)..... 18
Figura 2-6: Schema del funzionamento di una pompa di calore. 20
Figura 2-7: Schema dei componenti della pompa di calore (Modificata dal catalogo Caleffi)..... 22
Figura 2-8: Il ciclo termodinamico del fluido termodinamico in una pompa di calore (tratta da www.energyhunters.it). 23
Figura 2-9: Esempio di un circuito aperto che estrare l'acqua dalla falda e la scarica in superficie (tratto da www.ecoseven.net). 25
Figura 2-10: A partire da sinistra sono riportati una schematizzazione ed il relativo esempio di: pilastri energetici, sonde orizzontali interrate, sonde orizzontali che sfruttano l'acqua di un bacino e infine delle sonde verticali. (modificata da www.geologilazio.it) 27
Figura 2-11: Esempi di armature con fissati al loro interno i tubi in polietilene preparate per i pali energetici, a destra le armature sono istallate già nel calcestruzzo per creare il palo (tratta da www.setaprogetti.it) 29
Figura 2-12: Rappresentazione schematica di un sistema di pali energetici raccordato con la pompa di calore. 30
Figura 2-13: Esempio di un concio energetico con in evidenza l'armatuta e il tubo in polietilene (Frodl et al.,2010). 31
Figura 2-14: Esempi di gabbie di armatura di conci energetici prima della colata di cemento (tratti da www.rehau.co.uk). 32
Figura 2-15: Pianta del sistema geotermico di Jenbach in Austria (Frodl et al.,2010). 33
Figura 2-16: Posa del sistema di tubi con la tecnologia "Energy Fleece" all'interno dell'impianto di prova del Tunnel Lainzer a Vienna (Unterberger et al., s.d.). 34
Figura 2-17: Sulla sinistra un concio classico confrontato con un concio Enertun sulla destra (Barla & Di Donna, 2016)..... 35
Figura 2-18: Configurazione di un concio "Enertun Ground" (Barla & Di Donna, 2016). 36
Figura 2-19: Configurazione di un concio "Enertun Air" (Barla & Di Donna, 2016). 36
Figura 2-20: Configurazione di un concio "Enertun Ground&Air" (Barla & Di Donna, 2016)..... 37
Figura 3-1: Sulla sinistra un particolare di una strada ghiacciata mentre sulla destra un esempio di ingorgo causato dalle abbondanti precipitazioni nevose del 2013 in Long Island (USA). 39
Figura 3-2: Sulla sinistra della figura è riportato il cloruro di sodio utilizzato per il deicing mentre sulla destra vi è un mezzo spargisale all'opera (tratta da www.granulati.it). 43
Figura 3-3: Da destra verso sinistra sono rispettivamente riportati gli effetti del cloruro di calcio, cloruro di sodio, cloruro di magnesio sul calcestruzzo visti al microscopio (Michigan Winter Operation Conference, 2011). 44
Figura 3-4: Sono riportati gli effetti della corrosione sia sulle parti meccaniche che sulla carrozzeria dovuta al passaggio prolungato dei veicoli in strade oggetto di trattamento con prodotti chimici per il deicing (Michigan Winter Operation Conference, 2011)..... 45

Figura 3-5: Sulla sinistra un sacco di sabbia utilizzato per aumentare la trazione mentre sulla destra alcuni addetti spargono la sabbia sulla carreggiata in previsione di un evento nevoso (tratta da www.lowes.com). 46
Figura 3-6: Sulla destra si può osservare uno spazzaneve "Towplow" all'opera affincato da un mezzo tradizionale sulla sinistra (tratta da www.wikipedia.it). 48
Figura 3-7: Due esempi di polistirene estruso utilizzato per l'isolamento dei ponti e rampe (tratta da www.archiexpo.fr). 49
Figura 3-8: Schema dell'impalcato di un ponte costruito utilizzando il calcestruzzo conduttore (modificato da Yehia & Tuan, 1998) 50
Figura 3-9: Nel dettaglio si può osservare una serpentina durante l'istallazione (Athmann et al., s.d.). 51
Figura 3-10: Sulla sinistra è riportato il sistema di tubi durante l'istallazione in una piazzola aeroportuale mentre sulla destra si può osservare l'effetto durante una nevicata (Olgun & Bowers, 2016). 52
Figura 3-11: Sono riportati alcuni esempi di sistemi di sghiacciamento geotermici: rispettivamente si può osservare sulla destra l'applicazione su un marciapiede mentre sulla sinistra su un ponte (Eugster, 2007). 53
Figura 4-1: Mappa della Variante Strada Provinciale n. 23 "Dir.1" 55
Figura 4-2: Carta geologico strutturale dei caratteri litotecnici. 57
Figura 4-3: Sezione AB della carta geologico strutturale dei caratteri litotecnici. 58
Figura 4-4: Profilo geologico longitudinale delle gallerie "Craviale" e "La Turina" 58
Figura 4-5: Carta delle acclività in scala 1:10'000. 59
Figura 4-6. Modello Digitale del Terreno ottenuto con il software QGIS. 60
Figura 4-7: Sezione rappresentativa del ponte "Turinella" (Kalamaras et al., 2005). 62
Figura 4-8: Sezione rappresentativa B della galleria "Craviale" (Kalamaras et al., 2005). 63
Figura 4-9: Sezione rappresentativa C1 della galleria "Craviale" (Kalamaras et al., 2005). 64
Figura 4-10 Sezione rappresentativa C2 della galleria "Craviale" (Kalamaras et al., 2005). 64
Figura 4-11: Sezione rappresentativa F1 della galleria "La Turina" (Kalamaras et al., 2005). 65
Figura 4-12: Sezione rappresentativa F2 della galleria "La Turina" (Kalamaras et al., 2005). 65
Figura 5-1: Rappresentazione tridimensionale delle infrastrutture modellate appartenenti Strada Provinciale n.23 "del colle del Sestriere". 67
Figura 5-2: Mappa concettuale delle simulazioni effettuate con FEFLOW. 68
Figura 5-3: Sezione rappresentativa tratta dalla galleria "Craviale". 72
Figura 5-4: Sezione rappresentativa tratta dalla spalla del viadotto "La Turinella". 73
Figura 5-5: Sezione rappresentativa dell'impalcato del viadotto "La Turinella". 73
Figura 5-6: Veduta del versante che comprende la galleria "Craviale". 74
Figura 5-7: Veduta del versante che comprende la galleria "La Turina". 74
Figura 5-8: Funzioni dell'andamento termico nell'arco di un anno della temperatura misurata nel comune di San Germano Chisone. 75
Figura 5-9: Sezione 1 con evidenziate le condizioni al contorno assegnate. 76
Figura 5-10: Rappresentazione tridimensionale dell'impalcato con evidenziati i punti di osservazione dove è stata misurata la temperatura. 77
Figura 5-11: Andamento termico durante la stagione invernale misurato nei punti situati sulla sinistra dell'impalcato confrontato con la variazione della temperatura dell'aria. 78
Figura 5-12: Andamento della temperatura durante la stagione invernale misurato nei punti situati al centro dell'impalcato confrontato con la variazione termica dell'aria. 78

Figura 5-13: Andamento termico durante la stagione invernale misurato nei punti situati sulla destra dell'impalcato confrontato con la variazione della temperatura dell'aria. 79
Figura 5-14: Posizione dei tre punti di osservazione per la misura dell'andamento termico all'interno del rivestimento di una sezione tipo analizzata. 80
Figura 5-15: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 33. 81
Figura 5-16: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 23. 81
Figura 5-17: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 13. 82
Figura 5-18: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 10. 82
Figura 5-19: Andamento termico nel punto alla sommità di dove passa l'arco nel rivestimento nelle sezioni analizzate della galleria "Craviale". 83
Figura 5-20: Andamento termico nel terreno circostante la galleria "Craviale" a fine simulazione relativo alla sezione 10. 84
Figura 5-21: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 110. 85
Figura 5-22: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 120. 85
Figura 5-23: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 130. 86
Figura 5-24: Andamento termico nel punto alla sommità di dove passa l'arco nel rivestimento nelle sezioni analizzate della galleria "La Turina". 86
Figura 5-25: Andamento termico nel terreno circostante la galleria "Craviale" a fine simulazione relativo alla sezione 120. 87
Figura 5-26: Rappresentazione tridimensionali dell'infrastruttura dove sono visibili le tre porzioni del sistema di serpentine previste a progetto. 88
Figura 5-27: Porzione del modello rappresentativa della galleria e della relativa serpentina. 90
Figura 5-28: Rappresentazione tridimensionale di una spalla del ponte, del terreno circostante e del relativo tratto lineare di tubo in polietilene di andata e ritorno dall'impalcato. 91
Figura 5-29: Porzione del modello rappresentativa dell'impalcato e della relativa serpentina. 92
Figura 5-30: Porzione del modello che rappresenta la galleria con evidenziate le condizioni al contorno di temperatura imposte. 93
Figura 5-31: Porzione del modello che rappresenta la spalla del viadotto con evidenziate le condizioni al contorno di temperatura imposte. 94
Figura 5-32: Porzione del modello rappresentativa dell'impalcato con evidenziate le condizioni al contorno di temperatura imposte. 95
Figura 5-33: Andamento delle temperature nel mese di gennaio. 95
Figura 5-34: Andamento delle temperature nell'arco di un mese in corrispondenza del centro e del bordo della serpentina. 96
Figura 5-35: Particolare del modello ridotto rappresentativo della galleria con evidenziati i sei punti di osservazione del fluido termovettore fissati. 97
Figura 5-36: Andamento termico del fluido termovettore nei punti di osservazioni fissati del circuito. 98
Figura 5-37: Particolare del modello ridotto rappresentativo della spalla con evidenziati i due punti di osservazione della temperatura del fluido termovettore fissati. 98
Figura 5-38: Andamento termico del fluido termovettore in uscita dalla spalla del viadotto. 99
Figura 5-39: Particolare del modello ridotto rappresentativo dell'impalcato con evidenziati i quattro punti di osservazione della temperatura del fluido termovettore fissati. 99
Figura 5-40: Andamento termico del fluido termovettore all'interno dell'impalcato. 100
Figura 5-41: Visione dall'alto del modello ridotto rappresentativo dell'impalcato con evidenziati i punti di osservazione della temperatura della superficie stradale fissati. 101

Figura 5-42: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della prima porzione di serpentina studiata. 102
Figura 5-43: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della seconda porzione di serpentina studiata. 102
Figura 5-44: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della terza porzione di serpentina studiata. 103
Figura 5-45: Dettaglio dell'andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione al di sopra della terza porzione di serpentina nei primi tre giorni di simulazione. ... 103
Figura 5-46: Andamento termico del fluido termovettore in uscita dalla spalla del viadotto. 104
Figura 5-47: Andamento termico del fluido termovettore nei punti di osservazioni fissati del circuito. 104
Figura 5-48 Andamento termico nel terreno circostante il modello ridotto della galleria a fine simulazione relativo alla sezione centrale. 105
Figura 5-49: Andamento termico del fluido termovettore in uscita dalla spalla del viadotto. 106
Figura 5-50: Andamento termico del fluido termovettore all'interno dell'impalcato. 106
Figura 5-51: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della prima porzione di serpentina studiata. 107
Figura 5-52: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della seconda porzione di serpentina studiata. 107
Figura 5-53: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della terza porzione di serpentina studiata. 108
Figura 5-54: Dettaglio dell'andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione al di sopra della terza porzione di serpentina nei primi tre giorni di simulazione. ... 108
Figura 5-55: Confronto fra gli andamenti delle temperature di uscita dall'impalcato del fluido termovettore ottenute nel punto di osservazione 4 durante i passaggi 3 e 7..... 109
Figura 5-56: Andamento termico nella sezione più critica dell'impalcato, la più lontana dall'ingresso del fluido termovettore. 110
Figura 5-57: Andamento termico sulla superficie stradale tridimensionale del modello a fine simulazione..... 110

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2-1: Classificazione dei sistemi geotermici a al variare della temperatura. 16
Tabella 3-1: Tabella riassuntiva dei prncipali prodotti chimici utilizzati per il deicing che racchiude la temperatura e le quantità ideali di utilizzo (Yehia & Tuan, 1998). 44
Tabella 4-1: Temperature massime e minime, precipitazioni e umidità medie mensili misurate nel comune di San Germano Chisone (fonte www.ilmeteo.it)..... 61
Tabella 5-1: Caratteristiche termiche dei materiali che compongono il modello..... 72
Tabella 5-2: Sezioni dove è stata misurata la temperatura, relativi punti di osservazione e distanza fra il punto più alto della galleria e la superficie. 80
Tabella 5-3: Descrizione riassuntiva dei passaggi della simulazione. 89
Tabella 5-4: Caratteristiche termiche dei tubi in polietilene. 90

1 INTRODUZIONE

La presente Tesi di Laurea Magistrale riguarda l'utilizzo delle gallerie energetiche, che sfruttano l'energia geotermica superficiale, per il de-icing di infrastrutture viarie, come ponti e viadotti, i quali sono particolarmente suscettibili alle problematiche di formazione del ghiaccio e accumulo della neve sul manto stradale durante la stagione invernale.

Con il termine galleria energetica si intende l'implementazione all'interno del rivestimento di un tunnel di un sistema di serpentine atto ad estrarre il calore naturale del terreno per poi trasportarlo attraverso un fluido termovettore in un'area adiacente di interesse al fine di sfruttarlo; si tratta di una fonte di energia rinnovabile ed ecologicamente sostenibile.
Il principale vantaggio di tali impianti consiste nel costo ridotto di installazione rispetto al costo complessivo dell'opera che va di pari passo con la possibilità di poterli mantenere attivi per tutta la durata della vita utile dell'opera.
L'efficacia della tecnologia sopracitata sarà studiata, tramite un modello numerico, nell'ambito di una costruzione già esistente ovvero il ponte "Turinella" situato lungo la Strada Provinciale n. 23 "del colle del Sestriere" in corrispondenza del comune di San Germano Chisone in Provincia di Torino.
Il ponte, caratterizzato da lunghezza di 50 m, attraversa la valle del Rio Turinella ed è posizionato fra due gallerie chiamate rispettivamente, partendo da valle verso monte, "Craviale" e "La Turina" all'interno delle quali saranno istallati i tubi per lo scambio termico.

Il concetto di geotermia sarà trattato nel secondo capitolo e saranno descritti i vari impianti che ne rendono possibile lo sfruttamento; l'energia geotermica può essere considerata come una fonte sia rinnovabile che pulita in quanto sfrutta il calore naturale che viene sprigionato dalle profondità della terra.
Si può fare una distinzione fra le risorse geotermiche profonde e quelle superficiali: le prime sono legate alla presenza di condizioni del terreno e di falda particolari mentre le seconde, classificate fino a 400 m di profondità, sono di più facile utilizzo in quanto possono essere

sfruttate ovunque dato che non sono richiesti gradienti termici locali elevati ma basta solo il calore del terreno.
Le gallerie energetiche fanno parte della famiglia di geostrutture, al pari di pali energetici, che sfrutta la geotermia superficiale, solitamente sono impiegate per il riscaldamento ed il condizionamento di edifici e per la produzione di acqua calda, sono generalmente accoppiate ad una pompa di calore per raggiungere temperature più alte.

Nel caso oggetto di studio le gallerie energetiche saranno sfruttate per il de-icing dell'impalcato del ponte "Turinella", tale tecnologia permette di fare a meno delle classiche metodologie per de-icing, descritte nel terzo capitolo, quali l'utilizzo di prodotti chimici, fra cui il più impiegato è il sale, di abrasivi e di mezzi meccanici per la rimozione del manto nevoso e la prevenzione della formazione di ghiaccio.
Le strategie citate hanno un impatto sull'ambiente elevato in quanto provocano l'inquinamento nelle falde e hanno effetti negativi sulla flora e sulla microfauna delle aree adiacenti alle strade trattate, inoltre contribuiscono al degrado delle strutture stesse; al contrario, fra i vantaggi dello sfruttamento dell'energia geotermica per il de-icing vi è il fatto che si tratti di una fonte di energia sia rinnovabile che pulita.

L'impianto di cui viene simulata l'attivazione non prevede inoltre l'utilizzo di una pompa di calore ma solo di una pompa per far circolare il fluido termovettore all'interno della serpentina e sarà quindi attivabile a seconda delle esigenze riducendone al minimo il costo per il funzionamento.

La geometria dell'infrastruttura, composta dalle gallerie "Craviale" e "La Turina" e dal ponte "Turinella" compreso fra le due, ed il contesto geologico e climatico dove è stata costruita saranno trattati nel quarto capitolo.

Il quinto capitolo prevede la modellazione dell'infrastruttura e dell'area circostante e la successiva verifica dell'efficacia del sistema geotermico per il de-icing tramite una modellazione numerica agli elementi finiti con accoppiamento termo-idraulico.
Sarà inizialmente valutata la variazione di temperatura nel terreno nell'arco dell'anno per stabilire la posizione ideale della galleria energetica e l'andamento della temperatura sulla superficie stradale; successivamente, per le condizioni ambientali mediamente peggiori relative al comune di San Germano Chisone, sarà valutata l'efficacia del sistema geotermico per il de-icing istallato calcolando nell'arco di trenta giorni di simulazione, rappresentativi dell'intera stagione invernale, le temperature del fluido frigorigeno all'interno della serpentina e della superficie stradale.

Infine nel sesto capitolo saranno tratte le relative conclusioni a riguardo.

2 L'ENERGIA GEOTERMICA E IL SUO SFRUTTAMENTO

2.1 CENNI SULLA GEOTERMIA

La definizione di "geotermia" ha origine dai termini greci "Geos" e "thermos" e indica il calore contenuto all'interno della Terra.
Tale calore è dovuto principalmente a due fattori:

- ***Calore radiogenico:*** deriva dal decadimento di isotopi radioattivi, quali l'uranio U^{235} e U^{238}, il potassio K^{40} ed il torio TH^{232}, contenuti in maggior numero nella crosta terrestre (Dickson & Fanelli, 2004).
- ***Calore primordiale:*** risale ai processi di formazione del pianeta.

Con il termine "energia geotermica" invece si è soliti intendere solamente la parte di calore che può essere estratta ed utilizzata dall'uomo (Dickson & Fanelli, 2004).

La Terra è formata, come si può meglio osservare in *Figura 2-1*, da tre porzioni concentriche:

- ***La crosta terrestre:*** è lo strato più esterno, ha uno spessore che varia dai circa 20-65 Km misurati nelle aree continentali ai 5-6 km misurati nelle aree oceaniche.
- ***Il mantello:*** posto al di sotto della crosta, ha uno spessore medio di 2900 km e una temperatura che varia dai 500-900°C a contatto con la crosta ai circa 3500°C in corrispondenza del nucleo.
- ***Il nucleo:*** ha un raggio di 3470 km ed è composto da una parte esterna liquida, costituita da ferro e nichel, e da una parte interna, quasi esclusivamente in ferro, che, nonostante le temperature siano più elevate, fino a circa 6000°C, ha un carattere viscoso dovuto alla maggiore pressione.

Un'ulteriore distinzione può essere fatta fra la litosfera, costituita dalla crosta e dalla parte superiore del mantello, che è caratterizzata da un comportamento rigido ed uno spessore totale fra i 200 e gli 80 km, e l'astenosfera che, al contrario, presenta un comportamento viscoso con movimenti convettivi di piccola entità dovuti alle differenze interne di temperatura.

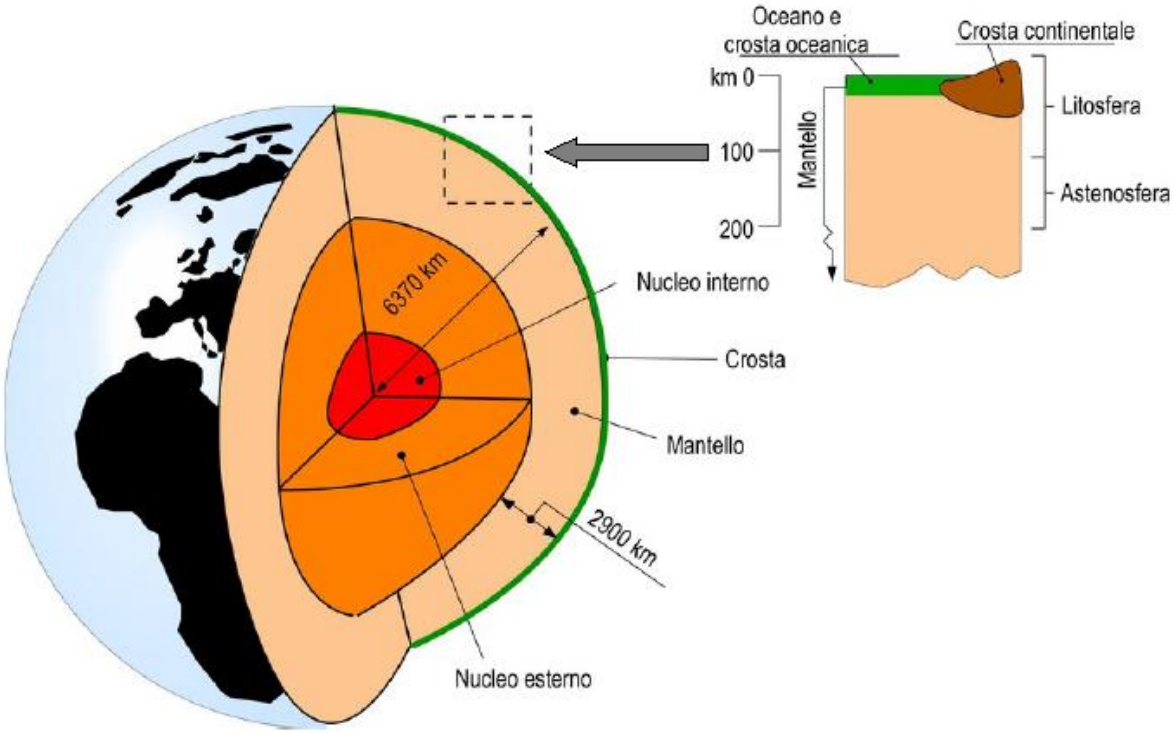

Figura 2-1: Schematizzazione degli strati della Terra (Dickson & Fanelli, 2004)

La presenza di celle convettive al di sotto della litosfera è legata alla teoria della "tettonica a zolle": in prossimità dei loro rami ascendenti la litosfera infatti si frattura dando luogo alle dorsali, in corrispondenza delle quali si verifica la fuoriuscita di magma con conseguente creazione di nuova crosta (Dickson & Fanelli, 2004).
Le porzioni di litosfera poste ai due lati delle dorsali tendono ad allontanarsi fra loro di pochi centimetri l'anno a causa dell'effetto di trascinamento esercitato dai flussi opposti di magma con cui sono a contatto.
Mentre in corrispondenza delle dorsali si crea nuova crosta terrestre vi sono aree, dette zone di subduzione, dove la litosfera si immerge al di sotto della zolla adiacente dando luogo a fosse oceaniche, archi di isole e catene montuose ricche di vulcani.

Sulla base delle precedenti considerazioni, secondo il bilancio termico di Stacey e Loper (1988), il flusso di calore che attraversa la crosta terrestre è pari a 42 x 10^{12} W di cui solo una parte può essere utilizzato in maniera conveniente: la possibilità di sfruttare o meno il calore geotermico è legata al concetto di gradiente geotermico.

2.1.1 Il Gradiente Geotermico

Il gradiente geotermico misura, rapportandola con l'aumentare della profondità, la variazione di temperatura del terreno; durante i primi dieci metri di profondità la temperatura è influenzata dalle condizioni meteo locali e dalle escursioni termiche stagionali e giornaliere mentre, fino ai cento metri di profondità, si attesta approssimativamente su un valore pari

alla temperatura media dell'aria nell'arco dell'anno (Dickson & Fanelli, 2004).
Tale concetto è esemplificato nella *Figura 2-2* dove si può notare come la variazione di temperatura nelle diverse stagioni sia notevole nei primi 10 m di terreno e diventi successivamente costante.

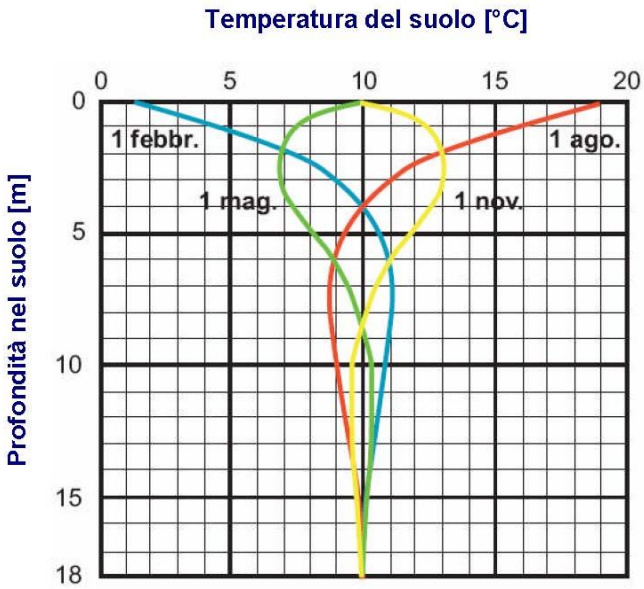

Figura 2-2: Andamento stagionale delle temperature del suolo medie al variare della profondità (tratta da www.robur.it).

Per profondità maggiori il gradiente termico aumenta in media di 2,5°/3° C ogni 100 m e, nel caso di bacini riempiti da strati di sedimenti geologicamente recenti, è generalmente inferiore mentre, per le aree geologicamente attive, è invece fino a dieci volte superiore.
Nelle aree geotermicamente attive, come possono essere ad esempio le zone vulcaniche e le aree con sorgenti termali o geyser, l'energia geotermica è resa disponibile a profondità accessibili ed economicamente convenienti da vettori termici, generalmente acqua o vapore, che sono denominati fluidi geotermici.

2.1.2 Il Sistema Geotermico

Un sistema geotermico si può individuare in aree dove il gradiente geotermico è simile a quello medio o poco superiore; in questo caso, per profondità economicamente utili, saranno raggiunte temperature di massimo circa 100° C; oppure può essere situato in una zona in prossimità dei confini delle zolle crostali e di conseguenza si potranno trovare temperature più elevate, fino a 400° C (Dickson & Fanelli, 2004).

Un sistema geotermico, secondo la definizione fornita da Hochenstein nel 1990, è: "Un sistema acqueo convettivo che, in uno spazio confinato della parte superiore della crosta terrestre, trasporta il calore da una sorgente termica al luogo, generalmente la superficie, dove il calore stesso e assorbito (disperso o utilizzato)".

È quindi composto da tre elementi (Dickson & Fanelli, 2004):

- ***Una sorgente di calore:*** può essere di due tipologie: concentrata o dispersa; il primo caso è piuttosto comune nelle aree vulcaniche ed è dovuto alla presenza di un'intrusione magmatica a profondità inferiore ai 10 Km e conseguente temperatura superiore ai 600°C; per quanto riguarda invece la seconda tipologia, tipica dei sistemi a bassa temperatura, il calore è fornito dal terreno.
- ***Un serbatoio:*** è generalmente costituito da una formazione di rocce calde permeabili dove circola liberamente il fluido geotermico assorbendone il calore.
  Il serbatoio è confinato fra rocce impermeabili che impediscono l'eccessiva dispersione di fluido termico e collegato all'area di ricarica superficiale.
- ***Un fluido geotermico:*** è solitamente costituito dall'acqua piovana che si infiltra nel serbatoio dove, sotto forma di acqua o vapore, assorbe il calore dalla sorgente.
  Può poi risalire in superficie naturalmente attraverso faglie e fratture e manifestarsi sotto forma di sorgenti termali, geyser o fumarole; in caso contrario viene estratto artificialmente tramite un pozzo geotermico.

In *Figura 2-3* è rappresentato schematicamente un tipico sistema geotermico dove si possono individuare le componenti precedentemente descritte.

La circolazione del fluido geotermico all'interno di un sistema è dovuto nuovamente al fenomeno della convezione: la porzione di fluido più vicina alla sorgente di calore, aumentando di temperatura, diminuisce di densità e tende a salire mentre quella più fredda e densa che alberga ai margini del sistema la va gradualmente a sostituire.

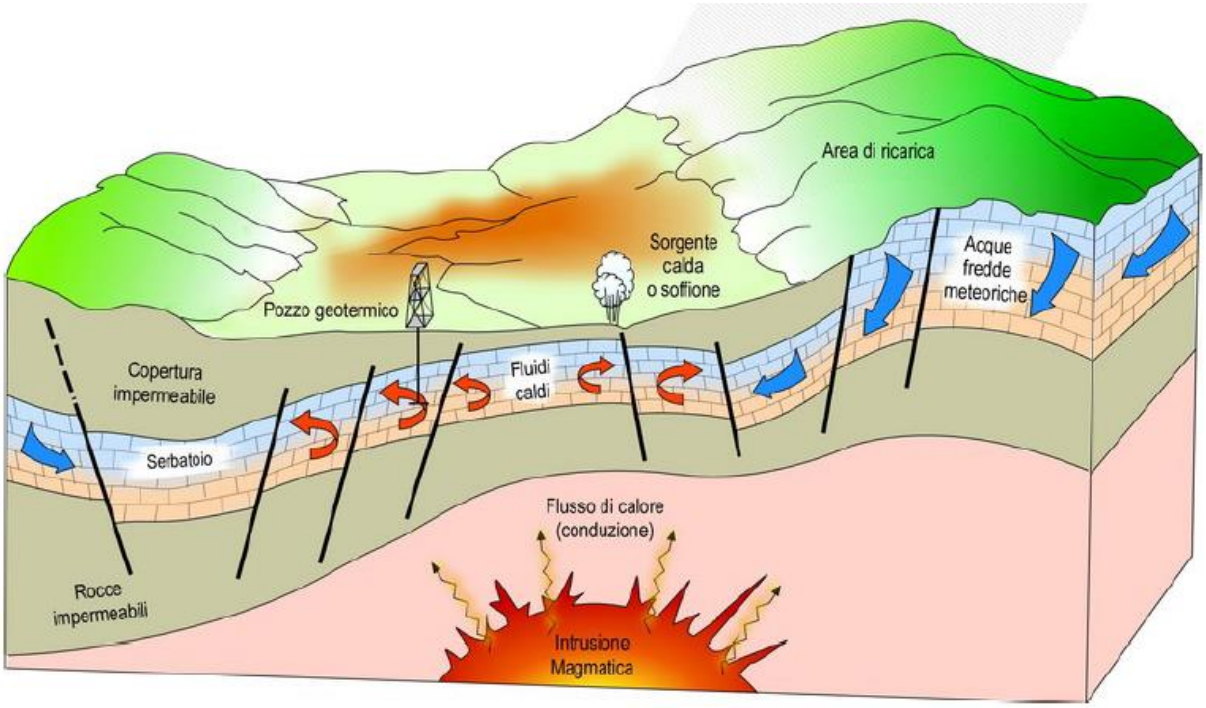

Figura 2-3: Rappresentazione schematica di un sistema geotermico (Dickson & Fanelli, 2004)

2.1.3 La Classificazione dei sistemi geotermici

I sistemi geotermici possono essere classificati al variare di tre caratteristiche principali: a seconda dello stato fisico del fluido al loro interno, a seconda dell'entalpia oppure a seconda dello stato di equilibrio del serbatoio (Dickson & Fanelli, 2004).

Per quanto riguarda il primo metodo di classificazione si possono individuare al variare delle condizioni di pressione e temperatura del serbatoio:

- ***Sistemi "ad acqua dominante":*** Presentano al loro interno acqua in fase liquida o miscele acqua-vapore ma l'acqua in forma liquida è la fase continua che controlla la pressione.
  Se il serbatoio non è confinato da rocce impermeabili ed e situato a bassa profondità l'acqua che si estrae non è in pressione ed ha temperature variabili fra i 30° e i 100° C; Al contrario quando vi è la presenza copertura impermeabile l'acqua e in grado di rimanere in fase liquida anche per temperature fino a 225°C, grazie alla pressione. Quando una perforazione raggiunge un serbatoio di questa tipologia, l'acqua, risalendo in superficie, depressurizza ed evapora parzialmente.
  Si ritiene che la maggior parte dei sistemi geotermici individuati nel mondo sia con caratteristiche analoghe al tipo appena descritto.
- ***Sistemi "a vapore dominante":*** Se un serbatoio geotermico presenta caratteristiche geologicamente simili al precedente e la temperatura raggiunge valori superiori a 225° C il fluido geotermico sarà presente sotto forma di vapore secco o surriscaldato, il quale controllerà la pressione.
  Questi sistemi sono molto più rari in natura e sono quelli con un maggiore valore energetico.

Per quanto riguarda il secondo metodo di classificazione si parta dalla definizione dell'entalpia H riportata nell'*Equazione 2-1*: in un sistema geotermico è una funzione di stato costituita dalla somma dell'energia interna U e del prodotto della pressione p per il volume V (Rodonò & Volpes, 1998).

$$H = U + pV \qquad (2\text{-}1)$$

Poiché l'entalpia è più o meno proporzionale alla temperatura essa può essere utilizzata per definire approssimativamente l'energia termica di un fluido geotermico.
A seconda dei differenti intervalli di temperatura, proposti da diversi esperti e riportati nella *Tabella 2-1,* si possono individuare:

- ***Sistemi "ad alta entalpia":*** Sono gli unici sistemi che possono essere "a vapore dominante", In questo caso, l'energia geotermica viene sfruttata principalmente per produrre energia.
- ***Sistemi "a media entalpia":*** Tali sistemi contengono fluidi geotermici a temperature comprese tra i 90 e i 225° C a seconda delle classificazioni, che vengono impiegati solo per usi diretti.

- ***Sistemi "a bassa entalpia":*** Sono caratterizzati da fluidi geotermici con temperature inferiori ai 125° C che quindi sono utilizzati per usi diretti anche con l'ausilio di pompe di calore.

	Risorse a bassa entalpia	**Risorse a media entalpia**	**Risorse ad alta entalpia**
Muffler e Cataldi (1978)	<90	90-150	>150
Hochstein (1990)	<125	125-225	>225
Benderitter e Cormy (1990)	<100	100-200	>200
Nicholson (1993)	≤ 150	-	>150
Axelsson e Gunnlaugsson (2000)	≤ 190	-	>190

Tabella 2-1: Classificazione dei sistemi geotermici a al variare della temperatura.

Infine al variare dello stato di equilibrio del serbatoio si possono individuare:

- ***Sistemi dinamici:*** l'acqua ricarica naturalmente il serbatoio, dove si scalda, ed è successivamente scaricata; di conseguenza il calore è ricavato dal sistema sia per conduzione che per circolazione del fluido.
- ***Sistemi statici:*** lo scambio termico avviene sono per conduzione in quanto il serbatoio non è interessato da un ricambio ingente di fluidi; ciò avviene nei sistemi a bassa entalpia ed in quelli geopressurizzati.
  La mancanza di una effettiva ricarica incide sulla rinnovabilità di tali sistemi geotermici.

2.2 UTILIZZO DELLE RISORSE GEOTERMICHE

Una risorsa geotermica può essere sfruttata in molteplici modi a seconda della temperatura del fluido coinvolto nel processo: i possibili utilizzi e gli intervalli di temperatura ai quali possono essere applicati sono raccolti nel diagramma di Lindal (1973) riportato in *Figura 2-4* (Dickson & Fanelli, 2004).

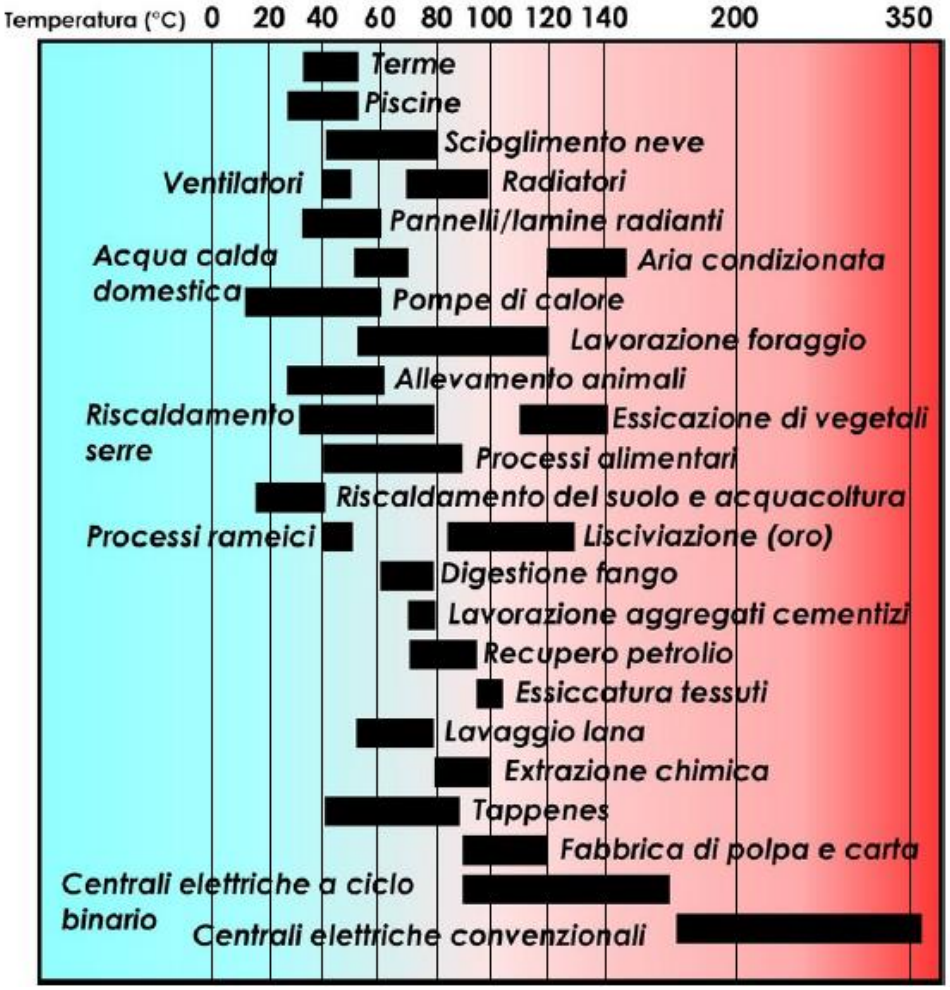

Figura 2-4: Diagramma di Lindal per l'utilizzo dei fluidi geotermici in funzione della temperatura. (Dickson & Fanelli, 2004).

I fluidi geotermici possono essere impiegati con tre metodi diversi:

- ***Utilizzo in impianti binari:*** il fluido geotermico cede calore ad un fluido secondario, scelto per il basso punto di ebollizione ed una maggiore pressione di vapore se confrontata con il vapore acqueo, il quale viene fatto lavorare in un ciclo Rankine.
  Un vantaggio degli impianti binario è che sia il fluido geotermico che quello secondario operano in cicli chiusi ovviando ad eventuali problemi di ricarica del serbatoio e di rilascio di agenti inquinanti nell'ambiente.
  Permettono inoltre di ricavare energia elettrica sfruttando fluidi geotermici alla temperatura compresa fra gli 85° e i 170° C.

- ***Utilizzo diretto:*** i fluidi geotermici vengono sfruttati direttamente per lo scopo prefissato; se la temperatura è di almeno 150°C l'energia geotermica viene utilizzata principalmente per produrre energia elettrica.
  In presenza di un sistema "ad acqua dominante" il fluido geotermico si trova nel sottosuolo allo stato liquido nonostante l'alta temperatura grazie all'alta pressione. Nel momento in cui il serbatoio geotermico viene perforato, la pressione diminuisce bruscamente e l'acqua vaporizzando, risale, come miscela di acqua e vapore, in superficie dove le due componenti vengono separate.
  Rispettivamente la prima viene re iniettata nel serbatoio mentre la seconda dopo essere stata sfruttata per muovere la turbina dell'impianto viene scaricata nell'atmosfera.
  A temperature inferiori un gran numero di processi industriali, tra cui ad esempio la lavorazione degli aggregati cementizi o della carta, sfruttano in maniera diretta i fluidi geotermici.
  Altri possibili utilizzi diretti del calore possono essere il riscaldamento e il raffreddamento di edifici singoli o interi quartieri, usi nel campo dell'agricoltura per il riscaldamento di serre e stalle o l'essiccazione di prodotti vegetali e foraggio.
  A temperature inferiori ai 50°C le acque possono essere sfruttate ad esempio nelle piscine o nelle stazioni termali oppure con l'ausilio di pompe di calore.
- ***Utilizzo a cascata:*** i fluidi geotermici vengono sfruttati più volte prima di essere rilasciati nuovamente nell'ambiente; infatti un fluido geotermico, dopo essere stato impiegato una prima volta ad alta temperatura, presenta ancora del calore residuo che può essere utilizzato da un altro impianto che opera in un intervallo di temperature più basso. In *Figura 2-5* è riportato un esempio di utilizzo a cascata dello stesso fluido geotermico, caratterizzato da una temperatura di partenza di 200°C, per sei utilizzi e quattro range di temperatura diversi.

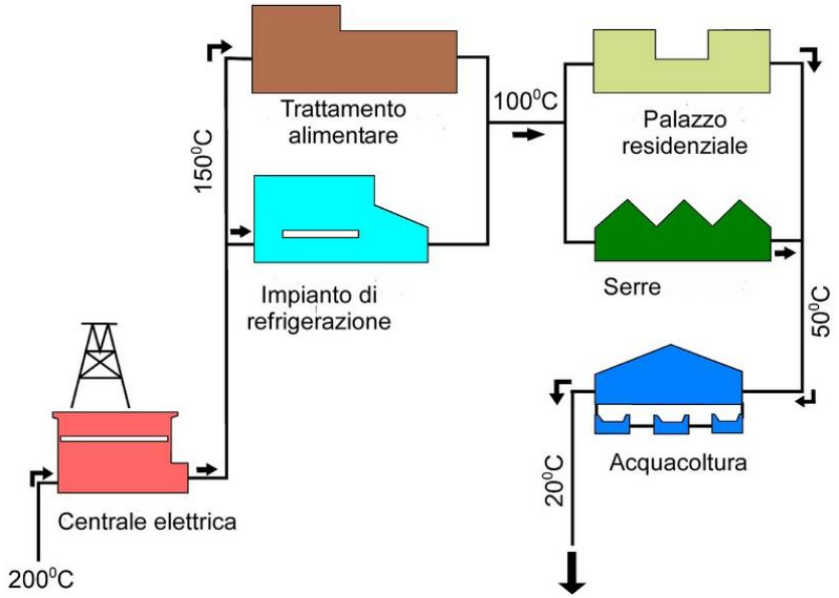

Figura 2-5: Esempio di utilizzo a cascata di un fluido geotermico (Dickson & Fanelli, 2004).

2.3 LA GEOTERMIA SUPERFICIALE

La quota alla quale si applica la distinzione fra risorse geotermiche profonde e superficiali viene comunemente fissata a 400 m di profondità: come è già stato descritto nel *Capitolo 2.1.1* la temperatura del suolo è pari approssimativamente alla temperatura media annuale fra i 15 e i 100 m e successivamente aumenta a seconda del gradiente geotermico locale.

Tale caratteristica rende il terreno stesso, a basse profondità, una fonte di calore inesauribile grazie alla sua temperatura compresa fra i 10° e i 20° C costante tutto l'anno anche in assenza di un gradiente termico superiore al normale.

La temperatura costante del terreno viene sfruttata generalmente per riscaldare o raffrescare gli edifici a seconda della stagione, infatti il terreno diviene una sorgente termica più calda dell'aria esterna durante l'inverno e più fresca nella stagione estiva.

Si possono avere due metodi diversi di utilizzo (Dickson & Fanelli, 2004):

- ***Utilizzi diretti:*** sono meno comuni degli usi indiretti, solitamente consistono nello sfruttamento del calore del terreno per preriscaldare o preraffreddare l'aria di rinnovo o l'acqua di riscaldamento o refrigeramento a seconda che sia rispettivamente inverno o estete.
  L'aria o l'acqua vengono prelevate all'esterno e incanalate all'interno di condotti interrati a bassa profondità dove, al variare della stagione si riscalda o raffresca prima di essere utilizzata; soprattutto nel caso di un impianto di condizionamento a causa delle temperature raggiunte non troppo basse servono superfici di scambio termico molto ampie.
- ***Utilizzi indiretti:*** con l'ausilio delle pompe di calore, descritte nel dettaglio in seguito, si riesce in inverno ad aumentare la temperatura del fluido utilizzato dai 10°/15° C del terreno fino ai 35°/40° utili per riscaldare gli edifici.
  Nel caso di pompe di calore reversibili esse possono essere anche utilizzate in estate per un impianto di condizionamento.

Fra gli utilizzi indiretti si possono a loro volta distinguere (Sanner, 2001):

- ***Circuiti aperti:*** quando per lo scambio termico vengono utilizzate direttamente le acque di pozzo o di falda e, successivamente, sono reimmesse nell'ambiente.
- ***Circuiti chiusi:*** viene utilizzato un fluido termovettore che circola in una tubazione a circuito chiuso e scambia il calore direttamente con il terreno.

2.3.1 La Pompa di Calore e il Ciclo Termodinamico

Una macchina termica è un dispositivo che consente di trasferire, tramite un fluido frigorigeno che circola in un circuito chiuso al suo interno, calore da una sorgente fredda ad una certa temperatura T_1 ad un ambiente, detto pozzo caldo, con una temperatura superiore T_2 attraverso l'applicazione di un lavoro meccanico L_m come schematicamente rappresentato in *Figura 2-6*.

Fornendo del lavoro è infatti possibile invertire il senso del trasferimento del calore, che naturalmente fluirebbe dal corpo più caldo verso quello più freddo, in maniera tale da sfruttare per il riscaldamento l'energia termica ricavata dal raffreddamento di una sorgente più fredda dell'ambiente da riscaldare (Rodonò & Volpes, 1998).

Nel caso l'utilizzatore adoperi il flusso termico q_1 per sottrarre calore la macchina è detta frigorifera, al contrario se viene sfruttato q_2 per generarne allora si ha a che fare con una pompa di calore.

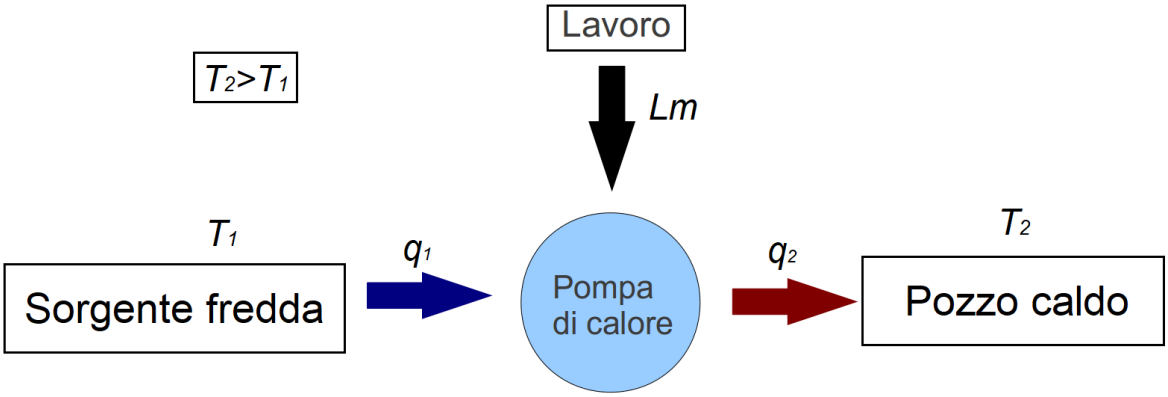

Figura 2-6: Schema del funzionamento di una pompa di calore.

Durante la stagione invernale la pompa di calore, adoperata per il riscaldamento, estrae il calore all'esterno dell'edificio e lo rilascia all'interno; le possibili sorgenti fredde possono essere il terreno o l'acqua di falda a seconda della tipologia di impianto.

Nel caso in cui la pompa di calore sia bivalente, grazie alla possibilità di inversione del ciclo con una valvola, essa può essere utilizzata anche in estate per il raffrescamento dell'edificio, aumentandone la convenienza economica; in questo caso il calore viene prelevato dall'interno dell'edificio per essere successivamente disperso all'esterno.

Il lavoro meccanico che deve essere fornito alla pompa di calore coincide con l'energia elettrica necessaria a far funzionare il compressore.
Il fluido frigorigeno è il fluido grazie al quale è consentito lo scambio termico fra le due sorgenti alle temperature idonee allo scopo.
Viene infatti sfruttato il calore di scambio durante i processi di evaporazione e di condensazione del fluido, che avvengono in condizioni di temperatura e pressione costante. Fra i fluidi frigorigeni di cui si fa uso si annoverano i derivati del metano e dell'etano in quanto le loro miscele permettono di operare in un campo di pressione ottimale e di ottenere l'evaporazione ad una temperatura intorno ad alcune decine di °C mentre, per quanto riguarda la condensazione, a temperature dell'ordine della decina di °C.

Dalla termodinamica è noto che scambiando calore fra sistemi a temperature T_1 e T_2 con $T_1>T_2$ il massimo rendimento lo si può ottenere grazie ad una macchina di Carnot, tale rendimento è dato dal rapporto fra il lavoro fornito dalla macchina e il flusso di calore ceduto

dal sistema alla temperatura maggiore come, espresso dalla seguente formula (Rodonò & Volpes, 1998):

$$\eta = \frac{L_m}{q_1} = \frac{q_1 + q_2}{q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad (2\text{-}2)$$

Ne consegue che il rendimento dipenda unicamente dalle temperature di partenza dei due sistemi e che sia maggiore per una differenza fra le due più elevata possibile.

La macchina ideale di Carnot è una macchina reversibile, è quindi possibile invertire il senso di tutte le trasformazioni: la macchina inversa, che è la macchina termica ideale che sfrutta l'energia geotermica, infatti, sottrae la quantità di calore q_1 dalla sorgente a temperatura più bassa, grazie al lavoro L_m trasferendo la quantità di calore $q_2=L_m+q_1$ al pozzo a temperatura maggiore.

In questo caso è possibile definire un indice della macchina termica ideale, detto coefficiente di prestazione o COP, dato dal rapporto fra l'effetto utile ottenuto ed il lavoro necessario ad ottenerlo, tale rapporto è l'inverso del rendimento espresso nell'*Equazione 2-2* per la macchina di Carnot (Rodonò & Volpes, 1998).
Nel caso della pompa di calore, dal momento che l'effetto utile è la fornitura di calore all'ambiente dell'edificio a temperatura maggiore, il coefficiente di prestazione è definito dalla relazione:

$$COP_{pompa\ di\ calore,ideale} = \frac{q_2}{L_m} = \frac{q_2}{|q_2| - |q_1|} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \qquad (2\text{-}3)$$

Mentre nel caso della macchina refrigerante, avendo come scopo primario la sottrazione di energia termica alla sorgente a temperatura inferiore, il COP è definito dal seguente rapporto:

$$COP_{frigorifero,ideale} = \frac{q_1}{L_m} = \frac{q_1}{|q_2| - |q_1|} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \qquad (2\text{-}4)$$

In entrambi i casi quindi minore è la differenza di temperatura fra due sorgenti, maggiore è l'efficienza, data dall'indice di prestazione, ottenibile.

Per una macchina refrigerante e per una pompa di calore nel caso reale bisogna anche tener conto delle perdite del ciclo di Carnot e dei processi irreversibili attraverso il coefficiente per l'efficienza tecnica che moltiplica il COP_{ideale} delle *Equazioni 2-3 e 2-4* come segue:

$$COP_{pompa\ di\ calore,reale} = \frac{q_2}{L_m} = \frac{q_2}{|q_2| - |q_1|} = \eta_{tech}\frac{T_2}{T_2 - T_1} \qquad (2\text{-}5)$$

$$COP_{frigorifero,reale} = \frac{q_1}{L_m} = \frac{q_1}{|q_2| - |q_1|} = \eta_{tech} \frac{T_1}{T_2 - T_1} \qquad (2\text{-}6)$$

Un valore medio del coefficiente di prestazione reale è circa il 40-70% di quello teorico e in un sistema efficiente è pari a circa 3: conseguentemente per ogni kWh di energia elettrica consumato dal compressore, 3 kWh di energia termica saranno ceduti all'ambiente da riscaldare.

La pompa di calore consiste in un circuito chiuso dove circola un fluido frigorigeno che, a seconda delle differenti pressioni e temperature può assumere lo stato di liquido o di vapore. I quattro componenti di cui è composta sono disposti come illustrato nella *Figura 2-7* e sono i seguenti (Rodonò & Volpes, 1998):

- ***Evaporatore***: è uno scambiatore di calore a piastre in acciaio inox che, assorbendo il calore dalla sorgente più fredda, fa evaporare al suo interno il fluido frigorifero.
  Al suo interno i due fluidi che scambiano calore seguono generalmente percorsi separati controcorrente.
- ***Compressore:*** è il componente che, attraverso l'energia elettrica, comprime il fluido allo stato di gas elevandone temperatura e pressione in maniera tale che condensi successivamente a temperatura maggiore.
  Possono essere volumetrici quando per aumentare la pressione si riduce il volume della camera di compressione oppure centrifughi se sfruttano la forza centrifuga esercitata sul gas da un elemento girante. Il secondo tipo è meno diffuso ed impiegato nelle pompe di calore di grande potenzialità.

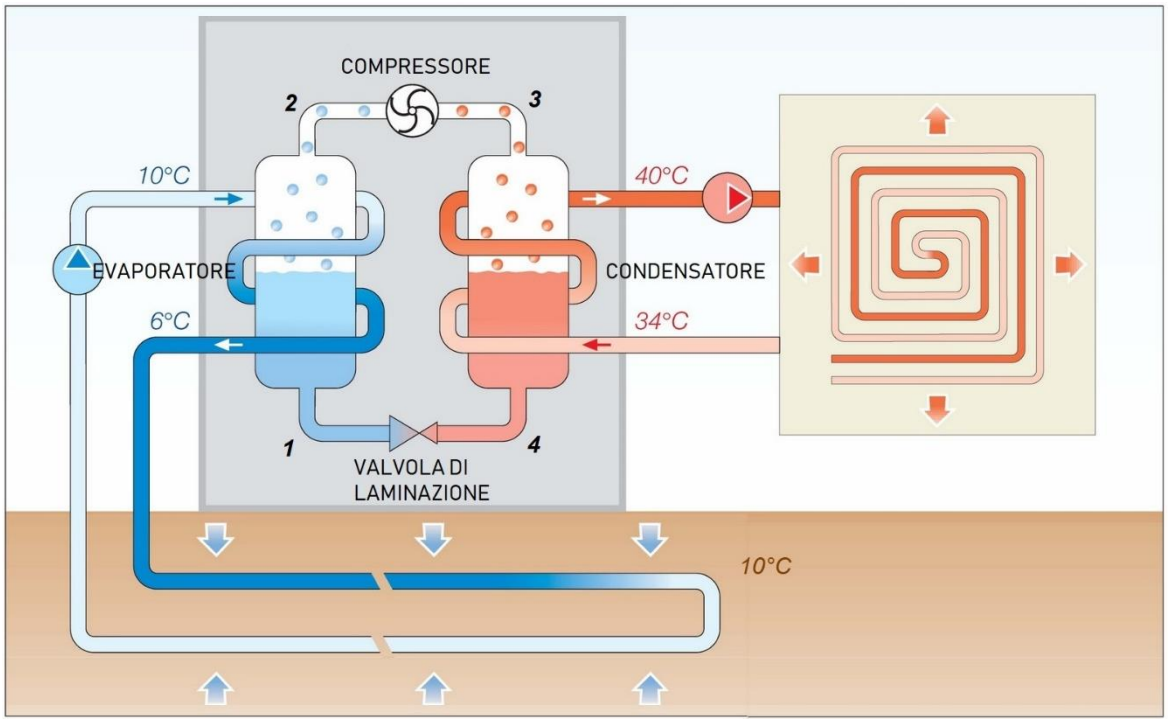

Figura 2-7: Schema dei componenti della pompa di calore (Modificata dal catalogo Caleffi).

- ***Condensatore:*** è un secondo scambiatore di calore, analogo all'evaporatore, dove il fluido frigorifero passa però nuovamente dallo stato di vapore a quello liquido cedendo il calore generato al fluido termovettore che circola nell'ambiente interno.
  Nelle macchine a ciclo invertibile al variare della stagione vengono scambiati i ruoli fra l'evaporatore ed il condensatore: il secondo ad esempio, poiché in estate dovrà assorbire calore dall'edificio per raffrescarlo, diventerà un evaporatore.
- ***Valvola di laminazione:*** è il dispositivo che abbassa la pressione e la temperatura del fluido refrigerante prima che ritorni all'evaporatore e, durante questa operazione avviene una parziale evaporazione del fluido refrigerante.
  La strozzatura data dalla valvola, che generalmente può avere diversi gradi di apertura al variare della temperatura in uscita dell'evaporatore, è necessaria a mantenere il dislivello di pressione fra i due scambiatori di calore.

Le trasformazioni che avvengono nei vari elementi della pompa di calore costituiscono il ciclo termodinamico del fluido frigorigeno. Tale ciclo è rappresentato nel diagramma di stato p-h riportato in *Figura 2-8* ed i tratti che descrivono il processo sono i seguenti:

- ***Punto 1:*** il fluido frigorigeno prima di entrare nell'evaporatore si trova nelle condizioni di temperatura e pressione minori.
- ***Tratto 1-2:*** avviene il passaggio attraverso l'evaporatore dove vi è l'accumulo di calore assorbito dalla sorgente esterna a pressione costante ed il conseguente aumento di entalpia.

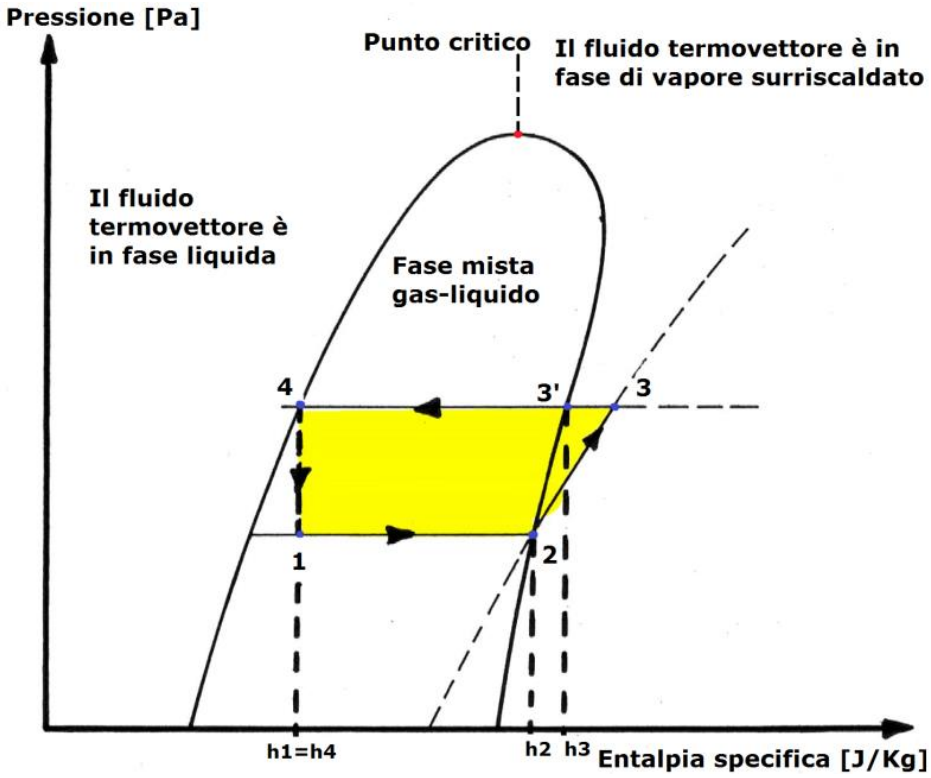

Figura 2-8: Il ciclo termodinamico del fluido termodinamico in una pompa di calore (tratta da www.energyhunters.it).

- ***Tratto 2-3:*** durante il passaggio attraverso il compressore aumenta la pressione grazie all'applicazione del lavoro dall'esterno. Se il processo è ideale ciò avviene ad entropia costante (punto 3'), in caso contrario aumenta fino al punto 3.
  La condizione del punto 3 si trova al di fuori della campana del vapore umido: si tratta quindi di vapore surriscaldato.
- ***Tratto 3-4:*** attraverso il condensatore diminuisce l'entalpia come conseguenza della cessione del calore all'edificio. Il fluido frigorigeno prima subisce un processo di desurriscaldamento, poi condensa a temperatura costante ed infine al punto 4 ritorna allo stato di liquido saturo.
- ***Tratto 4-1:*** avviene il passaggio attraverso la valvola di laminazione con conseguente diminuzione di pressione a temperatura costante, il ciclo poi si ripete.

Se il sistema è bivalente si può sfruttare il principio del *"Natural Cooling"* per il condizionamento passivo degli edifici.
Poiché durante la stagione estiva solitamente le temperature interne degli ambienti sono superiori rispetto alla temperatura del terreno o delle acque di falda, si utilizzano queste sorgenti per ridurre la temperatura degli edifici senza dover attivare necessariamente il compressore.
Il "Natural Cooling" è quindi il metodo per il raffrescamento più conveniente sul mercato dal punto di vista energetico in quanto, per funzionare efficacemente, necessita solo dell'energia elettrica consumata da una pompa che fa circolare il fluido termovettore all'interno del circuito degli scambiatori.
Data la poca differenza di temperatura, nel caso del "Natural Cooling" sono necessarie grandi superfici di scambio termico per ottenere un risultato apprezzabile.

A seconda di come il calore venga prelevato dalla sorgente fredda si differenziano i circuiti in aperti e chiusi: nel primo caso utilizzano l'acqua di falda come fluido termovettore mentre nel secondo sono accoppiati direttamente con il terreno attraverso un sistema di tubazioni al cui interno scorre un fluido termovettore che funge da passaggio intermedio nello scambio di calore fra il terreno e la macchina termica.

Il calore infine può essere ceduto dal condensatore all'ambiente o direttamente all'aria dell'edificio con l'ausilio di ventilatori oppure attraverso un altro fluido termovettore che viene fatto scorrere, ad esempio, in un sistema serpentine inserite nel pavimento.

2.3.2 Circuiti Aperti

Nei circuiti aperti la sorgente fredda viene utilizzata direttamente come fluido termovettore, tali sorgenti possono essere l'aria o l'acqua (Sanner, 2001).

Il grande vantaggio dell'aria se sfruttata come sorgente fredda è di essere disponibile ovunque, tuttavia l'indice di rendimento dalla pompa di calore diminuisce al calare della temperatura sorgente; ciò ne rende l'efficienza variabile giornalmente e fa sì che il sistema non sia particolarmente indicato per i climi freddi.

Discorso analogo può essere fatto quando vengono utilizzate come fluido termovettore le acque superficiali prelevate da bacini come mare, laghi o fiumi, infatti sono caratterizzate da temperature medie di 10-15°, ma presentano rilevanti oscillazioni stagionali.

Le acque di falda invece, grazie alla temperatura del terreno costante durante tutto l'anno per profondità inferiori ai 10-15 m, mantengono temperature costanti di 10-12° C e risultano essere molto più indicate per l'utilizzo; nel seguito si tratterà solo di questa tipologia in quanto si tratta di quelle che sfruttano l'energia geotermica superficiale.

I sistemi diretti sono fondamentalmente costituiti da un impianto di prelievo che attinge all'acqua di falda tramite uno o più pozzi ed uno di scarico che la reimmette o direttamente in falda oppure attraverso uno scarico superficiale, collegati direttamente alla pompa di calore o tramite un circuito secondario ed uno scambiatore come illustrato nella *Figura 2-9*. L'utilizzo di un circuito secondario esclude dalle problematiche legate incrostazioni e corrosione per agenti inquinanti o acque salmastre, la pompa di calore, le quali generalmente sono le più complicate ed onerose.

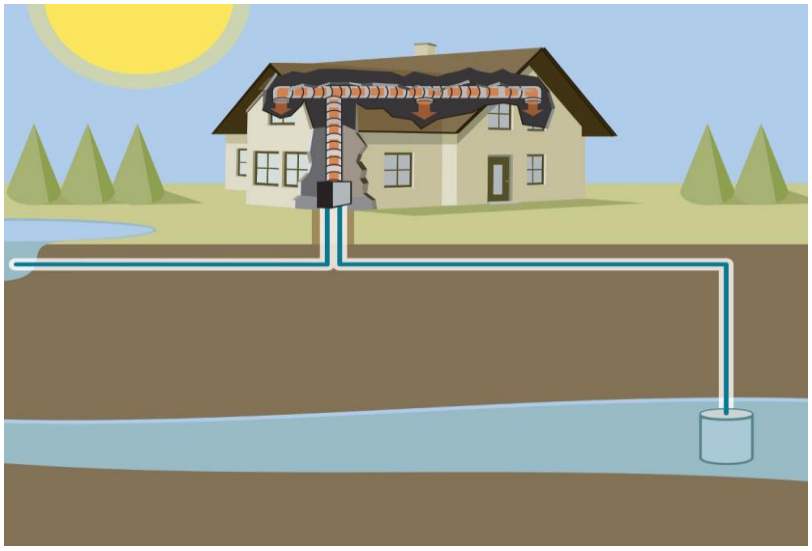

Figura 2-9: Esempio di un circuito aperto che estrare l'acqua dalla falda e la scarica in superficie (tratto da www.ecoseven.net).

L'impianto di prelievo e quello di scarico devono garantire la medesima portata a livello della falda, è consigliabile realizzare la reimmissione a valle dell'area di prelievo per scongiurare eventuali problemi di influenza termica del sistema.

Per la movimentazione dell'acqua sono necessarie alcune pompe idrauliche, il cui consumo in termini di energia elettrica costituisce una quota significativa del consumo globale dell'impianto, tuttavia per profondità di falda non elevate un sistema a circuito aperto risulta essere generalmente più efficiente rispetto ad uno chiuso.
La differenza è dovuta al fatto che è ridotto al minimo il numero degli scambi di calore che hanno luogo nell'impianto in quanto l'acqua raggiunge direttamente la pompa di calore.

Tuttavia i fattori che limitano lo sviluppo dei sistemi aperti sono legati ai maggiori costi di manutenzione in quanto, essendoci diretto contatto con l'ambiente, vanno tenute sotto controllo incrostazioni e intromissioni di organismi nel sistema, come ad esempio alghe, attraverso filtri che vanno regolarmente tenuti puliti.

Dal punto di vista ambientale le variazioni termiche indotte nella falda ne possono modificare la composizione chimica, cambiandone la capacità dissoluzione dei minerali con cui è a contatto, e possono influenzare la vita dei microorganismi presenti del sottosuolo.
Infine, poiché il livello di falda può essere instabile, non è garantita la costanza e l'inesauribilità della sorgente energetica come invece avviene per i circuiti chiusi.

2.3.3 Circuiti Chiusi

I circuiti chiusi sono i sistemi che sfruttano l'energia geotermica del terreno più diffusi.
Si avvalgono di un fluido termovettore che circola all'interno di una tubazione chiusa a contatto con il terreno che fa sì che questo venga riscaldato o raffreddato, al variare della stagione, prima di essere utilizzato dalla pompa di calore (Sanner, 2001).
Il fluido termovettore utilizzato all'interno del circuito chiuso è generalmente acqua oppure sempre acqua ma con l'aggiunta di un antigelo.
Una volta che il fluido ha scambiato calore con la pompa il ciclo si ripete e ritorna a contatto con il terreno.

Il circuito chiuso intermedio che porta il calore dal terreno alla pompa di calore può essere di diverse tipologie a seconda delle caratteristiche geologiche ed idrogeologiche del terreno e dello spazio a disposizione nei dintorni dell'edificio.
Principalmente possono essere classificate in quattro tipologie, riportate in *Figura 2-10*, e, a partire sinistra verso destra, vi sono:

- ***Pilastri energetici:*** Sono così definite le geostrutture che fungono da fondamenta dell'edificio in questione e sono inoltre equipaggiate con scambiatori di calore collegati con la pompa di calore della costruzione che sostengono.
  Nel caso dei pali sono installati dei tubi in polietilene ad U in numero variabile a seconda del suo diametro.
- ***Collettori geotermici orizzontali:*** sono un sistema di tubazioni interrato con un andamento solitamente a serpentina, simile a quello dei pavimenti radianti, ad una profondità di circa 1,5-3 m o almeno al di sotto del limite di congelamento del terreno che, oltre al calore naturale del terreno, utilizza soprattutto il flusso termico proveniente dalla superficie, determinato in modo indiretto dall'energia solare.
  Non vanno poste sotto edifici né al di sotto di aree impermeabilizzate e occupano un'area proporzionale al flusso di calore richiesto che deve essere maggiorato nel caso di utilizzo anche estivo del sistema.
  Sono tipicamente realizzati in polietilene, polibutilene o rame e, vista la maggiore raggiungibilità del circuito, sono soggette a minori costi di manutenzione.
  Sono generalmente più convenienti in termini di costi rispetto alle sonde verticali,

tuttavia data la scarsa profondità subiscono una maggiore influenza delle variazioni di temperatura stagionali e giornaliere; In particolare le alte temperature raggiunte dal terreno in estate rendono più difficoltoso il "Natural Cooling".
Sempre utilizzando collettori orizzontali si può scegliere se istallarli in un bacino adiacente l'edificio che sfrutta la pompa di calore, anche in questo caso tuttavia vi sarà un'alta variabilità stagionale delle temperature.

- ***Sonde geotermiche verticali:*** sono generalmente installate nel terreno a una profondità fino a 150 m. Ogni sonda geotermica è costituita dalle tubazioni, dal piede e dal materiale di riempimento.
  Le tubazioni sono realizzati in polietilene o polibutilene disposti a U per creare un percorso chiuso e, data la profondità raggiunta dalle sonde, non sono necessarie serpentine per offrire abbastanza superficie di contatto per lo scambio termico.
  Il piede deve garantire che non vi siano eccessive perdite di carico nella sezione ad U conclusiva delle tubazioni, nonché fornire un'adeguata zavorratura al sistema.
  Le sonde sono progettate per non richiedere nessun tipo di manutenzione durante la loro vita utile e, a differenza dei pilastri energetici, possono essere realizzate anche in seguito alla costruzione dell'edificio.
  Durante lo scavo possono insorgere problemi legati alla messa in contatto della falda superficiale e profonda che si trovano in condizioni di pressione diverse.
  Infine il numero di sonde e relative perforazioni dipende dal flusso termico che si vuole ottenere, tale flusso a differenza dei collettori superficiali è da considerarsi una sorgente di calore costante ed inesauribile grazie alle maggiori profondità interessate.

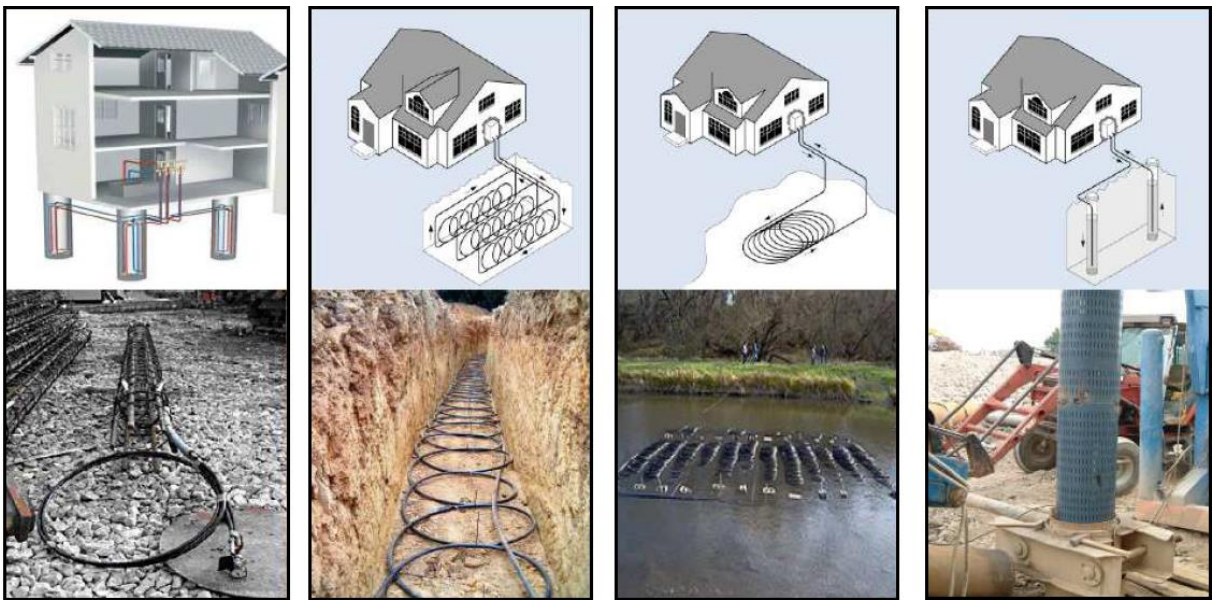

Figura 2-10: A partire da sinistra sono riportati una schematizzazione ed il relativo esempio di: pilastri energetici, sonde orizzontali interrate, sonde orizzontali che sfruttano l'acqua di un bacino e infine delle sonde verticali. (modificata da www.geologilazio.it)

2.4 LE GEOSTRUTTURE ENERGETICHE

Le geostrutture energetiche sono un metodo di sfruttamento dell'energia geotermica superficiale dove agli elementi costruttivi di un'opera geotecnica, come ad esempio una fondazione o una galleria, sono accoppiati sistemi chiusi in grado di assorbire il calore dal terreno con cui sono a contatto e di trasferirlo alla relativa pompa di calore grazie alla quale verrà successivamente utilizzato.

A differenza delle sonde geotermiche verticali le geostrutture energetiche devono essere integrate al momento della costruzione, tuttavia, al pari delle sonde, possono essere utilizzate sempre.
Ciò comporta una notevole riduzione, fino all'80%, delle emissioni di anidride carbonica prodotta per riscaldare e raffrescare gli edifici o ottenere acqua calda, che altrimenti si otterrebbero dal consumo di combustibili fossili.
Al fronte di questo risparmio l'equipaggiamento di strutture geotecniche con tubature per lo scambio di calore è legato a costi aggiuntivi comparativamente contenuti, quindi, come ad esempio nel caso di riscaldamento domestico, i costi d'investimento sono maggiori rispetto a quelli per un classico riscaldamento a gasolio o a gas, tuttavia i costi di esercizio rendono le geostrutture energetiche più redditizie a lungo termine, data anche la loro elevata durata di vita, oltre che più rispettose dell'ambiente.

Per sfruttare appieno le potenzialità delle geostrutture energetiche è necessario che la pompa di calore accoppiata sia istallata in un edificio che grazie ad un buon isolamento abbia un ridotto consumo di calore al metro quadro.
Un altro notevole vantaggio consiste nel fatto che non sia necessario né spazio né scavi aggiuntivi per istallare il sistema di tubazioni in quanto sono inserite all'interno di componenti costruttive già previste.

Nel seguito saranno analizzati nello specifico le due tipologie di geostrutture energetiche più utilizzate: i pali energetici ed i tunnel energetici; in particolare della seconda tipologia si porrà l'accento sul concio energetico Enertun, progettato dal Politecnico di Torino.

2.4.1 I Pali Energetici

I pali sono una tipologia di fondazione profonda in calcestruzzo armato che è utilizzata quando la soluzione ottenuta attraverso fondazioni superficiali si rivela inadeguata.

Le fondazioni profonde o indirette sono definite tali quando raggiungono profondità considerevoli rispetto al piano campagna, in particolare convenzionalmente sono identificate come profonde se il piano di posa è collocato a più di quattro volte la misura minore della dimensione di base della costruzione (Lancellotta & Calavera, 1999).
Si tratta di opere più complesse e dispendiose ma necessarie quando vi è:

- ***Necessità di trasferire il carico:*** quando vi sono strati superficiali scadenti, attraverso i pali, vengono raggiunti strati profondi più resistenti oppure, in loro assenza, il carico è distribuito grazie alla portanza laterale dalle tensioni di aderenza che si sviluppano

sulla superficie laterale del palo.
Può essere un'operazione necessaria anche nel caso si voglia trasferire il carico ad un livello inferiore rispetto ad un futuro piano di scavo.

- ***Necessità di resistere a carichi non verticali:*** come ad esempio forze di trazione, forze orizzontali e inclinate
- ***Necessità di garantire la stabilità anche in seguito a scalzamento:*** come ad esempio nelle pile dei ponti l'utilizzo dei pali fa sì che la statica del ponte non sia influenzata da eventuali abbassamenti del letto del fiume.

I pali energetici sono generalmente caratterizzati da un diametro che varia da 0,4 m a 1,5 m e una lunghezza che può raggiungere anche i 30 m a seconda delle condizioni geologiche del sito; mentre per quanto riguarda la spaziatura, a seconda dei casi, va dai 3 a 10 m.

Si parla di pali energetici quando vengono equipaggiati al loro interno dei tubi in polietilene, in modo simile a quanto accade per le sonde geotermiche verticali inserite nei pozzi trivellati, in maniera tale che alla funzione di fondazione si aggiunga la capacità di raccogliere il calore dal terreno con cui sono a contatto.
I tubi con cui avviene lo scambio termico, il cui numero dipende dal flusso di calore richiesto e dal diametro del palo sono fissati all'interno dell'armatura tramite elementi di fissaggio o fascette in quanto devono rimanere distanziati omogeneamente tra di loro per tutta la lunghezza del palo al fine di evitare interferenze reciproche.

In *Figura 2-11* sono riportati alcuni esempi di armature con già istallati internamente i tubi ad U, in particolare a destra l'armatura è già stata posizionata nello scavo ed è stato già colato il calcestruzzo.

Figura 2-11: Esempi di armature con fissati al loro interno i tubi in polietilene preparate per i pali energetici, a destra le armature sono istallate già nel calcestruzzo per creare il palo (tratta da www.setaprogetti.it)

I pali di fondazione possono essere istallati con tre metodi costruttivi differenti (Lancellotta & Calavera, 1999):

- **Pali trivellati:** un involucro cavo provvisorio è spinto nel terreno e lo spazio al suo interno è successivamente scavato con una trivella. Infine è inserita l'armatura con i tubi già fissati ed il calcestruzzo è riversato all'interno dell'involucro prima che venga rimosso.
- **Pali ruotati:** dei pali prefabbricati cavi di piccole dimensioni, circa 20-30 cm di diametro vengono spinti a forza nel terreno. A questo punto, prima che vengano riempiti con cemento o con sabbia bagnata oppure ghiaia di piccola pezzatura, sono inserite due coppie di tubi a U.
- **Pali a trivellazione continua:** non viene usato nessun involucro ma si utilizza una trivella con una cavità; raggiunta la profondità richiesta si estrae la trivella che, nel frattempo, attraverso la cavità pompa il calcestruzzo nello scavo. Subito dopo viene inserito nel cemento fresco la gabbia di armatura accoppiata ai tubi.

Nel sistema di tubi inserito nei pali circola un fluido termovettore, in genere si tratta di acqua ma può essere anche aggiunto del glicole con la funzione di antigelo, attraverso il quale viene trasferito il calore assorbito dagli stessi pali alla pompa di calore.

Al di sotto della platea di fondazione è istallato un sistema di tubi orizzontale che porta ad un distributore che raccorda i flussi provenienti dai diversi pali in uno unico diretto alla pompa di calore. Discorso analogo per il fluido uscente dalla macchina termica che viene diviso nei vari pali da un altro distributore, come è illustrato nella *Figura 2-12.*
Se durante il passaggio all'interno di un singolo palo si osserva in fase di progettazione che non viene assorbito abbastanza calore i pali saranno connessi in serie in maniera tale che il fluido termovettore, percorrendo un percorso maggiore, riesca a riscaldarsi a sufficienza prima di raggiungere il distributore.

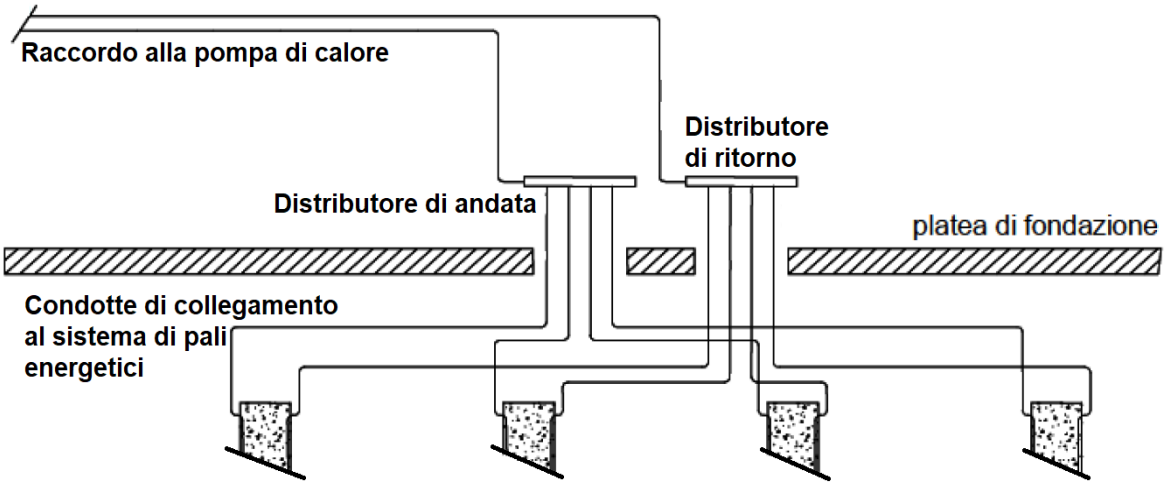

Figura 2-12: Rappresentazione schematica di un sistema di pali energetici raccordato con la pompa di calore.

Durante la stagione invernale a causa del continuo assorbimento di calore da parte dei pali vi è un progressivo raffreddamento del terreno con conseguente diminuzione di efficienza del sistema; per far fronte a questa problematica l'ideale è accoppiare alla geostruttura energetica un sistema bivalente che, quando opera come condizionatore durante la stagione estiva, riscaldi a sufficienza il terreno per superare l'inverno.

Nel caso il livello di falda interessi i pali e vi sia un sufficiente flusso d'acqua nel loro intorno il problema non si pone perché ciò favorisce una rigenerazione termica naturale del terreno.

Inoltre, sempre per favorire la ricarica termica del terreno, si tende, per quanto possibile, a disporre i pali energetici nelle aree influenzate maggiormente dall'irraggiamento solare.

2.4.2 I tunnel Energetici

I tunnel energetici sono delle geostrutture che assorbono il calore del terreno attraverso un sistema di tubi inseriti all'interno del rivestimento, come si può osservare nella *Figura 2-13,* per sfruttarlo successivamente negli edifici adiacenti tramite la tecnologia delle pompe di calore.

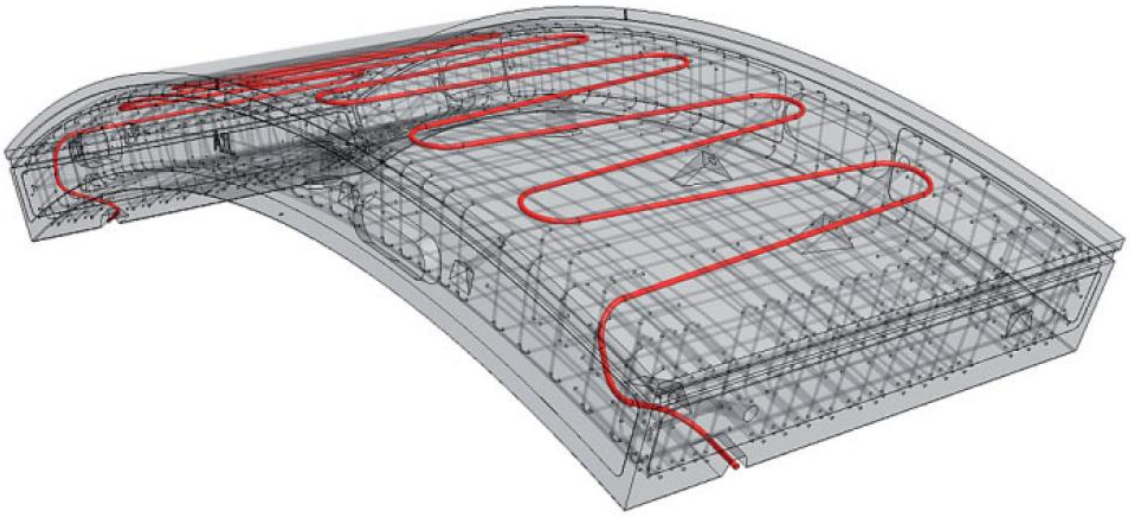

Figura 2-13: Esempio di un concio energetico con in evidenza l'armatuta e il tubo in polietilene (Frodl et al.,2010).

Le gallerie maggiormente indicate per lo sfruttamento della geotermia superficiale sono quelle costruite con le seguenti tecnologie (Unterberger et al., s.d.):

- ***"Cut and Cover" tunnel:*** sono inizialmente inseriti dei diaframmi ai lati del futuro scavo e, una volta eseguito, viene istallato il tunnel e lo spazio rimanente fra di essi è successivamente riempito.
  In questo caso solitamente il sistema chiuso di tubazioni è inserito nella galleria ma vi è anche la possibilità istallarlo negli ancoraggi dei diaframmi.

Trattandosi solitamente di tunnel che si sviluppano ad una profondità massima di circa 20-25 m e dato che la presenza dei diaframmi abbassa il livello di falda bisogna valutare se il flusso di calore che si riesce a estrarre sia sufficientemente elevato per essere utilizzato anche a lungo termine.
Nel caso non lo sia la soluzione ideale consiste nell'utilizzare un sistema bivalente che in estate riscaldi nuovamente il suolo.

- ***Galleria naturale:*** si tratta di tunnel situati ad una profondità maggiore dei precedenti e solitamente in condizioni di terreno saturo quindi non presentano problematiche di perdita dell'efficienza a lungo termine.
  Sono solitamente scavati con l'ausilio di una TBM ed il sistema di tubi è istallato esclusivamente nel rivestimento.

Il sistema di tubi è fissato all'interno dell'armatura con delle fascette, come si può osservare nella *Figura 2-14,* a comporre serpentina in maniera tale da sfruttare al meglio la superficie di terreno con cui è a contatto.
Ogni tubo è in polietilene con un diametro di 20-30 mm e una spaziatura fra i 25 e i 30 cm.
Solitamente il sistema non viene direttamente fissato nella galleria con un geotessuto e successivamente cementato ma vengono costruiti dei conci prefabbricati che, una volta istallati durante lo scavo dalla TBM, compongono gli anelli del rivestimento.
In questo caso ricopre una particolare importanza la connessione fra i diversi conci in quanto i diversi tubi devono essere collegati per creare la serpentina.

Figura 2-14: Esempi di gabbie di armatura di conci energetici prima della colata di cemento (tratti da www.rehau.co.uk).

A seconda della temperatura interna alla galleria si possono distinguere due tipologie di tunnel con conseguenti applicazioni diverse (Nicholson et al., 2016):

- ***Tunnel caldi:*** quando la temperatura dell'aria interna è maggiore di quella del terreno; ciò è dovuto al calore generato dal motore, dai sistemi frenanti e di condizionamento dei mezzi di trasporto che transitano al loro interno.
  Ciò può accadere in tratti di gallerie ferroviarie o stradali lunghi e profondi, un esempio è la metropolitana di Londra dove, nonostante il terreno indisturbato abbia

una temperatura media di 14° C, l'aria delle gallerie ha raggiunto in alcuni tratti i 30°C a causa dell'impossibilità del terreno di assorbire tutto il calore prodotto.
In questo caso è molto più conveniente sfruttare l'aria interna della galleria piuttosto che il terreno e lo si fa disponendo la serpentina di tubi assorbenti sul lato interno del rivestimento.
Tale sfruttamento ha un duplice effetto positivo: oltre al calore assorbito che può essere impiegato per la produzione di acqua calda e per il riscaldamento degli edifici soprastanti, si ottiene una diminuzione di temperatura della galleria che permette di risparmiare sul condizionamento dei treni. Tuttavia durante la stagione estiva non può essere invertito il ciclo con un sistema bivalente in quanto comporterebbe un riscaldamento eccessivo dell'aria interna alla galleria.

- ***Tunnel freddi:*** quando la temperatura dell'aria interna alla galleria ha un valore simile a quella circostante come nel caso di tunnel brevi.
  Nel caso corrente è preferibile assorbire il calore direttamente dal terreno posizionando la serpentina sul lato esterno del rivestimento.
  Vi è la possibilità quindi di sfruttare impianti bivalenti per il riscaldamento invernale e il raffrescamento estivo degli edifici collegati.

A titolo di esempio è riportato in *Figura 2-15* un sistema geotermico situato nella città di Jenbach in Austria. È applicato ad un tunnel di 12 m di diametro e profondo 27 m ed è composto da un insieme di 27 anelli composti da 7 conci prefabbricati larghi 2 m e spessi 0,5 m e una chiave di volta per una lunghezza totale del sistema di 54 m.
Ogni anello è caratterizzato da una serpentina lunga in totale 175 m e il sistema è in grado di generare 40 kW di calore per gli edifici comunali soprastanti.
Si può osservare come gli anelli siano collegati a coppie per formare un piccolo circuito dove il fluido termovettore prima di ritornare al distributore dove è riunito ai flussi provenienti dagli altri piccoli circuiti prima di essere indirizzato alla pompa di calore.

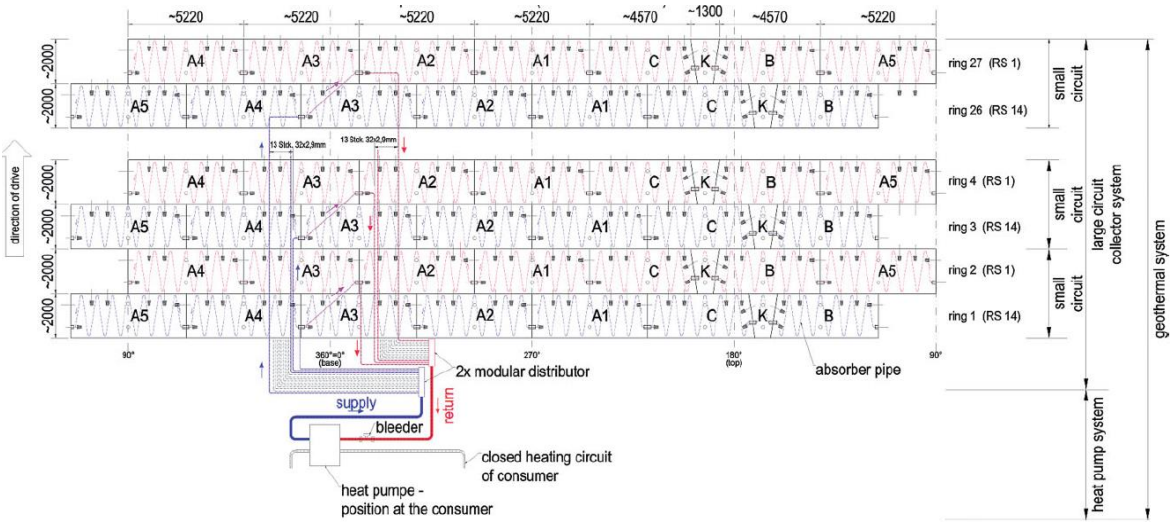

Figura 2-15: Pianta del sistema geotermico di Jenbach in Austria (Frodl et al.,2010).

Per quanto riguarda le gallerie in tradizionale quando non sono utilizzati conci prefabbricati il sistema di tubi viene fissato solitamente all'interno dell'arco fra il rivestimento provvisorio composto da un getto di shotcrete e quello definitivo (Unterberger et al., s.d.).

La serpentina può essere fissata all'armatura con delle fascette come precedentemente illustrato oppure, sfruttando la tecnologia "Energy Fleece", inserita all'interno di un tessuto sintetico già con la geometria prescelta che ne semplifica il montaggio e lo stendimento permettendole di essere direttamente applicata lungo il perimetro della galleria sul rivestimento provvisorio. I primi esperimenti riguardanti il montaggio, la praticità e l'efficienza sono stati effettuati in un campo di prova nel Tunnel Lainzer a Vienna come si può osservare in *Figura 2-16.*

Un esempio di tale utilizzo invece lo si può trovare nelle gallerie della stazione U2/2 Taborstraβe situata a Vienna dove gli archi sono equipaggiati con un sistema di assorbimento di calore direttamente sul rivestimento provvisorio.

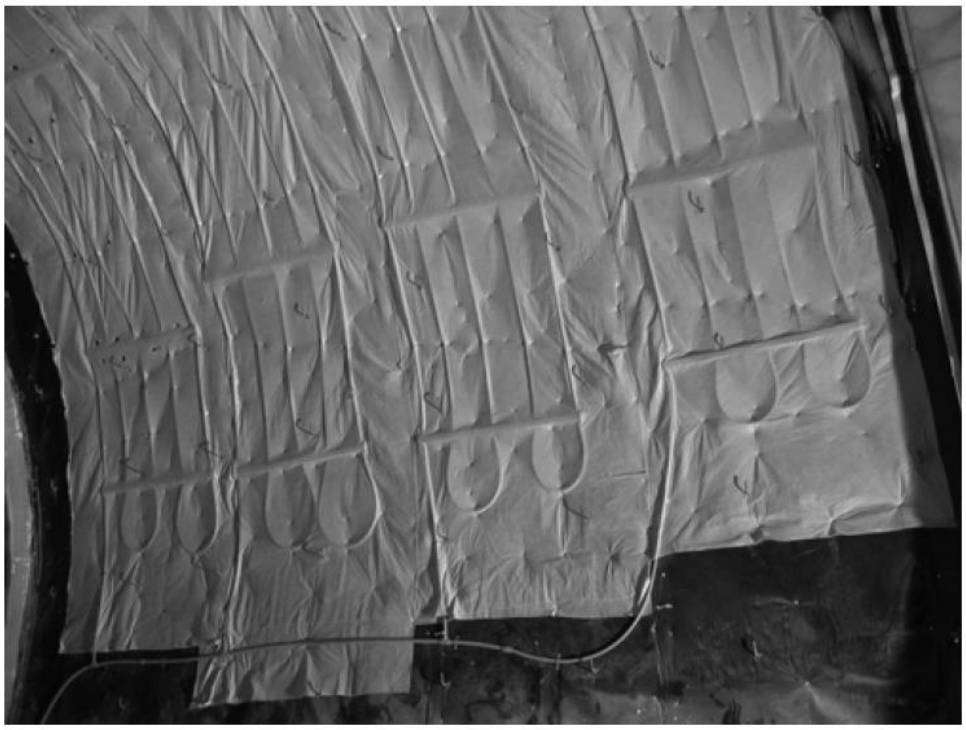

Figura 2-16: Posa del sistema di tubi con la tecnologia "Energy Fleece" all'interno dell'impianto di prova del Tunnel Lainzer a Vienna (Unterberger et al., s.d.).

2.4.3 Un esempio di Concio Energetico: Enertun

Al Politecnico di Torino è stata sviluppata una nuova tipologia di concio energetico, chiamato Enertun, il quale, grazie alla sua conformazione, riduce le perdite di carico ed aumenta l'efficienza di scambio termico (Barla & Di Donna, 2016).

Come si può notare in *Figura 2-17,* il concio Enertun sulla destra si differenzia da un concio energetico classico per la disposizione della serpentina dei tubi dove scorre il fluido termovettore che si sviluppa nella direzione principale dell'elemento strutturale.
Al variare delle condizioni geotecniche del terreno e delle caratteristiche geometriche della galleria dove saranno istallati, i conci hanno uno spessore di 30-50 cm e sono generalmente in calcestruzzo armato.
La rete di tubi, anche in questo caso, è composta in polietilene reticolato ad alta densità, il diametro esterno dei tubi può variare da 15 a 35 mm mentre lo spessore da 1,5 a 3 mm. La rete di tubi è posizionata a una distanza variabile fra 5 e 15 cm dalla superficie dalla quale dovrà assorbire o cedere il calore.
Infine i tratti lineari della serpentina hanno una spaziatura costante che può variare da 20 a 40 cm ed il numero di tratti che può essere da un minimo di 3 fino a un massimo di 7 dipende, oltre che dalla spaziatura, anche dalla larghezza del concio.

Figura 2-17: Sulla sinistra un concio classico confrontato con un concio Enertun sulla destra (Barla & Di Donna, 2016).

Sia il concio che la serpentina di tubi possono essere costruiti con materiali diversi da quelli citati purché abbiano le caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche adatte allo scopo e non minino all'efficienza globale del sistema.

La disposizione differente delle sonde geotermiche permette un miglioramento dell'efficienza di scambio termico che varia tra il 5% e il 10% rispetto ad un concio classico per configurazioni geometriche e costruttive analoghe.
Anche le perdite di carico, poiché il fluido termovettore nel percorso all'interno del concio deve percorrere un numero inferiore di curve, subiscono una diminuzione compresa fra il

20% e il 30% con la conseguente diminuzione dell'energia necessaria al pompaggio.

A seconda delle variazioni di temperatura dell'aria interna alla galleria vi sono tre differenti configurazioni possibili del concio Enertun:

- ***Concio "Enertun "Ground":*** La serpentina è disposta in prossimità dell'estradosso esterno, come si può osservare in *Figura 2-18* in maniera tale che il fluido frigorigeno assorba il calore principalmente dal terreno adiacente il rivestimento.
  Tale configurazione è utilizzata in presenza di gallerie fredde e di conseguenza può essere sfruttata sia per riscaldamento invernale che per il raffrescamento estivo dei palazzi adiacenti.

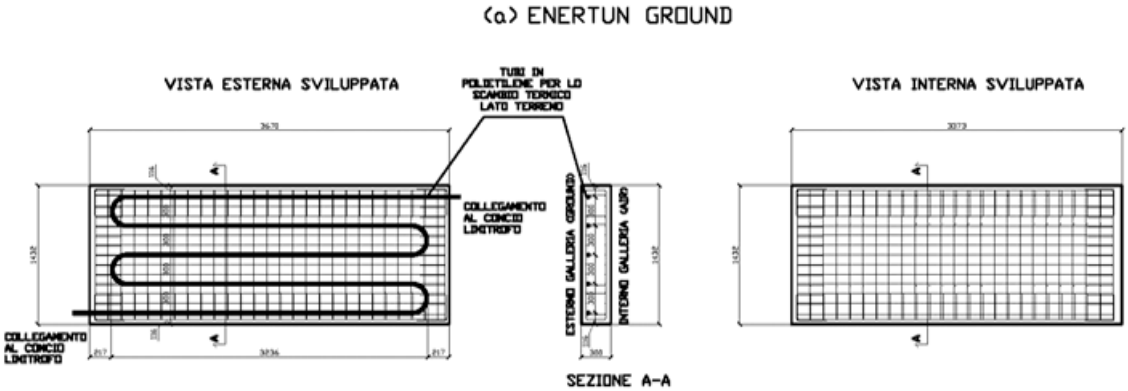

Figura 2-18: Configurazione di un concio "Enertun Ground" (Barla & Di Donna, 2016).

- ***Concio "Enertun Air":*** La serpentina in questo caso è posizionata a ridosso dell'intradosso interno così che il fluido frigorigeno assorba il calore principalmente dall'aria interna della galleria.
  L'utilizzo di tale concio, riportato in *Figura 2-19,* è preferibile per condizioni di galleria calda e di conseguenza non può essere impiegato per il raffrescamento delle abitazioni soprastanti; ha tuttavia il vantaggio di contribuire al condizionamento dei tunnel.

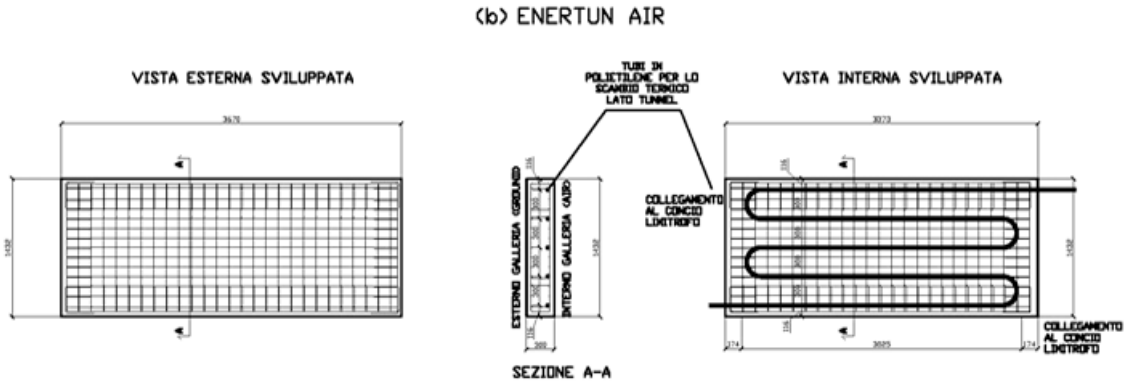

Figura 2-19: Configurazione di un concio "Enertun Air" (Barla & Di Donna, 2016).

- ***Concio "Enertun Ground&Air":*** All'interno del concio sono istallate due serpentine differenti una nell'intradosso e una nell'estradosso, come osservabile in *Figura 2-20,* in maniera tale che il calore possa essere scambiato sia con il terreno che con l'aria interna della galleria.
  Ciò lo rende la tipologia di concio più versatile e quindi universalmente utilizzabile.

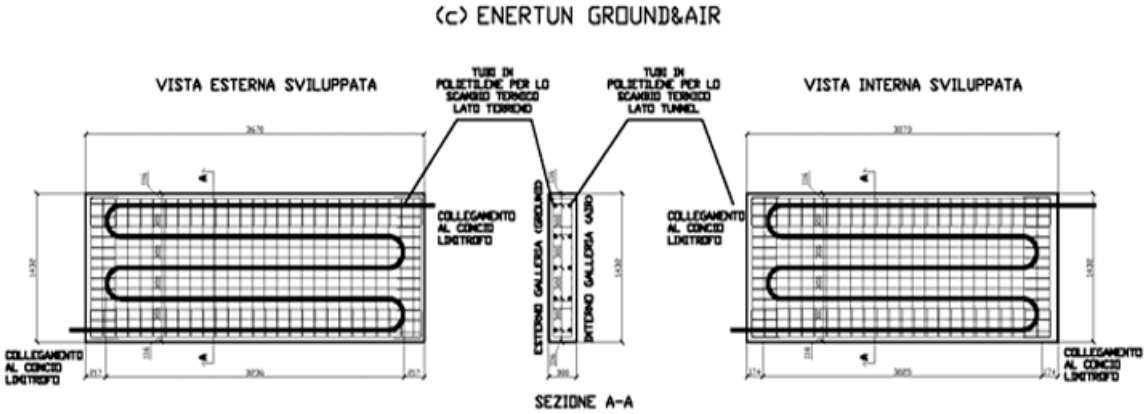

Figura 2-20: Configurazione di un concio "Enertun Ground&Air" (Barla & Di Donna, 2016).

La più vantaggiosa applicazione del concio energetico Enertun è quindi la costruzione di tunnel in ambito urbano, come ad esempio nelle metropolitane, per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici soprastanti.
In occasione di gallerie profonde o extraurbane vi è la problematica data dalla maggiore distanza dell'utilizzatore dal luogo di estrazione del calore che incide sulla convenienza, può essere tuttavia utile principalmente per abbattere i costi di ventilazione forzata dei tunnel.

In conclusione quindi l'istallazione di un rivestimento composto da conci energetici si rivela sempre vantaggioso in quanto generalmente l'attivazione della galleria non incide di più dell'1% sul costo totale della costruzione.

3 METODOLOGIE PER IL DE-ICING

3.1 METODI DI DE-ICING CLASSICI

La formazione di una patina di ghiaccio e l'accumulo di neve sul manto stradale sono problematiche sia dal punto di vista della sicurezza dei guidatori che dei costi di manutenzione delle pavimentazioni danneggiate dai cicli gelo-disgelo (Mauro & Grossman 2017). Spesso lo strato di ghiaccio è infatti sottile e trasparente e prende il nome di "ghiaccio nero", dal colore dell'asfalto sottostante, a causa della quasi totale assenza di aria al suo interno, ciò lo rende particolarmente pericoloso in quanto non è facilmente individuabile (In *Figura 3-1* è riportato un esempio di ghiaccio poco visibile sulla carreggiata).
In aggiunta condizioni pericolose dovute al ghiaccio possono portare da ritardi ed ingorghi durante i tragitti fino alla chiusura delle strade stesse e delle attività da esse collegate con il conseguente danno economico più o meno ingente al variare delle gravità delle condizioni atmosferiche (Esempio in *Figura 3-1* sulla destra).

Figura 3-1: Sulla sinistra un particolare di una strada ghiacciata mentre sulla destra un esempio di ingorgo causato dalle abbondanti precipitazioni nevose del 2013 in Long Island (USA).

Particolarmente suscettibili alla citata problematica sono le strutture elevate, come ad esempio i ponti ed i viadotti, in quanto tendono a raffreddarsi più velocemente rispetto alle

strade ordinarie a causa del movimento dell'aria al di sotto dell'impalcato che ha temperature di molto inferiori rispetto al più termicamente stabile terreno.
Spesso può capitare infatti che tali strutture ghiaccino prima delle strade adiacenti creando così un pericolo improvviso per gli utilizzatori.

Per far fronte alle strade ghiacciate, durante l'inverso, vengono spesi ogni anno milioni di euro dalle istituzioni pubbliche e private nelle tecniche più comuni di de-icing che consistono in genere nella dispersione di sale o altri prodotti chimici, di abrasivi come la sabbia e nella rimozione del manto nevoso con mezzi meccanici.

Oltre alla posizione geografica, all'intensità delle precipitazioni e al costo la temperatura della pavimentazione è un parametro chiave da considerare quando si sceglie la tipologia e la cadenza degli interventi atti a rimuovere il ghiaccio e la neve dalle strade durante le precipitazioni invernali.
Condizioni di freddo estremo limitano sia l'efficacia del trattamento con agenti chimici che vanno di conseguenza utilizzati in quantità maggiore sia aumentano l'incidenza dei guasti nei macchinari ed il costo delle attrezzature necessarie.

Ci sono numerose variabili che influenzano le condizioni stradali quando le temperature ambientali e della superficie del manto stradale scendono al di sotto di 0° C cosi come le diverse strategie da utilizzare per mantenerle sghiacciate; le più importanti sono elencate nel seguito (Akin et al., 2013):

- ***Livello di servizio (LOS):*** Indica a priori quanto sia importante o critica una determinata strada per gli utilizzatori e quale sia l'obbiettivo minimo di fruibilità che deve essere garantito dall'ente che la mantiene. Il fattore maggiore per la determinazione del LOS è l'ammontare del traffico, solitamente quindi maggiore è il numero di veicoli maggiore è il LOS. Di conseguenza un valore di livello di servizio basso è assegnato alle strade rurali dove le probabilità di incidenti ed il trasporto merci è minore in quanto minore è il numero di veicoli che le percorrono e l'eventuale chiusura interesserebbe un numero minore di persone.
- ***Previsioni metereologiche:*** La capacità di prevedere l'arrivo e l'entità di una perturbazione permette di pianificare adeguatamente gli interventi da parte degli enti preposti; le informazioni più importanti sono la temperatura all'inizio dell'evento, la sua durata, l'eventuale presenza di vento, le temperature più basse ed il volume di neve previsti.
  Per esempio nel caso di una strada asciutta la neve tenderà ad essere soffiata via dalla superficie mentre nel caso di manto bagnato si incollerà col rischio di successive gelate: la conoscenza a priori di tale condizione permette una risposta adeguata.
- ***Vento e turbolenze dei veicoli:*** Nel caso di temperature particolarmente rigide il grado di umidità nella neve è molto basso con la conseguente difficoltà ad attecchire al manto stradale; quando accade la presenza di vento o semplicemente lo spostamento d'aria dovuto al passaggio dei veicoli aiuta a dissipare la neve.
  Tuttavia ciò si accompagna ad una diminuzione di visibilità dovuta alla neve sollevata dalle correnti d'aria.

- ***Strategie preventive e reattive:*** Per quanto riguarda le strategie preventive, va notato che, quando i prodotti chimici per il de-icing a causa delle basse temperature rimangono congelati sul manto stradale, vi è comunque un recupero delle condizioni di operatività della strada più veloce alla fine dell'evento nevoso. Di conseguenza trattare la superficie prima della precipitazione può bastare anche solo per permettere uno scioglimento del ghiaccio più veloce. Fra le strategie reattive si fa uso di abrasivi come la sabbia per aumentare la trazione anche sul manto ghiacciato in attesa del naturale scioglimento.
- ***Progettazione del ciglio della strada:*** Le superfici stradali in rilevato per quanto riguarda il comportamento nei confronti delle precipitazioni nevose sono preferibili rispetto a quelle in trincea che tendono invece ad accumulare la neve soffiata dal vento. La presenza di vegetazione scelta sul ciglio della strada è positiva non solo per la stabilizzazione del suolo ed il controllo della crescita dell'erba ma anche per la riduzione degli accumuli di neve portata dal vento.
- ***Ambiente rurale o urbano:*** Il traffico è di gran lunga superiore in un ambiente urbano e di conseguenza è richiesta una trazione; generalmente nelle città la neve si accumula anche nel caso di bassa umidità in quanto la bassa velocità dei veicoli rispetto alle strade extraurbane fa sì che la convezione dell'aria non è sufficiente a ripulire il manto stradale.
  In ambiente urbano tramite l'utilizzo di prodotti chimici si cerca di ristabilire la trazione il prima possibile e, a differenza delle strade extraurbane si cerca di limitare l'uso di abrasivi che possono contribuire all'inquinamento dell'aria e necessitano una pulitura successiva per evitare che intasino i tombini o sedimentino.
- ***Prestazione e stoccaggio dei prodotti chimici invernali:*** In base alla temperatura dell'ambiente esterno bisogna fare in modo che i prodotti chimici da utilizzare non congelino all'interno delle taniche o dei condotti di pompaggio, infatti più sono stretti più è probabile che accada. Ad esempio, utilizzando i dati storici, si conta quanti giorni la temperatura è inferiore alla temperatura di utilizzo ottimale della salamoia che è pari a circa -10° C; a temperature inferiori bisogna aumentare di gran lunga la quantità di sale per diminuirne la temperatura di congelamento.

Le strategie convenzionali per affrontare le precipitazioni invernali a temperature particolarmente basse si focalizzano sull'utilizzo di abrasivi e sulla rimozione meccanica della neve ma il progresso tecnologico è indirizzato verso lo sviluppo di prodotti chimici che siano ecologicamente sostenibili e comunque efficaci per il citato range di temperature.
Vi è comunque margine di sviluppo per il miglioramento delle previsioni climatiche, degli equipaggiamenti e delle metodologie di de-icing atto a ottimizzare le tempistiche delle operazioni ed il livello di servizio ottenibile.

Nei capitoli successivi saranno trattati nel dettaglio le strategie di de-icing più convenzionali.

3.1.1 Utilizzo di Prodotti Chimici

L'utilizzo di prodotti chimici è la strategia più utilizzata, seconda solo alla rimozione con mezzi spazzaneve, per far fronte alla problematica del ghiaccio e della neve che si vanno ad accumulare sul manto stradale; possono essere impiegati in tre differenti maniere (Xianming Shi et al., 2011):

- ***Anti-icing:*** Sono applicati al manto stradale prima che avvenga la precipitazione nevosa in maniera tale da riscaldare la superficie ritardando così la formazione del ghiaccio oppure impedire l'attecchimento del ghiaccio all'asfalto.
- ***Pre-bagnatura:*** I prodotti chimici sono aggiunti nella forma liquida ad altri solido oppure ad abrasivi prima della dispersione sulle strade per migliorarne la resa o preservare la pavimentazione.
- ***De-icing:*** Sono utilizzati durante o dopo le precipitazioni per favorire lo scioglimento della neve e del ghiaccio accumulati e velocizzare quindi il ritorno alla piena funzionalità dell'infrastruttura interessata.

Lo scopo principale dei prodotti chimici utilizzati per il de-icing è di ridurre la temperatura di congelamento dell'acqua in modo da rallentare e indebolire la formazione di ghiaccio o prevenire la formazione di un legame fra la superficie stradale ed il ghiaccio.
La minima temperatura a cui una soluzione acqua/deicer congela è detta eutettica e dipende dalla concentrazione del prodotto nell'acqua, durante il processo di fusione viene prodotta ulteriore acqua e visto che la soluzione viene diluita può avvenire il ricongelamento; tale temperatura è però in genere di molto inferiore a quella effettiva di utilizzo del prodotto in quanto oltre una certa percentuale economicamente sostenibile. Solitamente sono maggiormente usati i prodotti chimici allo stato liquido piuttosto che quello allo stato solido in quanto i secondi possono essere utilizzati in un numero più ristretto di casi.

I prodotti chimici che sono maggiormente impiegati al fine di mantenere le strade sghiacciate a seconda delle diverse esigenze e temperature sono i seguenti (Yehia & Tuan, 1998):

- ***Cloruro di Calcio:*** È un prodotto igroscopico, ovvero può assorbire e trattenere l'acqua, e, quando è mischiato con l'acqua dà luogo ad una reazione esotermica e quindi produce calore. Non perde la sua funzionalità neppure con temperature rigide e può quindi essere utilizzato fino a -25°C, può inoltre essere mischiato al sale prima dell'applicazione aumentandone l'efficacia. Gli effetti sull'ambiente sono simili a quelli del sale e deve essere maneggiato dagli addetti con l'apposita attrezzatura per evitare bruciature della pelle e irritazioni degli occhi e respiratorie.
- ***Cloruro di Sodio:*** È prodotto maggiormente utilizzato e corrisponde al comune sale, una volta gettato sulla strada scioglie la neve e il ghiaccio accumulati e previene il ricongelamento. La temperatura alla quale opera in maniera ottimale è al di sopra dei -10° C, per temperature inferiori, al fine di ottenere un risultato accettabile, va utilizzato in quantità molto più elevate ma ciò porta ad un ingente aumento della corrosione sia sui veicoli che sulle infrastrutture. Viene solitamente distribuito con dei mezzi appositi, di cui è riportato un esempio in *Figura 3-2* e spesso il suo uso è

accoppiato al passaggio con gli spazzaneve.

Figura 3-2: Sulla sinistra della figura è riportato il cloruro di sodio utilizzato per il deicing mentre sulla destra vi è un mezzo spargisale all'opera (tratta da www.granulati.it).

- ***Acetato di Calcio Magnesio:*** La sua funzione consiste nell'impedire la creazione di un legame fra il ghiaccio e la neve e la superficie stradale, la sua efficacia diminuisce per temperature inferiori a -5°C, viene applicato generalmente durante o dopo le precipitazioni e ci mette circa 15-30 minuti in più rispetto al sale per indurre lo scioglimento del ghiaccio ma il suo effetto può durare fino a due settimane dopo l'applicazione. Inoltre ha meno effetti negativi sull'ambiente in quanto non è praticamente tossico per l'uomo ed è biodegradabile e circa un quinto corrosivo rispetto al sale. Il prezzo infine è piuttosto elevato a causa del costo dell'acido acetico con cui viene creato.
- ***Acetato di Potassio:*** Anche in questo caso il suo scopo principale è quello di impedire il legame del ghiaccio con l'asfalto, è preferibilmente utilizzato in forma liquida sia per pre-bagnare altri prodotti sia con la funzione di antigelo.
  Ha un impatto ambientale quasi nullo e, nonostante la sua temperatura ideale di utilizzo sia fino a -12° C, mantiene la sua efficacia anche per temperature minori.
- ***Cloruro di Magnesio:*** Solitamente disponibile in granuli o scaglie è utilizzato per temperature fin a -15° C, agisce attirando l'umidità atmosferica e con una reazione esoterma impedisce che il ghiaccio attecchisca al suolo. Può essere usato, nella sua formulazione liquida, per la prebagnatura del sale prima della sua distribuzione. Anche in questo caso presenta meno problemi ambientali rispetto al sale.

Oltre ai prodotti chimici più utilizzati per il de-icing già citati ve ne sono altri il cui uso è limitato, fra i meno sfruttati si menzionano in particolare i seguenti:

- ***Urea:*** È un composto organico che viene degradato in ammoniaca tramite idrolisi e quindi convertito in nitrato dai microrganismi del suolo. Difficilmente è utilizzato sulle strade ma trova il suo impiego negli aeroporti, per temperature fino a -9°C in quanto è meno corrosivo rispetto al sale sull'alluminio della scocca degli aeroplani.

Tuttavia l'ammoniaca risulta tossica per buona parte dei microorganismi acquatici anche in basse concentrazioni ed i nitrati, per concentrazioni superiori a 10 ppm nell'acqua danno problemi al trasporto dell'ossigeno nel sangue.

- ***Pirofosfato di Tetrapotassio:*** È un sale derivante dalla reazione fra l'acido fosforico ed il carbonato o cloruro di potassio. Nonostante la buona efficienza fino a -4°C ed il basso impatto ambientale il suo utilizzo è limitato a causa del costo elevato.

È infine riportato in *Tabella 3-1* un resoconto dei vari prodotti chimici descritti precedentemente con il relativo intervallo di temperatura di utilizzo e le quantità che sono solitamente applicate al manto stradale.

Prodotto chimico per il de-icing	**Temperatura di utilizzo**	**Quantità da applicare**
Cloruro di Sodio (NaCl)	Da -10° C a 1° C	Da 13 a 68 g/m^2
Cloruro di Calcio ($CaCl_2$)	Da -25° C a 0° C	Da 4 a 18 g/m^2
Sale mischiato a Cloruro di calcio	Da -17° C a 0° C	Da 21 a 50 l/m^3 di sale
Acetato di Calcio Magnesio (CMA)	Da -5° C a 0° C	Da 15 a 39 g/m^2
Acetato di Potassio (KAc)	Da -12° C a 0° C	Da 50 a 150 g/m^2
Cloruro di Magnesio ($MgCl_2$)	Da -15° C a 0° C	Da 8 a 11 g/m^2
Urea	Da -9° C a 0° C	Da 26 a 136 g/m^2
Pirofosfato di Tetrapotassio (TKPP)	Da -4° C a 0° C	49 g/m^2

Tabella 3-1: Tabella riassuntiva dei prncipali prodotti chimici utilizzati per il deicing che racchiude la temperatura e le quantità ideali di utilizzo (Yehia & Tuan, 1998).

Il largo uso di prodotti chimici per il de-icing ha effetti negativi sia sulla durabilità delle pavimentazioni e delle infrastrutture in calcestruzzo o acciaio sia sui veicoli e sull'ambiente. A titolo di esempio sono riportati in *Figura 3-3* alcuni ingrandimenti che mostrano l'impatto di alcuni deicers sul calcestruzzo.

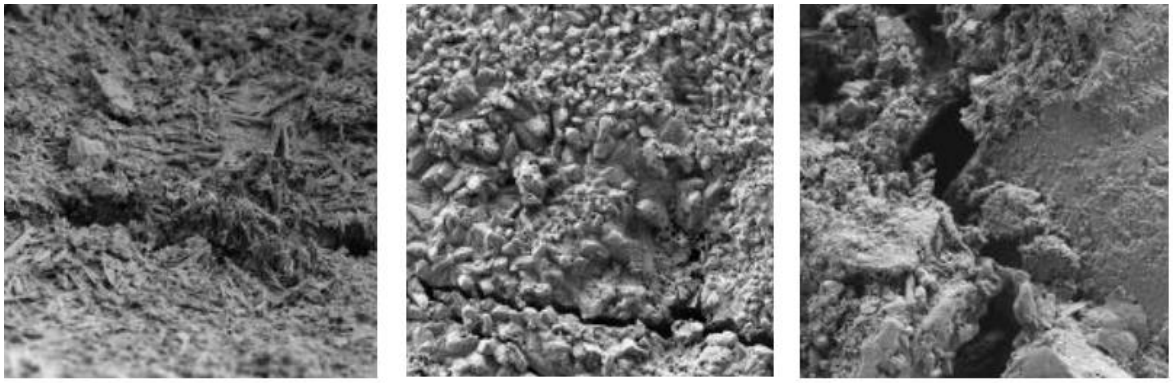

Figura 3-3: Da destra verso sinistra sono rispettivamente riportati gli effetti del cloruro di calcio, cloruro di sodio, cloruro di magnesio sul calcestruzzo visti al microscopio (Michigan Winter Operation Conference, 2011).

È tuttavia difficile valutare l'entità di tali danni e confrontare la corrosività dei diversi prodotti chimici utilizzati in quanto le variabili da considerare sono numerose; nuovi prodotti sono continuamente testati ed introdotti sul mercato al fine di ridurre i danni della corrosione, che sono particolarmente elevati quando vengono impiegati prodotti chimici a base di cloruro, ed hanno effetti negativi sulle barre di rinforzo delle infrastrutture in calcestruzzo e sugli impalcati metallici dei ponti (Spitler et al. 2000).

Le pavimentazioni in conglomerato bituminoso subiscono meno gli effetti dei deicers in quanto hanno una relativamente alta resistenza chimica nei loro confronti ma il deterioramento accelerato può avvenire come conseguenza dei cicli gelo-disgelo forzati dovuti agli stessi prodotti chimici impiegati.
A causa della corrosione dovuta all'applicazione di tali prodotti sulle infrastrutture come ad esempio sul calcestruzzo sia pre-compresso che ordinario o l'acciaio dei ponti in genere si aggiungono degli anticorrosivi o altri additivi per mitigarne gli effetti.

Per quanto riguarda invece i danni ambientali i prodotti utilizzati per il de-icing possono contribuire, se utilizzati in maniera continuativa, all'aumento della salinità degli specchi d'acqua dolce che raccolgono le acque del disgelo provenienti dalle strade dove sono impiegati. La conseguenza più immediata è il cambio di habitat per la fauna e la flora locali che può portare alla scomparsa di alcune specie.
Inoltre il continuo passaggio di mezzi ne può causare la frantumazione in pulviscolo che, se trasportato dall'aria, finisce per avere effetti irritanti pure sull'uomo.

I prodotti chimici utilizzati per il de-icing non hanno solamente effetti corrosivi sulle infrastrutture ma pure sui mezzi di locomozione con cui entrano in contato.
A titolo di esempio sono riportate, in *Figura 3-4,* alcune immagini raffiguranti gli effetti della corrosione che hanno i deicers sulla carrozzeria e sulle parti meccaniche in metallo dei veicoli che sono soliti percorrere strade dove ve ne è un largo uso durante i mesi invernali.

Figura 3-4: Sono riportati gli effetti della corrosione sia sulle parti meccaniche che sulla carrozzeria dovuta al passaggio prolungato dei veicoli in strade oggetto di trattamento con prodotti chimici per il deicing (Michigan Winter Operation Conference, 2011).

3.1.2 Utilizzo di Abrasivi

Gli abrasivi sono solitamente utilizzati sulle infrastrutture stradali con temperatura del manto inferiore a -10° C dove l'azione disgelante del sale è scarsa oppure in quelle con poco traffico e livello di servizio basso; sulle altre tipologie di strade è preferibile l'impiego di prodotti chimici per il de-icing (Akin et al., 2013).
Infatti nelle strade rurali dove durante la stagione invernale le temperature sono estremamente basse la copertura prolungata dell'asfalto con ghiaccio e neve è piuttosto comune; non ci si aspetta di riuscire a mantenere la superficie stradale sgombra ma si preferisce aumentare la trazione dei mezzi che le percorrono spargendo abrasivi sullo strato nevoso compattato.
L'abrasivo maggiormente sfruttato è la sabbia sia per la sua facilità di reperimento che per il basso costo pari a circa 5 Euro a tonnellata, a titolo di esempio, in *Figura 3-5,* è riportato un sacchetto di sabbia specifica per aumentare la trazione dei veicoli e, sempre in *Figura 3-5,* ne è raffigurato lo spargimento da parte degli addetti sul manto stradale.

Figura 3-5: Sulla sinistra un sacco di sabbia utilizzato per aumentare la trazione mentre sulla destra alcuni addetti spargono la sabbia sulla carreggiata in previsione di un evento nevoso (tratta da www.lowes.com).

Rispetto all'uso di prodotti chimici per il de-icing generalmente trattare una strada con la sabbia richiede circa sette volta il quantitativo di materiale in più; al fine di ridurne la dispersione la sabbia viene riscaldata oppure viene applicata una prebagnatura con prodotti chimici allo stato liquido come ad esempio l'acetato di potassio e il cloruro di calcio oppure semplicemente con acqua calda, tale trattamento contribuisce pure ad aumentare la frizione dei veicoli.
In particolare l'utilizzo dell'acqua calda fa sì che si formi sulle strade uno strato simile alla carta vetrata al di sopra della neve compattata che quindi si mantiene efficiente per un tempo maggiore; è particolarmente impiegata ad esempio negli aeroporti norvegesi nei periodi di prolungate basse temperature.

La sabbia perde efficacia col tempo quando il traffico continuo tende a pressare i granelli di

sabbia all'interno della neve compattata oppure quando una nuova precipitazione nevosa va a coprire lo strato di sabbia posato precedentemente.
Sulle strade sgombre di neve se vi è troppa sabbia possono insorgere problemi di slittamento dei veicoli, inoltre se non adeguatamente rimossa può essere trasportata dall'acqua all'interno del sistema di drenaggio ed ostruirne le tubazioni; ha quindi effetti negativi sulla qualità dell'acqua e dell'aria, sulla vita delle specie aquatiche e sulla vegetazione in quanto, anche dopo un'adeguata raccolta una percentuale che varia dal 50% al 90% rimane comunque dispersa nell'ambiente.

La sabbia in sé non da problemi di corrosione ma può avere un effetto usurante sul rivestimento protettivo dei veicoli, inoltre se triturata in polvere fine dal traffico diventa volative dando problemi sia di visibilità che respiratori.

Oltre alla sabbia possono essere sfruttati dei polimeri specifici che, oltre ad aumentare considerevolmente la frizione fra la strada ed il veicolo, hanno anche la funzione secondaria di rilasciare un prodotto chimico per il de-icing.
Un esempio è la tecnologia SafeLane prodotta dalla Cargill la quale prevede la stesura sul manto stradale di una resina epossidica sulla quale è applicato uno strato di calcare che, grazie alla sua porosità, ha la funzione di una spugna solida e fa sì che l'acetato di calcio magnesio di cui è impregnato venga rilasciato gradualmente massimizzandone così l'effetto durante un evento nevoso.

3.1.3 Utilizzo di Mezzi Spazzaneve

Il termine spazzaneve sta ad indicare un'apparecchiatura montata su un veicolo atto alla rimozione della neve e del ghiaccio dalla superficie stradale; solitamente si tratta di una lastra di acciaio sagomata che viene montata anteriormente su camion, trattori o pick-up a seconda delle esigenze (Akin et al., 2013).

L'utilizzo di mezzi spazzaneve è il metodo maggiormente utilizzato ovunque per rimuovere il ghiaccio e la neve accumulata dalle strade, in particolare è particolarmente efficace nel caso di temperature rigide.
In tali condizioni infatti le precipitazioni nevose hanno una percentuale di umidità minore che inizialmente permette al vento e agli spostamenti d'aria dei veicoli di ripulire la strada; tuttavia in quelle meno trafficate o nel caso di ingenti nevicate vi è comunque un accumulo che, però, può essere rimosso facilmente dal passaggio frequente dei mezzi spazzaneve il quale inoltre può aiutare a prevenire l'attecchimento del ghiaccio e della neve alla superficie stradale.

Esistono varie tipologie di mezzi spazzaneve e si differenziano, al variare dello scopo per cui sono utilizzati, per le diverse tecnologie con cui sono equipaggiati come, ad esempio, la forma delle lame montano; vengono riportati in *Figura 3-6* i seguenti modelli:

- ***Spazzaneve tradizionale:*** Lo si può notare in funzione mentre ripulisce la corsia più a sinistra della strada, è dotato di una lama regolabile che viene inclinata in maniera

tale da spostare la neve accumulate verso il ciglio della carreggiata.

- ***Spazzaneve "Towplow":*** Tale tecnologia è stata utilizzata per la prima volta in Michigan, in aggiunta al mezzo tradizionale vi è un rimorchio con montata una lama di 8 m la cui inclinazione delle ruote fa sì che durante l'avanzamento del mezzo si riescano a ripulire due corsie parallele. Al fronte di un aumento del costo del carburante del 10-15% vi è il vantaggio di poter schierare un mezzo spazzaneve in meno. Lo si può vedere in opera nella corsia a destra; l'utilizzo di tale tecnologia è particolarmente indicato per le strade che presentano principalmente rettilinei ed una larghezza di almeno due corsie.

Figura 3-6: Sulla destra si può osservare uno spazzaneve "Towplow" all'opera affincato da un mezzo tradizionale sulla sinistra (tratta da www.wikipedia.it).

La tecnologia per i mezzi spazzaneve si sta costantemente evolvendo per quanto riguarda sia le pale, i rimorchi multi-funzione, sia i sensori montati a bordo. Per esempio la tecnologia AVL, che incorpora un sistema GPS, permette di scambiare informazioni in tempo reale fra un centro di controllo ed il mezzo riguardo alle operazioni di de-icing come, ad esempio, la tipologia di prodotti utilizzati ed il loro intervallo di applicazione, la posizione delle lame e la temperatura della pavimentazione.

La stazione di controllo inoltre, conoscendo la posizione dei vari mezzi in azione, grazie al GPS, e alle informazioni da esse fornite riesce a coordinare al meglio le operazioni di sgombero della carreggiata da neve e ghiaccio.

3.2 METODI ALTERNATIVI PER IL DE-ICING

La formazione di ghiaccio e l'accumulo di neve è una problematica particolarmente pressante per quanto riguarda l'impalcato dei ponti e le rampe di accesso in quanto tendono a raffreddarsi più velocemente rispetto ad una tipologia di strada non sopraelevata; ciò va di pari passo con la necessità di utilizzare maggiori quantità di prodotti chimici per il de-icing con i conseguenti problemi ambientali e di degrado prematuro della struttura.

Al fine di evitare tali conseguenze i metodi classici di de-icing come ad esempio lo spargimento di sale e l'utilizzo di spazzaneve possono essere affiancati o addirittura sostituiti da altre metodi di seguito descritti (Yehia & Tuan, 1998):

- ***Isolamento delle strutture:*** Al fine di ridurre l'impiego di prodotti chimici corrosivi ed il numero di cicli gelo-disgelo si cerca di diminuire la perdita di calore della superfice isolando la parte inferiore dell'impalcato ed il sottofondo con materiali come ad esempio il polistirene estruso che si può osservare in *Figura 3-7*.

Figura 3-7: Due esempi di polistirene estruso utilizzato per l'isolamento dei ponti e rampe (tratta da www.archiexpo.fr).

- ***Calcestruzzo conduttore elettrico:*** È una tipologia di calcestruzzo che grazie alle resistenze al suo interno si scalda quando percorso da corrente elettrica facendo sì che la temperatura della superficie stradale non scenda al di sotto di 0° C.
- ***Sistema di riscaldamento della pavimentazione:*** Al di sotto della superficie viene inserito un sistema di tubi percorso da un fluido caldo: generalmente si tratta di acqua con l'aggiunta di antigelo. Tale fluido può essere riscaldato in molteplici modi: o bruciando combustibili fossili o sfruttando energie rinnovabili come ad esempio quella solare o quella geotermica.

Il riscaldamento e l'isolamento delle strutture è costoso e quindi limitato alle aree dove il de-icing è particolarmente importante; tuttavia il consumo di combustibili fossili per il riscaldamento non è una valida alternativa all'utilizzo di prodotti chimici in quanto non economicamente ed ambientalmente sostenibili.

Lo sfruttamento dell'energia elettrica ottenuta da fonti rinnovabili oppure riscaldare l'acqua direttamente grazie all'energia geotermica ed un eventuale ausilio di una pompa di calore al contrario permette di evitare l'impiego di prodotti chimici corrosivi per le strutture ed eliminare i danni ambientali ad esse legate.

Nei seguenti capitoli saranno trattate più nello specifico la tecnologia del calcestruzzo conduttore elettrico e dei sistemi geotermici superficiali impiegati per il de-icing.

3.2.1 Il Calcestruzzo Conduttore Elettrico

Il calcestruzzo conduttore elettrico può essere definito come un materiale composito a base di cemento con all'interno dei componenti che conducono l'elettricità in maniera tale da ottenere una stabile e relativamente alta conduttività elettrica (Yehia & Tuan, 1998).

Con due metodologie differenti se ne possono ottenere due tipi:

- ***Calcestruzzo fibro-rinforzato conduttore:*** Ha una maggiore resistenza meccanica ma una minore conduttività a causa della bassa superficie di contatto fra le fibre con una resistività che si attesta intorno a 100 Ω*cm.
- ***Calcestruzzo con aggregati conduttori:*** Nel caso corrente la resistività varia da 10 a 30 Ω*cm ma la resistenza meccanica arriva a massimo 35 MPa in quanto ha un contenuto di acqua maggiore richiesto durante il mescolamento per compensare l'assorbimento da parte degli aggregati conduttori come ad esempio il carbone.

La tecnologia del calcestruzzo conduttore è particolarmente efficace nel caso di pavimentazioni rigide in quanto è subito a contatto con lo strato di ghiaccio e la neve accumulata mentre nel caso sia previsto nella pavimentazione uno strato di conglomerato bituminoso perde di efficacia all'aumentare dello strato stesso.
In *Figura 3-8* è riportata una rappresentazione schematica di una pavimentazione rigida con uno strato di calcestruzzo conduttore.

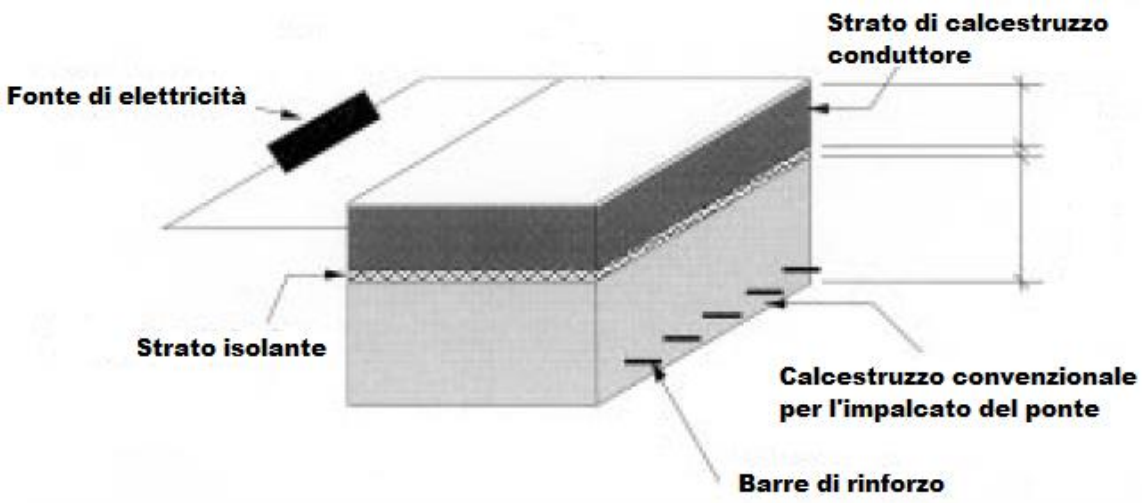

Figura 3-8: Schema dell'impalcato di un ponte costruito utilizzando il calcestruzzo conduttore (modificato da Yehia & Tuan, 1998)

Si può osservare come lo strato conduttore sia limitato e termicamente isolato dalla restante parte di calcestruzzo in maniera tale da limitare il consumo di energia elettrica senza perdere efficacia.

Fra gli svantaggi di tale tecnologia vi è la necessità di avere obbligatoriamente una linea elettrica collegata alla struttura sulla quale è istallata; i principali vantaggi consistono invece nel poter azzerare completamente l'utilizzo di prodotti chimici dannosi e nell'estrema facilità di attivazione e disattivazione del sistema.

3.2.2 L'Energia Geotermica per il De-icing

L'utilizzo dell'energia geotermica per lo sghiacciamento di infrastrutture è una valida alternativa ad impatto ambientale nullo ai classici metodi che prevedono mezzi meccanici e prodotti chimici, è utilizzabile sia di giorno che di notte ed è efficace anche durante nevicate particolarmente intense o temperature rigide (County of Essex, 2009).

Tale tecnologia prevede lo sfruttamento del calore naturale della Terra istallando, al momento della costruzione una serpentina di tubi all'interno delle gallerie adiacenti al ponte o infrastruttura in questione, nei pali delle pile del ponte stesso oppure in delle sonde apposite all'interno del quale passa un fluido termovettore, in genere acqua con l'aggiunta di antigelo, con il compito di assorbire il calore dal terreno.

Una volta uscito da questa parte del circuito il fluido passa in un'altra serpentina posizionata al di sotto della superficie che si vuole riscaldare alla quale cede a sua volta calore, in *Figura 3-9* è riportato l'esempio di una serpentina visibile durante l'istallazione al di sotto di un marciapiede.

Figura 3-9: Nel dettaglio si può osservare una serpentina durante l'istallazione (Athmann et al., s.d.).

L'efficacia del sistema dipende da molteplici fattori legati sia alla natura dell'infrastruttura da riscaldare che dalle condizioni ambientali: in particolare incidono la temperatura sia dell'ambiente sia quella iniziale della superficie da riscaldare, la temperatura e la portata all'interno dei tubi del fluido termovettore, la velocità del vento e l'entità della nevicata, la conduttività termica del calcestruzzo e dell'asfalto soprastante ed il loro isolamento dalla parte inferiore della struttura, infine la spaziatura dei tubi che compongono il sistema.

Fra i benefici che si annoverano i principali sono i seguenti (County of Essex, 2009):

- ***Sostenibilità:*** Un sistema geotermico per il de-icing sfrutta il calore del terreno circostante e di conseguenza non è necessario trasportare il calore da lontano, inoltre si tratta di una fonte di energia rinnovabile in quanto durante la stagione estiva il calore nel terreno viene ripristinato.
- ***Facilità di installazione:*** Durante la costruzione dell'infrastruttura i tubi sono facilmente posizionabili, inoltre si possono utilizzare componenti prefabbricati come ad esempio per le sonde, le fondazioni ed i rivestimenti delle gallerie per accorciare i tempi di costruzione.
- ***Benefici ambientali:*** Si tratta di un sistema di riscaldamento che sostituisce quello che sfrutta i combustibili fossili e ne evita così il conseguente inquinamento e fa sì che non vengano più sfruttati prodotti chimici per il de-icing dannosi.
- ***Benefici economici:*** I costi per il funzionamento del sistema, che consistono in una pompa per movimentare il fluido ed un'eventuale pompa di calore a seconda dei casi, sono coperti dal risparmio sulle quantità di sale e di mezzi meccanici che sarebbero alternativamente impiegati e sui costi di manutenzione dovuti al prematuro degrado della struttura. I costi di installazione sono bassi in quanto si cerca di posizionare le serpentine in parti della struttura già previste come ad esempio i pali di fondazione ed evitare di dover costruire delle sonde apposite.

L'energia geotermica viene spesso utilizzata negli aeroporti per mantenere sgombre dalla neve le piazzole di sosta degli aerei, in *Figura 3-10* ne è riportato un esempio sia durante la costruzione che durante l'utilizzo.

Figura 3-10: Sulla sinistra è riportato il sistema di tubi durante l'istallazione in una piazzola aeroportuale mentre sulla destra si può osservare l'effetto durante una nevicata (Olgun & Bowers, 2016).

In ambito di viabilità stradale un sistema di de-icing geotermico viene solitamente utilizzato su ponti e rampe di accesso ed uscita data la loro maggiore sensibilità alla formazione di ghiaccio e accumulo di neve (Eugster, 2007).

Per salvaguardare la sicurezza dei pedoni può essere utilizzato anche in città per sghiacciare i marciapiedi maggiormente affollati; in *Figura 3-11* sono riportati due esempi delle applicazioni descritte, si può notare in entrambe la differenza notevole fra le superfici dove passa la serpentina del sistema e quelle che ne sono prive.

Figura 3-11: Sono riportati alcuni esempi di sistemi di sghiacciamento geotermici: rispettivamente si può osservare sulla destra l'applicazione su un marciapiede mentre sulla sinistra su un ponte (Eugster, 2007).

4 IPOTESI DI APPLICAZIONE AL VIADOTTO "TURINELLA"

4.1 INQUADRAMENTO DELL'OPERA

L'infrastruttura oggetto di studio è il viadotto "Turinella" compreso fra le gallerie "Craviale" e "La Turina", l'opera che verrà simulata tramite un modello numerico agli elementi finiti prevede l'attivazione energetica dei due tunnel al fine di mantenerne sghiacciato l'impalcato. Le tre infrastrutture sono situate lungo la Strada Provinciale n. 23 "del colle del Sestriere" in bassa Val Chisone nel Comune di San Germano Chisone, a 40 km da Torino.

Per la rilevante importanza assunta nel collegamento dei Giochi Olimpici Invernali Torino 2006 la Provinciale n. 23 "del Colle del Sestriere" è stata oggetto di numerosi interventi di ammodernamento, realizzati su committenza della Agenzia Torino 2006 per conto della Regione Piemonte ai fini del miglioramento della transitabilità e della sicurezza, in particolare, nel tratto oggetto di studio, è stata realizzata una variante sulla destra orografica del Torrente Chisone (attualmente chiamata Strada Provinciale n. 23 "Dir.1") dal km 39+400 al km 44+500 in corrispondenza dell'abitato di Porte, della lunghezza complessiva di 3,5 km come si può osservare in *Figura 4-1*.

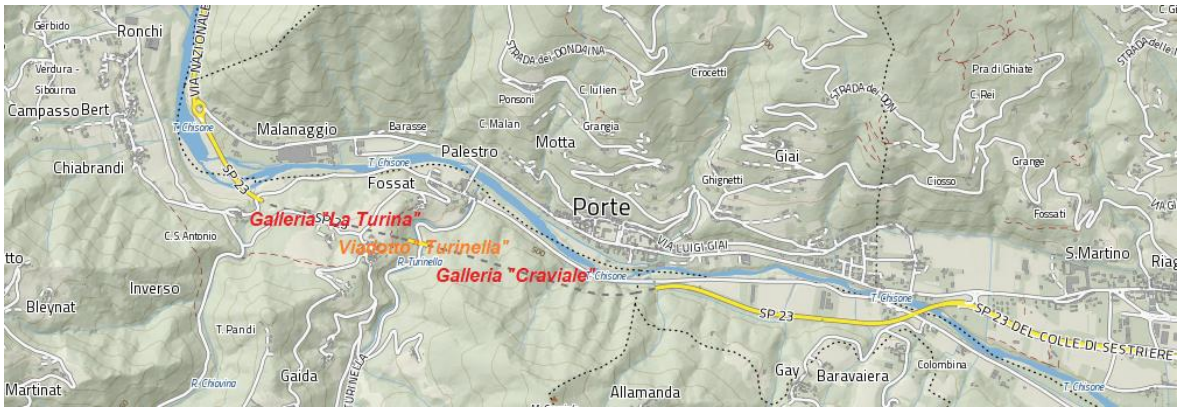

Figura 4-1: Mappa della Variante Strada Provinciale n. 23 "Dir.1"

Il tracciato della variante di Porte ha origine allo svincolo di Pinerolo Ovest, al limite del Comune di Porte; tale variante, che consiste nell'adeguamento della viabilità locale, attraversa il torrente Chisone con il ponte San Martino, lungo 130 m e costruito su quattro arcate, scavalca quindi la strada provinciale 166 attraverso il viadotto "Prarostino" sempre in quattro arcate.
Il tracciato entra quindi in una prima galleria, la galleria "Craviale", lunga 1055 m, all'altezza dell'abitato di Porte, riemerge per un breve tratto di 100 m di cui 50 interessati dal viadotto "Turinella" e si reimmette nuovamente in una seconda galleria (galleria "La Turina" lunga 665 m) (Kalamaras et al., 2005).
Quest'ultima galleria riconverge sulla ex S.S. n° 23 in località Malanaggio attraverso una rotatoria in corrispondenza del ponte per San Germano, dopo il cavalcavia "Malanaggio" di 350 m che attraversa nuovamente il torrente Chisone.

4.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

I litotipi caratteristici affioranti nei comuni di San Germano Chisone e Porte appartengono al complesso cristallini del Dora-Maira composto prevalentemente da rocce metamorfiche di origine ignea o sedimentaria (Zanella, 2015).

In particolare, come si può osservare nella carta geologico strutturale riportata in *Figura 4-2,* vi sono fra le formazioni superficiali risalenti al quaternario si hanno:

- ***Depositi detritici eluvio colluviali:*** rivestono con buona continuità soprattutto il versante in sponda sinistra orografica del Torrente Chisone con spessori che variano dai pochi decimetri a qualche metro.
  Sono contraddistinti da buone/mediocri caratteristiche geotecniche in relazione alla composizione granulometrica ed alla possibile presenza della falda idrica, sono caratterizzati da una discreta/buona permeabilità che si riduce in corrispondenza dei settori in cui prevalgono i depositi colluviali fini.
- ***Depositi alluvionali di fondovalle e di conoide ghiaioso-ciottolosi, localmente con massi e con matrice sabbioso-limosa:*** fanno parte delle unità litologiche in formazione e sono caratterizzati da buone caratteristiche geotecniche con buona permeabilità.
- ***Depositi alluvionali di fondovalle e di conoide ghiaioso-ciottolosi facenti parte di delle unità litologiche formate:*** sono composti localmente da massi e presentano una matrice sabbioso-limosa.

Fra le formazioni del substrato prequaternario si hanno:

- ***Scisti grafitici:*** hanno discreti requisiti geomeccanici legati al grado di scistosità e di alterazione e permeabilità primaria molto bassa; la circolazione di acqua può aumentare nelle zone ad elevata fratturazione.
- ***Dioriti di Manalaggio:*** hanno composizione quarzitica generalmente a struttura gneissica minuta, localmente con struttura granitoide caratterizzate da buoni requisiti

geomeccanici e da permeabilità primaria praticamente nulla.
Si può istaurare una modesta circolazione idrica localmente in corrispondenza delle discontinuità principali.

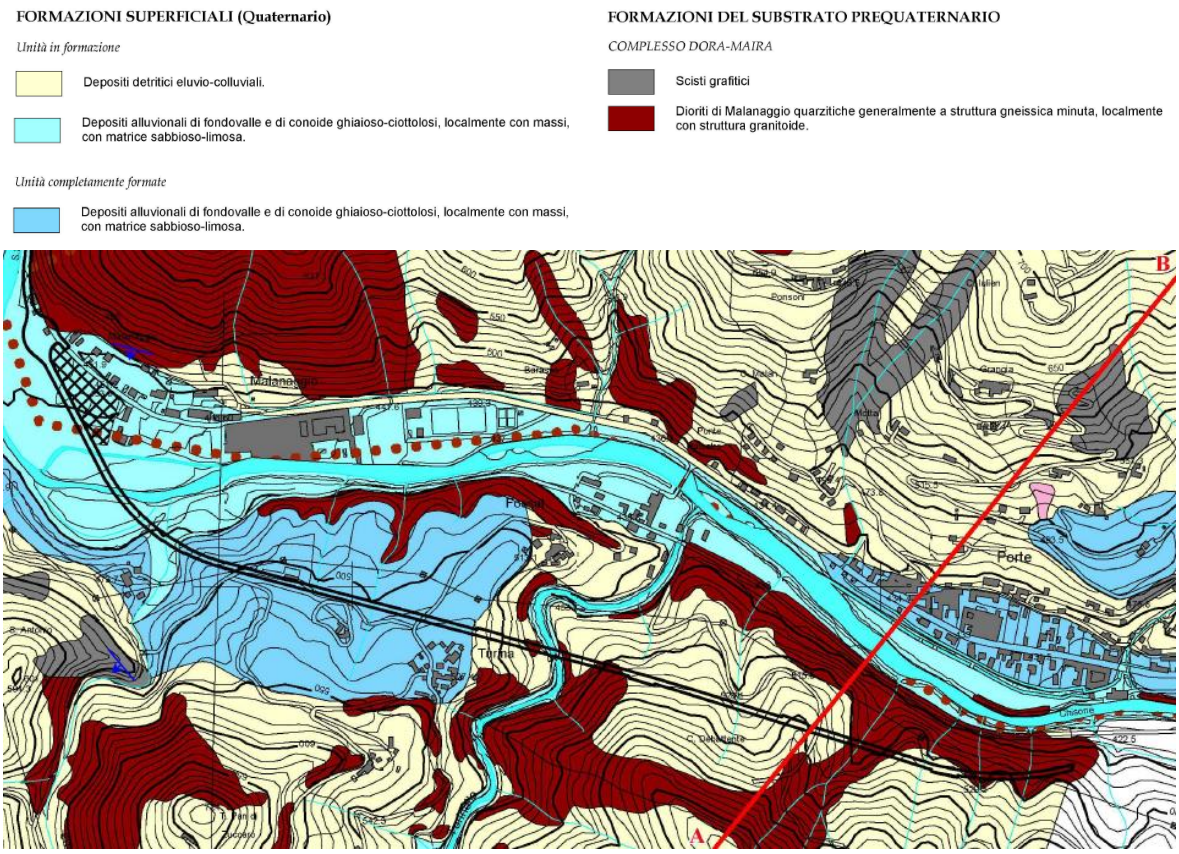

Figura 4-2: Carta geologico strutturale dei caratteri litotecnici.

Si può notare nello specifico, lungo la sezione caratteristica AB riportata in *Figura 4-3,* come la sponda orografica sinistra sia composta da un basamento di scisti grafitici che solo saltuariamente affiorano dai depositi detritici eluvio-colluviali mentre quella destra dalle dioriti di Manalaggio.

In corrispondenza dell'alveo del Chisone vi sono i depositi alluvionali di fondovalle, lo stesso paese di Porte è situato su una superficie terrazzata sospesa al di sopra dell'alveo di qualche metro composta da ghiaie e ciottoli sospesi a matrice sabbioso-limosa.

Si è osservato quindi come la galleria "Craviale" attraversi per tutta la sua lunghezza il basamento cristallino metamorfico del complesso di Dora-Maira mentre il contatto con il gruppo di Pinerolo avvenga lungo la galleria "La Turina".

Quest'ultimo consiste in micascisti grafitiche, gneiss e gneiss conglomerate derivanti da sedimenti detritici; dopo circa 100 m dall'ingresso della galleria adiacente al ponte avviene il contatto, identificato con la presenza di grossi blocchi derivanti da una antica frana lungo il pendio originale, fra il basamento descritto ed un deposito composto da ghiaia con matrice

sabbioso-limosa.

L'origine dei depositi alluvionali è incerta, l'ipotesi più credibile è che consistano nel precedente letto del Torrente Chisone abbandonato a favore del corso attuale in seguito ad un movimento tettonico.

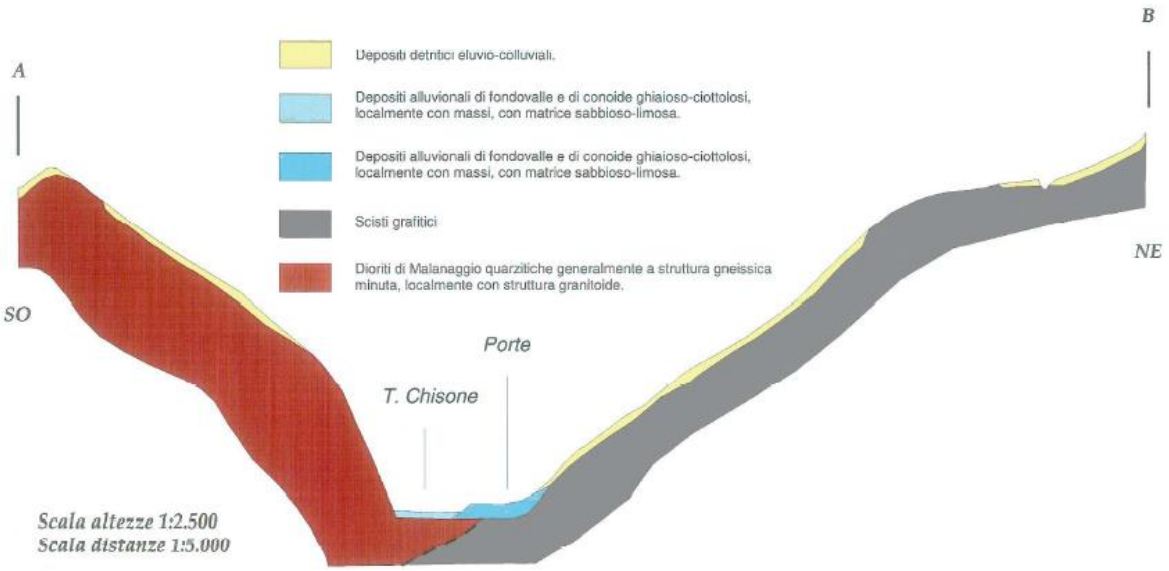

Figura 4-3: Sezione AB della carta geologico strutturale dei caratteri litotecnici.

Quanto detto lo si può osservare anche nel profilo geologico longitudinale riportato nella *Figura 4-4:* la galleria "Craviale" è scavata interamente nella roccia la galleria "La Turina" si fa largo per lo più attraverso ghiaia con matrice sabbioso limosa (Kalamaras et al. 2005).

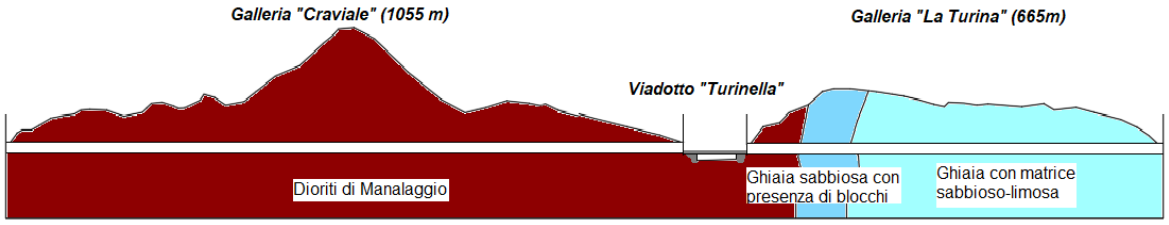

Figura 4-4: Profilo geologico longitudinale delle gallerie "Craviale" e "La Turina"

4.3 ACCLIVITÀ E DTM DELL'AREA

Per identificare il variare dell'acclività nell'area dell'opera che sarà oggetto di studio si è fatto riferimento alla carta delle acclività del Comune di San Germano Chisone in scala 1:10.000 redatta da EDes Ingegneri Associati e come committente la Comunità Montana del Pinerolese di cui è riportato uno stralcio nella *Figura 4-5*.

In particolare si può notare come il terreno in corrispondenza della galleria "Craviale" presenti un'acclività quasi sempre compresa fra i 15° e i 27° mentre in prossimità della galleria "La Turina" fra i 5° e i 15°.

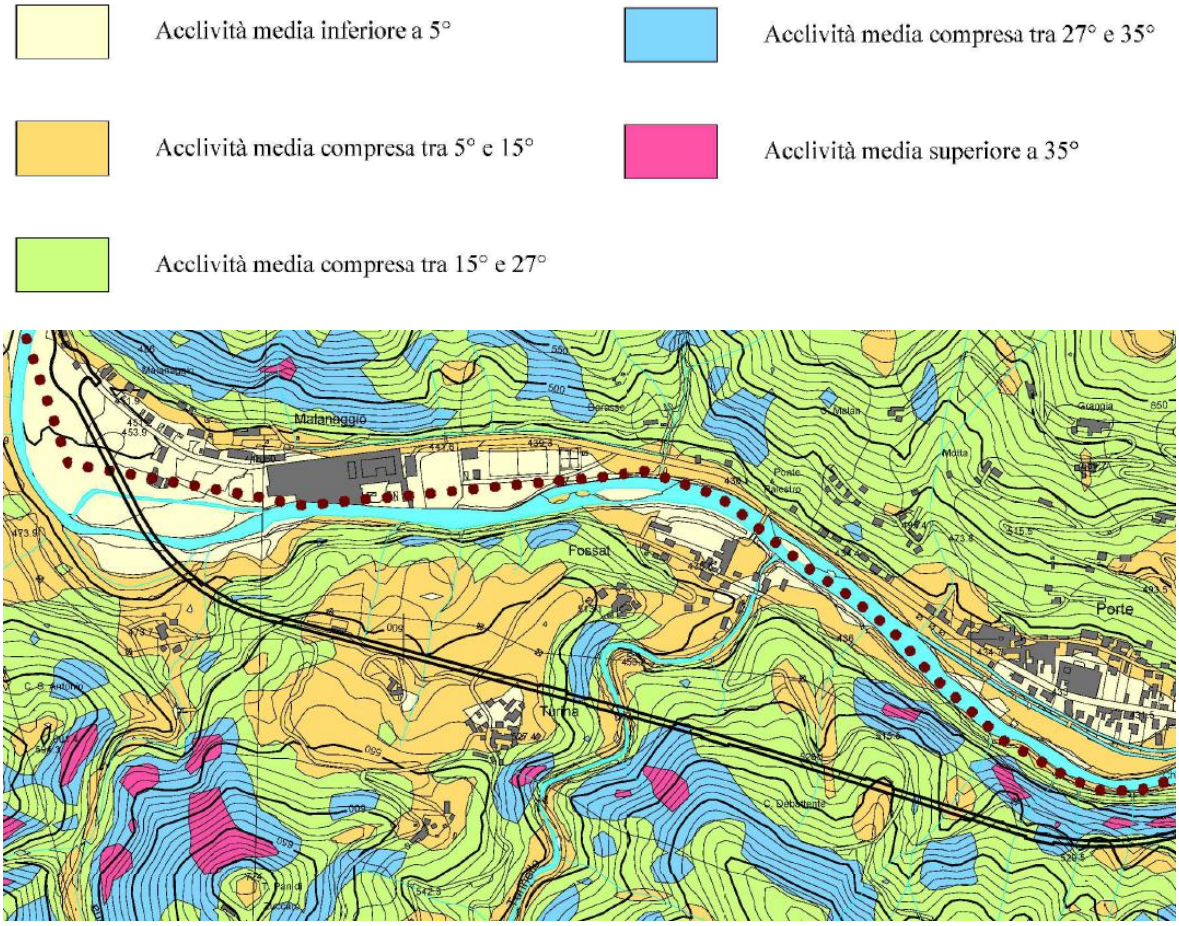

Figura 4-5: Carta delle acclività in scala 1:10'000.

L'area dove sono situati il viadotto "Turinella" e le gallerie "Craviale" e "La Turina" è il settore vallivo del Torrente Chisone compreso fra la stretta di Malanaggio ad Ovest ed il confine comunale di San Germano Chisone ad Est, tale settore è caratterizzato da un profilo trasversale asimmetrico.

Il fondovalle principale, di ampiezza pari a circa un centinaio di metri, è infatti articolato nell'attuale alveo di piena del Chisone, in una scarpata alta qualche metro e una superficie terrazzata presente in lembi discontinui, sovrastati da una scarpata alta fino a 60 m e con

pendenze di 45°.

L'orlo di tale scarpata fa superiormente passaggio ad una superficie con inclinazione compresa fra i 10° e i 20° che si estende in una fascia altimetrica compresa fra le quote 470 e 560 m s.l.m. circa, restringendosi verso l'alto in prossimità del rilievo del Pan di Zucchero, dal quale si diparte in direzione Sud lo spartiacque fra il Rio Chiovina ad Ovest ed il Rio Turinello ad Est, entrambi tributari di destra del Chisone ed entrambi caratterizzati da incisioni torrentizie con pareti con acclività elevate.

Con il supporto del software QGIS, è stato ricostruito, interpolando le curve di livello ed i punti quotati estratti dalla Carta Tecnica Regionale Numerica (CTRN) alla scala 1:10.000 acquisita dal Servizio Cartografico della Regione Piemonte, il Modello Digitale del Terreno (DTM) dell'area occupata dal viadotto e dalle porzioni adiacenti di galleria.

Sulla versione tridimensionale del DTM ottenuto, riportato nella *Figura 4-6* è possibile osservare al meglio quanto descritto precedentemente, in particolare al centro è visibile l'incisione torrentizia del Rio Turinello che è attraversata dal ponte "Turinella" ed i terrazzamenti all'interno dei quali sono scavate le gallerie, mentre, sul lato destro, si può osservare la parte terminale dell'incisione torrentizia del Rio Chiovina.

Figura 4-6. Modello Digitale del Terreno ottenuto con il software QGIS.

4.4 CLIMA E TEMPERATURE

Il clima nel comune di San Germano Chisone, dove è situata l'infrastruttura oggetto di studio, è continentale e presenta escursioni termiche giornaliere abbastanza elevate.

Nella *Tabella 4-1* sono riportate le temperature massime e minime medie giornaliere, la temperatura media giornaliera, l'ammontare di precipitazioni e la percentuale di umidità misurate nell'arco dell'anno.

	Temperatura minima [°C]	Temperatura massima [°C]	Temperatura giornaliera media [°C]	Precipitazioni [mm]	Umidità [%]
Gennaio	-3	6	1,5	41	75
Febbraio	-1	8	3,5	53	75
Marzo	2	13	7,5	77	67
Aprile	6	17	11,5	104	72
Maggio	10	21	15,5	120	75
Giugno	14	25	19,5	98	74
Luglio	16	28	22	67	72
Agosto	16	27	21,5	80	73
Settembre	13	23	18	70	75
Ottobre	7	17	12	89	79
Novembre	2	11	6,5	76	80
Dicembre	-2	7	2,5	42	80

Tabella 4-1: Temperature massime e minime, precipitazioni e umidità medie mensili misurate nel comune di San Germano Chisone (fonte www.ilmeteo.it).

Si può osservare come i mesi dove la temperatura minima media giornaliera è inferiore a 0°C siano dicembre, gennaio e febbraio ed in particolare il mese statisticamente più freddo dell'anno sia gennaio in quanto caratterizzato da una temperatura giornaliera media pari a 1,5°C. Per quanto riguarda le precipitazioni San Germano Chisone è soggetto mensilmente in media a 76,5 mm di precipitazioni, concentrate nella stagione primaverile, per un totale di 917 mm annuali mentre l'umidità è tendenzialmente costante durante l'anno e si attesta intorno al 75%.

L'attivazione di un'eventuale galleria energetica, allo scopo di mantenere sghiacciato l'impalcato del viadotto, sarebbe utile nei tre mesi invernali citati in quanto caratterizzati da frequenti temperature favorevoli alla formazione di ghiaccio e all'accumulo di neve; le precipitazioni medie pari a 45 mm al mese nel periodo descritto, le più basse misurate nell'arco dell'anno, rendono non necessario un utilizzo continuativo dell'impianto per il de-icing ma basta l'accensione prima dell'inizio dell'evento nevoso.

4.5 GEOMETRIA DELL'OPERA

La sezione stradale nell'arco di tutta la variante, è larga 13 m ed è composta da due corsie di marcia larghe 3,75 m, ognuna delle quali affiancata da una banchina larga 1,5 m ed un cordolo di 1,25 m. La velocità di progetto per la variante è inoltre pari a 100 km/h.

Per quanto riguarda il ponte "Turinella", esso ha una lunghezza totale dell'impalcato di 50,00 m che si raccorda rispettivamente con gli imbocchi delle due gallerie adiacenti con un tratto di circa 26 m verso la "Craviale e di circa 24 m verso "La Turina"; in *Figura 4-7* è riportata una sezione rappresentativa dell'impalcato (Kalamaras et al., 2005).

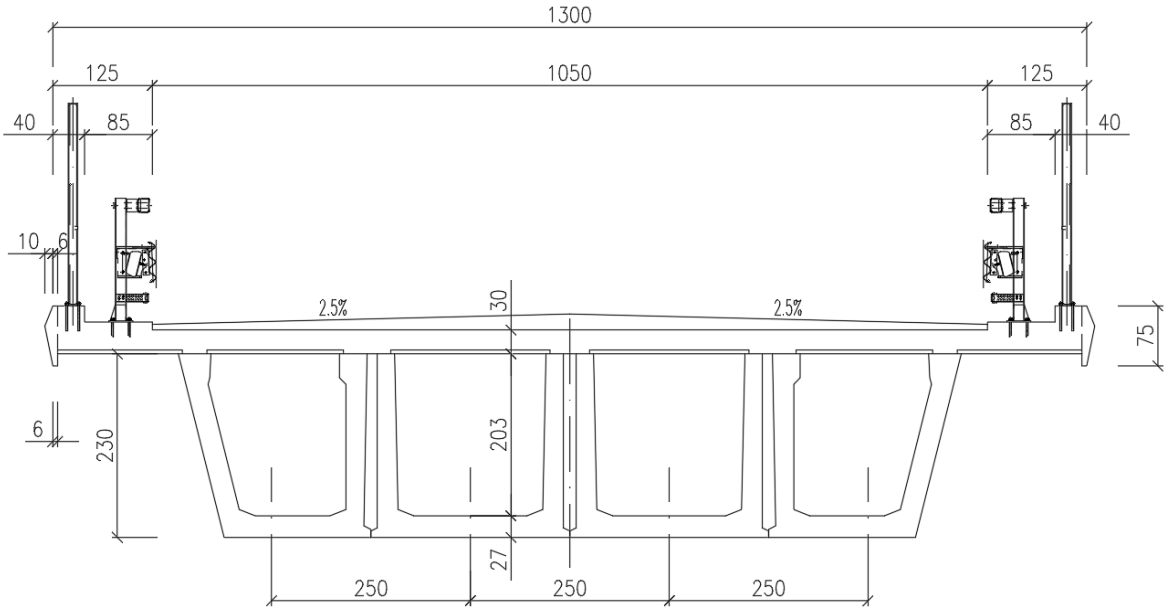

Figura 4-7: Sezione rappresentativa del ponte "Turinella" (Kalamaras et al., 2005).

Le due gallerie hanno un raggio interno di 6,3 m e l'area di scavo varia dai 116 ai 150 m^2 a seconda del supporto. Senza considerare le tipiche nicchie all'interno delle gallerie sono state costruite cinque sezioni allargate ogni circa 300 m per il parcheggio di emergenza, in corrispondenza delle quali lo scavo si allarga fino a circa 19 m di diametro.

Al variare della tipologia di terreno sono state definite cinque differenti sezioni con relative metodologie di scavo e rivestimenti:

- ***Ammasso roccioso con caratteristiche buone e intermedie:*** prevedono rispettivamente le sezioni B, C1 e C2; ogni diversa sezione è stata scavata a sezione piena ed il rivestimento prevede un getto di shotcrete rinforzato con fibre metalliche (SFRS) dallo spessore di 15 cm per la sezione B e 20 cm per le rimanenti. Vi è inoltre un sistema di chiodi Swellex MN24 e, solo nelle sezioni C1 e C2, un sistema di centine 2IPN160.

- ***Ammasso roccioso con caratteristiche scadenti e depositi alluvionali:*** Prevedono rispettivamente le sezioni F1 ed F2 scavate in più fasi secondo il "top-heading and bench method". La prima sezione, oltre ai supporti già descritti per le precedenti sezioni aggiunge un ombrello di micropali con diametro 114,3 mm mentre per la seconda è previsto un consolidamento del fronte e delle pareti con colonne di jet-grouting.

Lo scavo che ha interessato la galleria "La Turina" è stato effettuato in un terreno parzialmente composto da roccia e terreno più soffice come osservato nel *Capitolo 4.2*, e quindi ha previsto le sezioni F1 e F2 mentre la galleria "Craviale", interessando solamente l'ammasso roccioso ha visto l'utilizzo delle rimanenti.

In entrambi i casi per rinforzare le pareti di roccia soprastanti le entrate orientali, in quanto erano risultate altamente alterate e fratturate, si è reso necessario l'utilizzo di chiodi Swellex Mn 24 rispettivamente di lunghezza 4 e 6 m accoppiati con un getto di shotcrete.

Sono riportate rispettivamente in *Figura 4-8, Figura 4-9, Figura 4-10, Figura 4-11 e Figura 4-12* le sezioni B, C1, C2, F1 e F2 comprensive di relative descrizioni e misure.

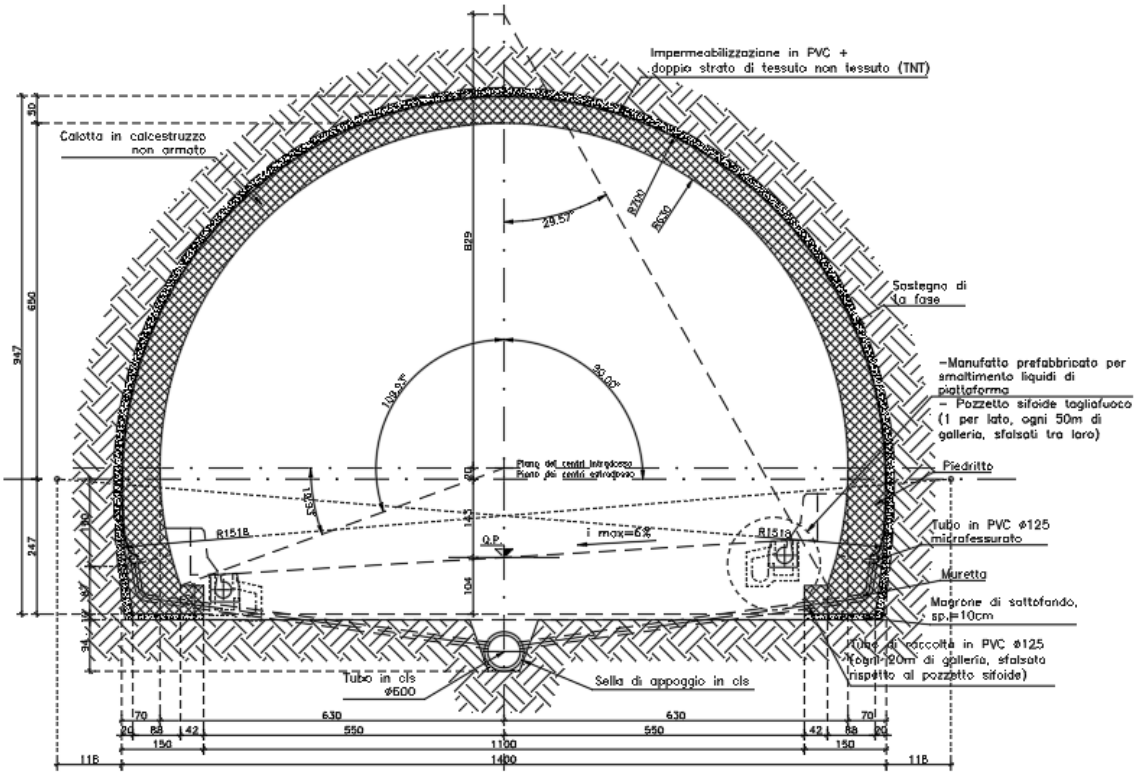

Figura 4-8: Sezione rappresentativa B della galleria "Craviale" (Kalamaras et al., 2005).

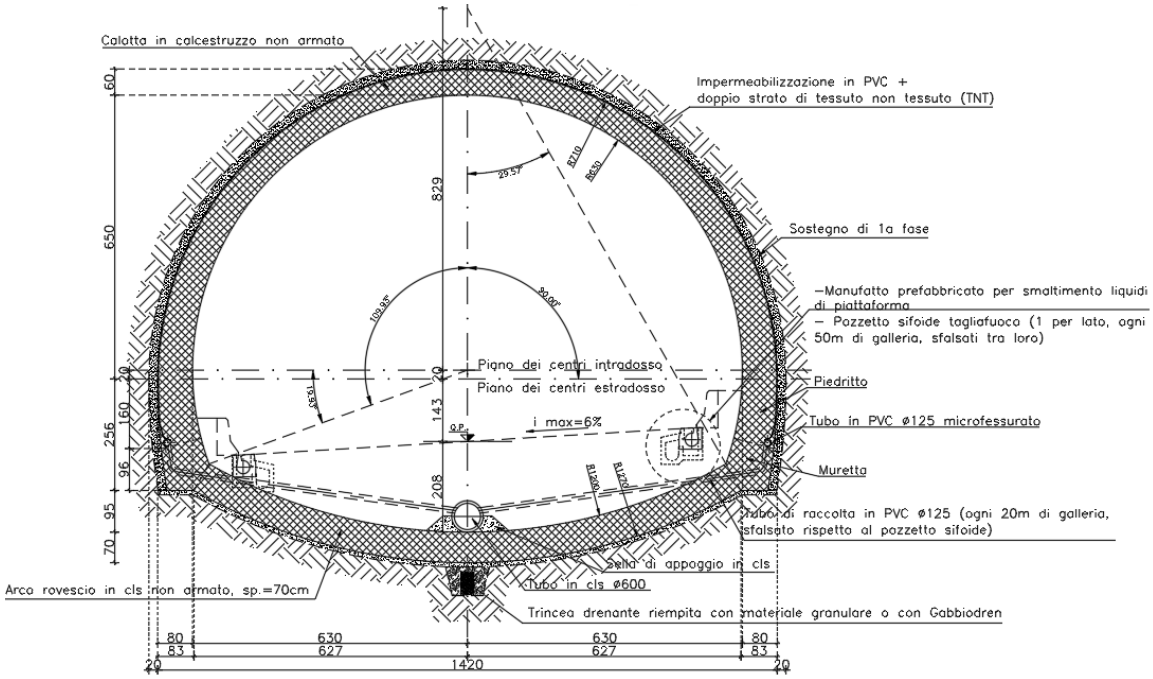

Figura 4-9: Sezione rappresentativa C1 della galleria "Craviale" (Kalamaras et al., 2005).

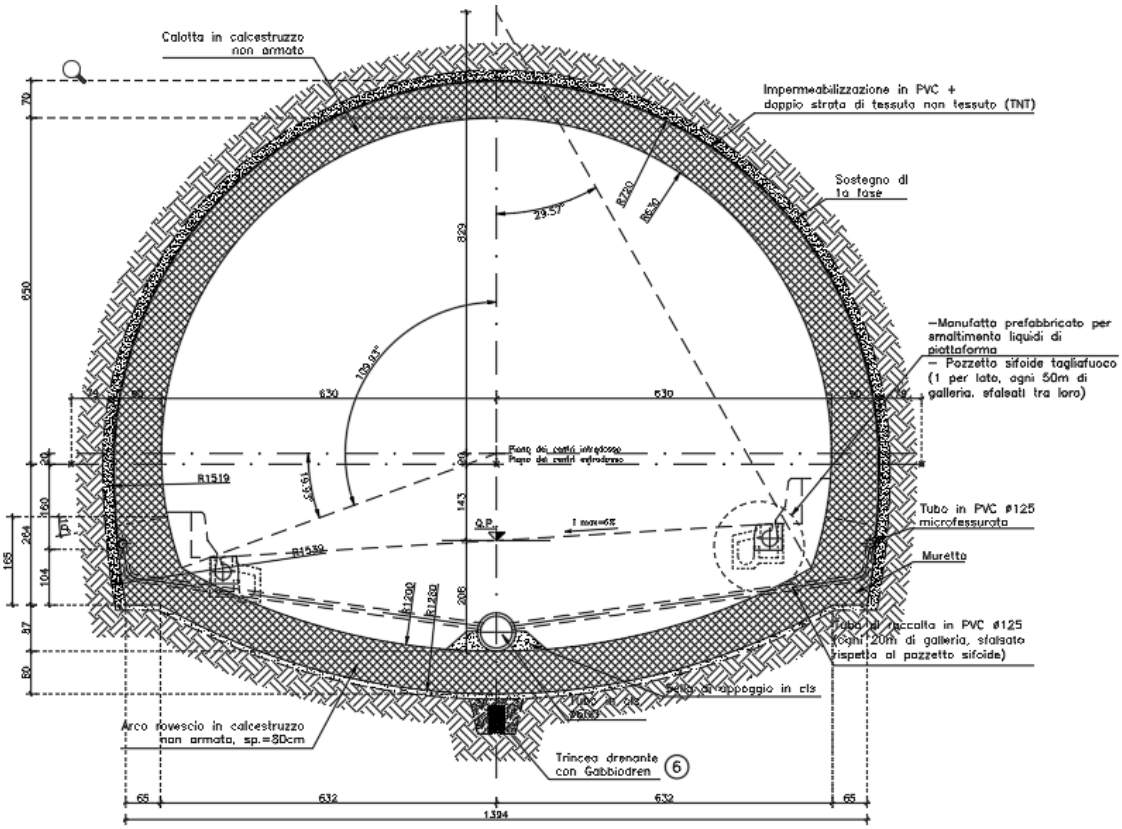

Figura 4-10 Sezione rappresentativa C2 della galleria "Craviale" (Kalamaras et al., 2005).

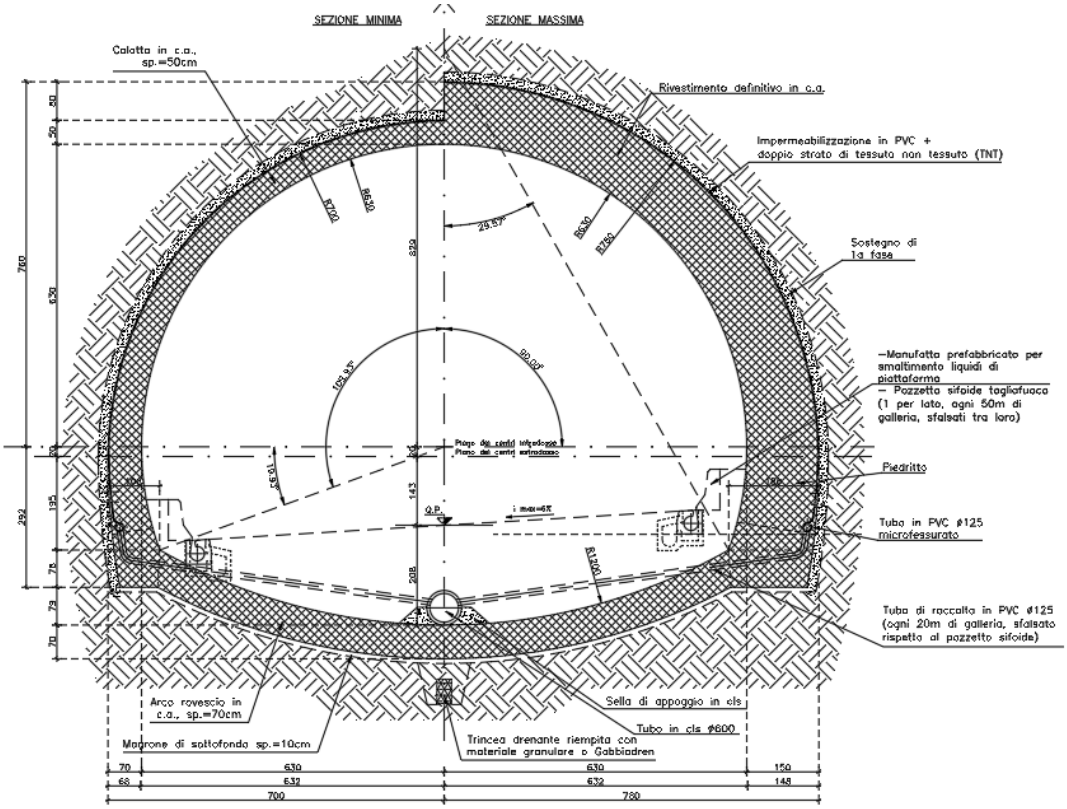

Figura 4-11: Sezione rappresentativa F1 della galleria "La Turina" (Kalamaras et al., 2005).

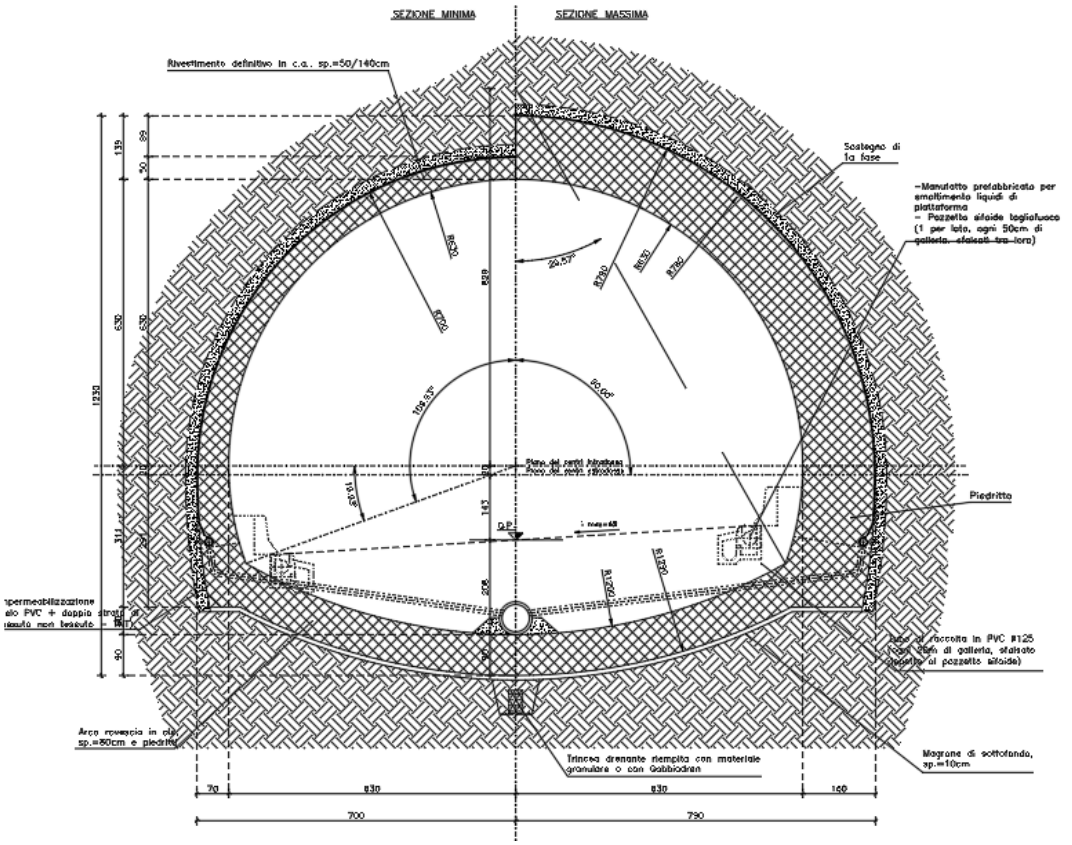

Figura 4-12: Sezione rappresentativa F2 della galleria "La Turina" (Kalamaras et al., 2005).

5 MODELLO NUMERICO

5.1 DESCRIZIONE DELLE SIMULAZIONI

La porzione di Strada Provinciale n.23 "del colle del Sestriere" che sarà oggetto della modellazione e delle successive simulazioni corrisponde ai 200 metri di tracciato, riportati in *Figura 5-1,* che comprendono:

- 50 metri della galleria "Craviale".
- 26 metri della spalla appartenente al viadotto "Turinella" adiacenti alla galleria "Craviale".
- 50 metri di impalcato del viadotto "Turinella".
- 24 metri della spalla del viadotto "Turinella" adiacenti alla galleria "La Turina".
- 50 metri facenti parte della galleria "La Turina".

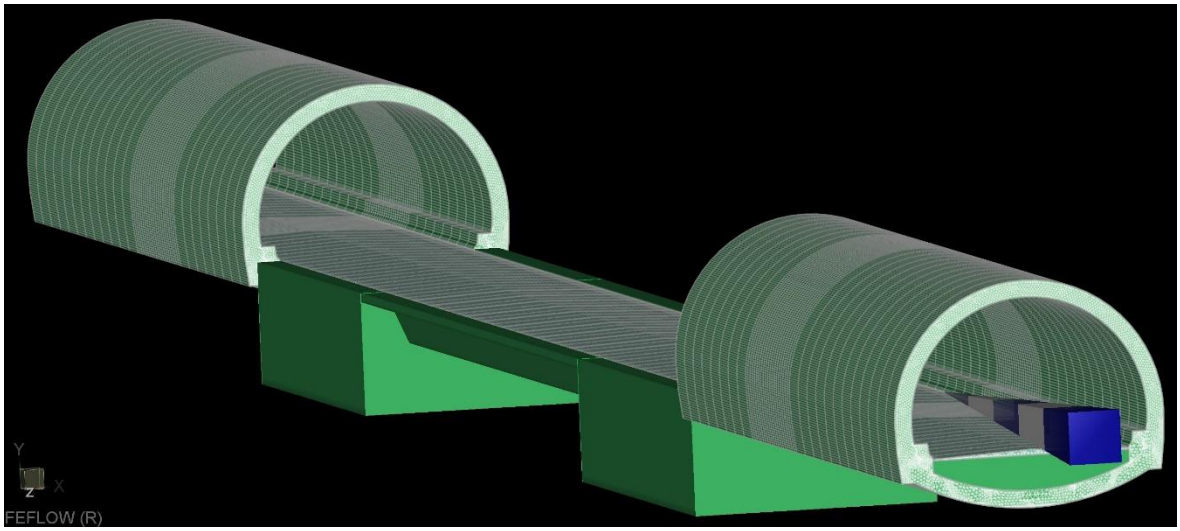

Figura 5-1: Rappresentazione tridimensionale delle infrastrutture modellate appartenenti Strada Provinciale n.23 "del colle del Sestriere".

Al fine di valutare le variazioni annuali di temperatura dell'intera area oggetto di studio e verificare l'efficacia di un sistema geotermico composto da gallerie energetiche, atto a mantenere sghiacciati i 50 metri di impalcato appartenenti al viadotto "Turinella" durante la stagione invernale, sono stati costruiti i seguenti modelli numerici:

- ***Modello esteso dell'area:*** Comprende le porzioni di infrastruttura precedentemente descritte ed il terreno circostante, è stato utilizzato per valutare la distanza ottimale dallo sbocco sul viadotto alla quale istallare la serpentina appartenente alla galleria energetica e l'andamento della temperatura della superfice stradale durante la stagione invernale.
  La simulazione prevede una durata complessiva di tre anni a partire dal mese di marzo, in maniera tale da concludersi con i mesi invernali (dicembre, gennaio, febbraio) relativi al terzo anno.
- ***Modelli ridotti di galleria, spalla ed impalcato:*** In tali porzioni dell'infrastruttura sono stati implementati i tubi, appartenenti al sistema geotermico di de-icing, all'interno dei quali circola il fluido termovettore.
  Durante la simulazione, che prevede l'attivazione per 30 giorni consecutivi della pompa per la circolazione del fluido all'interno delle serpentine, è stata valutata l'efficacia di tale sistema nel mantenere la superficie stradale ad una temperatura superiore a 0°C e quindi prevenire la formazione di ghiaccio e l'accumulo di neve.
  La durata della simulazione è stata scelta per rappresentare approssimativamente un utilizzo durante l'intera stagione invernale non continuativo.

Nella *Figura 5-2* è riportata la mappa concettuale relativa alle simulazioni effettuate, sono riportati i modelli costruiti ed il relativo obbiettivo con evidenziate le principali differenze che li contraddistinguono nell'impostazione del calcolo.
Tutte le analisi descritte sono state effettuate su un modello agli elementi finiti con accoppiamento termo-idraulico, è stato utilizzato il codice di calcolo FEFLOW 6.1

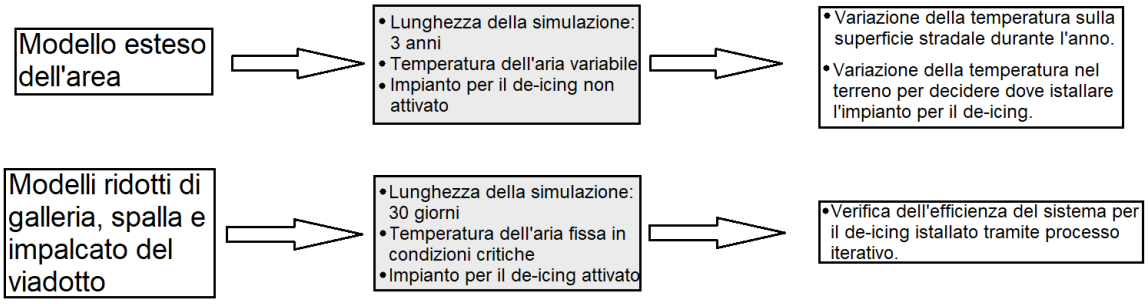

Figura 5-2: Mappa concettuale delle simulazioni effettuate con FEFLOW.

5.2 COSTRUZIONE DEL MODELLO CON FEFLOW

Tutte le analisi descritte sono state effettuate con il codice di calcolo FEFLOW 6.1 (Finite Element Subsurface Flow) sviluppato da DHI-WASY GmbH; si tratta di un software agli elementi finiti con accoppiamento termo-idraulico utilizzato per il calcolo dei flussi, bidimensionali o tridimensionali, sia di fluidi che di calore all'interno di un mezzo poroso nonché per risolvere problemi di trasporto solido (DHI-WASY GmbH, 2010).
Il problema viene risolto applicando le equazioni di flusso ad un dominio bidimensionale o tridimensionale composto da elementi finiti di forma triangolare o tetraedrica al variare della tipologia del problema.

I passaggi per la costruzione di un modello con il software FEFLOW sono i seguenti:

- ***Costruzione della mesh:*** Lo strumento di "mesh editor" permette di disegnare i vari punti, linee e poligoni che andranno a comporre la cosiddetta "supermesh" che rappresenta il dominio del modello e che fornirà la base per la generazione successiva della mesh.
  I poligoni sono utilizzati quando devono essere delimitate alcune aree con parametri dei materiali analoghi oppure quando si vuole infittire la mesh in aree isolate del modello. Le linee ed i punti invece servono a modellare strutture che rispetto alle dimensioni del modello risultano bidimensionali e monodimensionali e che diventeranno sede di condizioni al contorno; la mesh viene successivamente infatti generata rispettandone la posizione nel modello e infittita nella loro prossimità.
  Tali elementi possono essere disegnati direttamente nel modello oppure importati tramite la funzione "add map", si possono inoltre ricalcare i punti di disegni digitali tracciati con Autocad attraverso la funzione "snap to".
  Una volta ultimata la "supermesh" si procede alla generazione della mesh attraverso uno dei seguenti algoritmi: "Adancing Front", "Triangle" o "Grid Builder", e può essere successivamente modificata a seconda delle esigenze infittendola e variando la posizione dei singoli nodi. I risultati dei flussi termici sono calcolati durante la simulazione sui nodi degli elementi finiti generati e, successivamente, interpolati all'interno degli elementi stessi.
  Per quanto riguarda i modelli tridimensionali FEFLOW utilizza un approccio basato sulla creazione di strati: una volta generata la mesh bidimensionale la si può estendere nella terza dimensione decidendo il numero di strati e di sezioni del modello tramite la funzionalità "3D Layer Configuration".
- ***Definizione delle caratteristiche dei materiali:*** Una volta creato il modello tridimensionale, attraverso la finestra "Data", si assegnano le diverse caratteristiche dei materiali agli elementi prismatici che lo compongono; le variabili del processo come la temperatura ed eventuali flussi ad inizio simulazione sono assegnati invece ai nodi.
- ***Definizione delle condizioni al contorno:*** Possono essere di due tipologie: o legate al flusso di un fluido, come ad esempio il flusso fissato attraverso un nodo, oppure legate allo scambio termico, come ad esempio una temperatura fissa in certe porzioni

del modello. Possono assumere un valore fisso per tutta la durata della simulazione o variare nel tempo.

Dopo che è stata definita la geometria del modello va definita la tipologia di analisi che si vuole effettuare, in particolare vanno fissati:

- ***Problem Class:*** Si definisce se il problema interessa un mezzo completamente saturo o no e se prevede oltre al flusso del fluido anche un trasporto solido o di calore; infine si sceglie se il flusso è stazionario o transitorio e, per quanto riguarda la geometria, se le sezioni che compongono il modello seguono un orientamento verticale o orizzontale.
- ***Temporal Settings:*** Attraverso questa opzione si decide la durata totale, dei singoli time-steps e la precisione della simulazione. La durata dei time-steps può essere fissata a priori dall'operatore ma solitamente viene utilizzata l'opzione "Automatic Time Step Control" che sceglie un intervallo adeguato al cambiamento delle variabili primarie, come ad esempio la temperatura durante la simulazione.

Il software FEFLOW durante la modellazione e la simulazione permette di esportare immagini relative al modello e file di testo nel formato .pow contenenti la variazione della variabile primaria di interesse in determinati punti scelti in funzione dello scopo dell'analisi dall'operatore, detti "Observational Points".

5.3 MODELLO ESTESO DELL'AREA

5.3.1 Geometria e Caratteristiche dei Materiali

Il modello è stato generato da una sezione bidimensionale di dimensioni 80 m x 80 m e ha una profondità complessiva di 200 m, è composto da 142 sezioni verticali a spaziatura variabile che compongono i 141 strati con i quali è stata riprodotta la geometria della porzione di Strada Provinciale n. 23 "del colle del Sestriere".

In particolare tali strati sono così suddivisi:

- ***Strati 1-12:*** Prima porzione della Galleria "Craviale" che occupa la progressiva da 0 m a 24 m, le sezioni hanno spaziatura costante pari a 2 m.
- ***Strati 13-32:*** Porzione della Galleria "Craviale" dove a priori si è valutato di istallare la galleria energetica, occupano la progressiva da 24 m a 34 m e le sezioni hanno una spaziatura costante di 0,5 m.
- ***Strati 33-40:*** Porzione conclusiva della Galleria "Craviale" che occupa la progressiva da 34 m a 50 m, le sezioni tornano ad avere una spaziatura costante di valore pari a 2 m.
- ***Strati 41-53:*** Rappresentano la spalla del ponte situata fra l'impalcato e la galleria "Craviale", la quale ha una lunghezza complessiva di 26 m e occupa quindi la progressiva fra 50 e 76 m, è modellata con sezioni con spaziatura costante di 2 m.
- ***Strati 54-89:*** Sono atti a rappresentare la geometria dell'impalcato "La Turinella", il quale è posizionato sulla progressiva del modello da 76 a 126 m, è composto da sezioni a spaziatura variabile per meglio modellare successivamente le serpentine dell'impianto per il de-icing posizionato all'interno della pavimentazione stradale.
- ***Strati 90-101:*** Costituiscono la spalla del ponte fra l'impalcato e la galleria "La Turina", la quale ha una lunghezza complessiva di 24 m e occupa la progressiva fra 126 e 150 m, è composta da sezioni con spaziatura costante di 2 m.
- ***Strati 102-110:*** Porzione della galleria "La Turina" adiacente al viadotto che occupa quindi la progressiva da 150 m a 166 m, le sezioni presentano una spaziatura dal valore costante di 2 m.
- ***Strati 111-130:*** Porzione della galleria "La Turina" dove a priori si è valutato di istallare la galleria energetica, occupa la progressiva da 166 m a 176 m e le sezioni sono caratterizzate da una spaziatura costante pari a 0,5 m.
- ***Strati 131-141:*** Porzione della Galleria "La Turina" conclusiva del modello che occupa la progressiva da 176 m a 200 m e prevede sezioni con spaziatura costante pari a 2 m.

Il modello è quindi composto complessivamente da 1896988 elementi finiti tridimensionali collegati da 962334 nodi; tali elementi presentano caratteristiche termiche differenti in funzione della geometria del modello, il quale è composto da quattro tipologie di materiale differenti:

- ***Calcestruzzo:*** Costituisce il rivestimento delle due gallerie, la struttura

dell'impalcato e delle due spalle del viadotto.

- ***Conglomerato bituminoso:*** Rappresenta la superficie stradale e presenta una pendenza dei cigli pari al 2,5% in quanto si tratta di un rettilineo.
- ***Roccia:*** Caratterizza il terreno circostante dove sono scavate le gallerie.
- ***Aria:*** Gli elementi con le caratteristiche dell'aria sono all'interno delle gallerie, negli spazi cavi dell'impalcato e dove vi è l'aria esterna della vallata.

Le caratteristiche termiche dei materiali sopracitati sono riportate in *Tabella 5-1.*

	Calcestruzzo	Conglomerato Bituminoso	Roccia	Aria
Porosità [-]	0	0	0	1
Conducibilità termica del fluido [J/(msK)]	-	-	-	0,53
Conducibilità termica del solido [J/(msK)]	2,3	0,64	3,5	-
Capacità termica del fluido [MJ/(m^{3}K)]	-	-	-	0,001
Capacità termica del solido [MJ/(m^{3}K)]	2,19	0,92	2,16	-

Tabella 5-1: Caratteristiche termiche dei materiali che compongono il modello.

La mesh è stata generata secondo l'opzione "Grid Builder" e successivamente affinata manualmente nelle aree di interesse, sono riportate a titolo di esempio, rispettivamente in *Figura 5-3, Figura 5-4 e Figura 5-5* alcune sezioni rappresentative della geometria e della mesh delle gallerie, delle spalle e dell'impalcato.

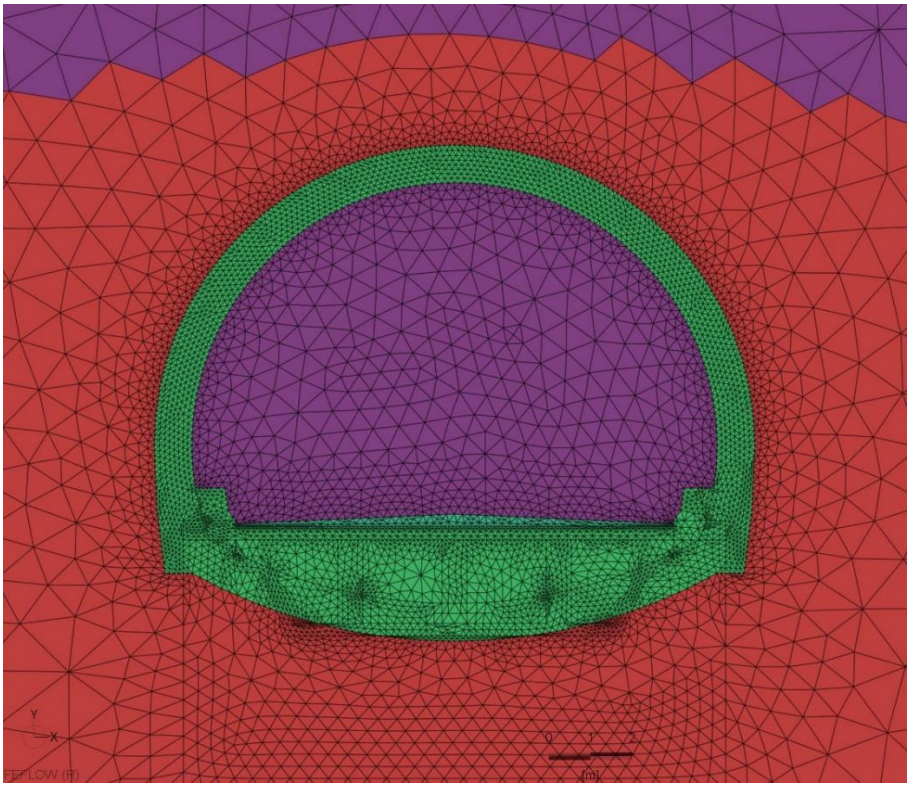

Figura 5-3: Sezione rappresentativa tratta dalla galleria "Craviale".

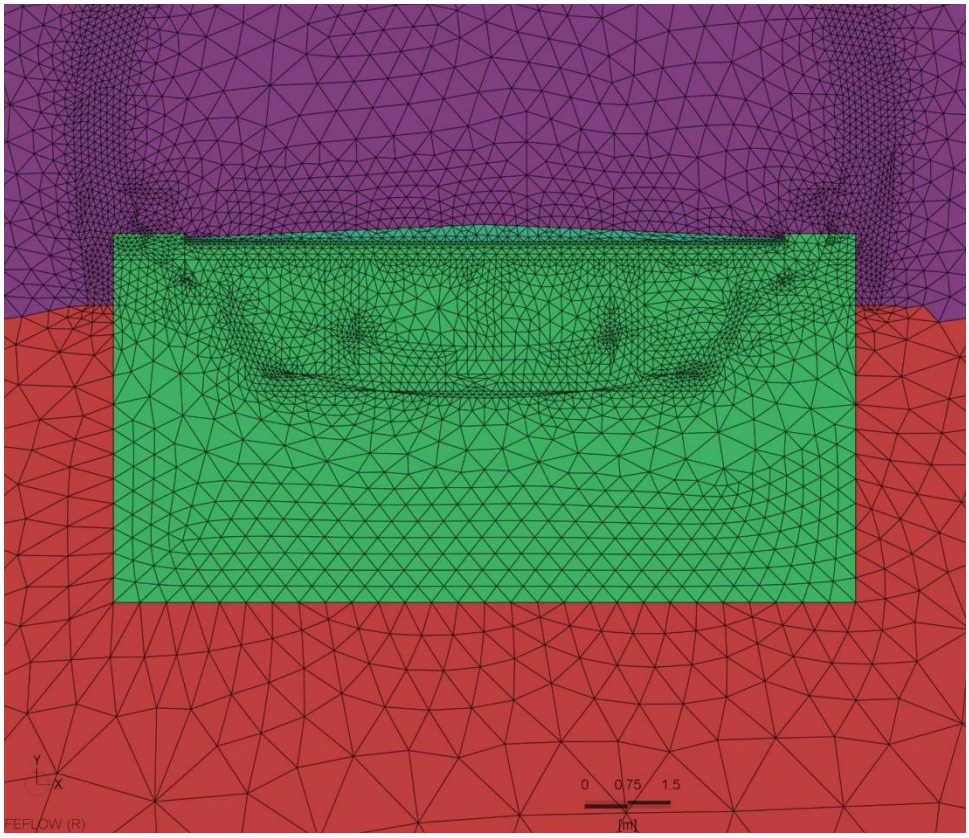

Figura 5-4: Sezione rappresentativa tratta dalla spalla del viadotto "La Turinella".

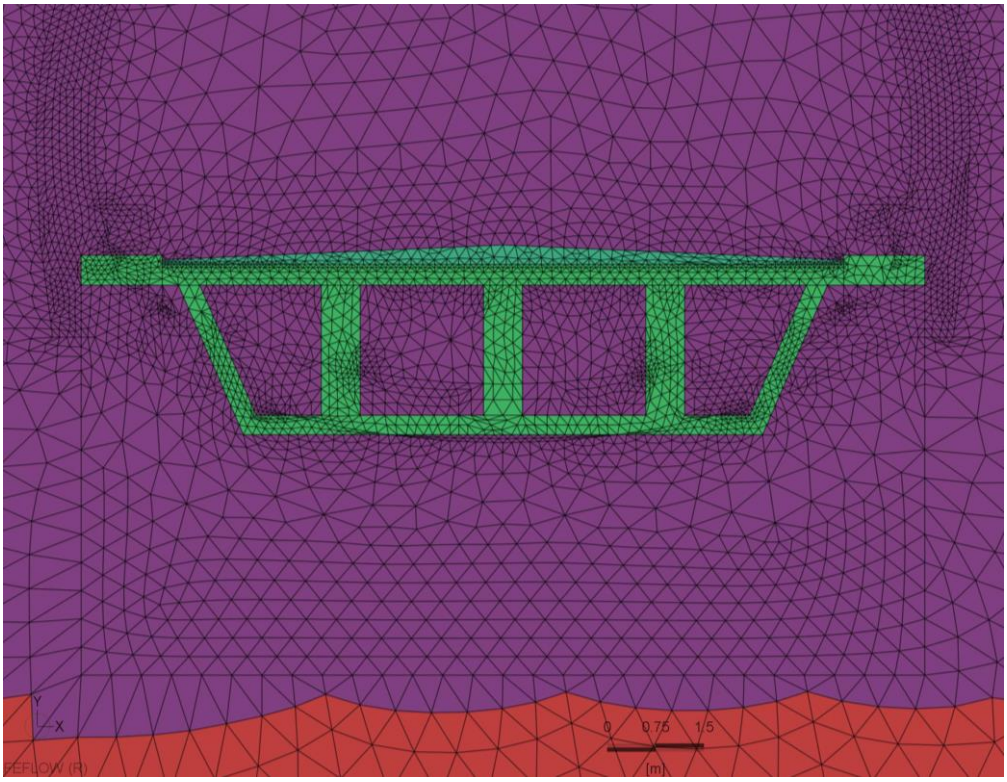

Figura 5-5: Sezione rappresentativa dell'impalcato del viadotto "La Turinella".

L'andamento del terreno che costituisce i versanti della vallata attraversata dal viadotto è stato reso selezionando, sezione per sezione, quali elementi costituiscano la roccia e quali l'aria sulla base dell'andamento delle curve di livello dell'area.
Rispettivamente si possono osservare in *Figura 5-6* e *Figura 5-7* i versanti e le relative pendenze dove sono scavate le gallerie "Craviale" e "La Turina".

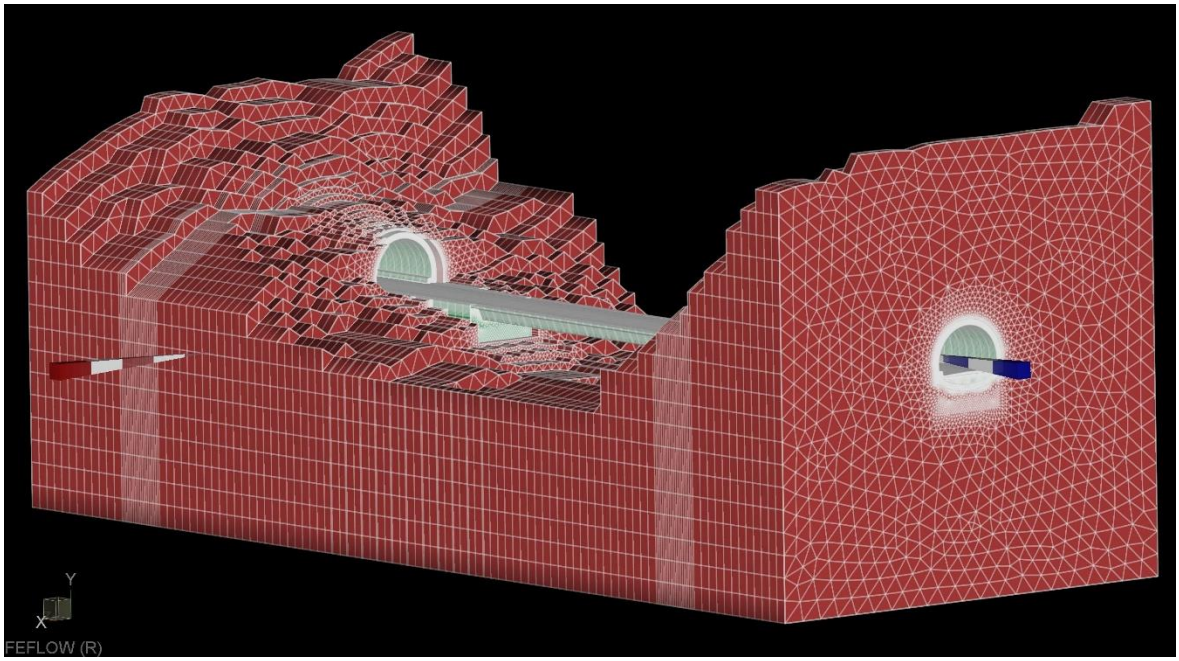

Figura 5-6: Veduta del versante che comprende la galleria "Craviale".

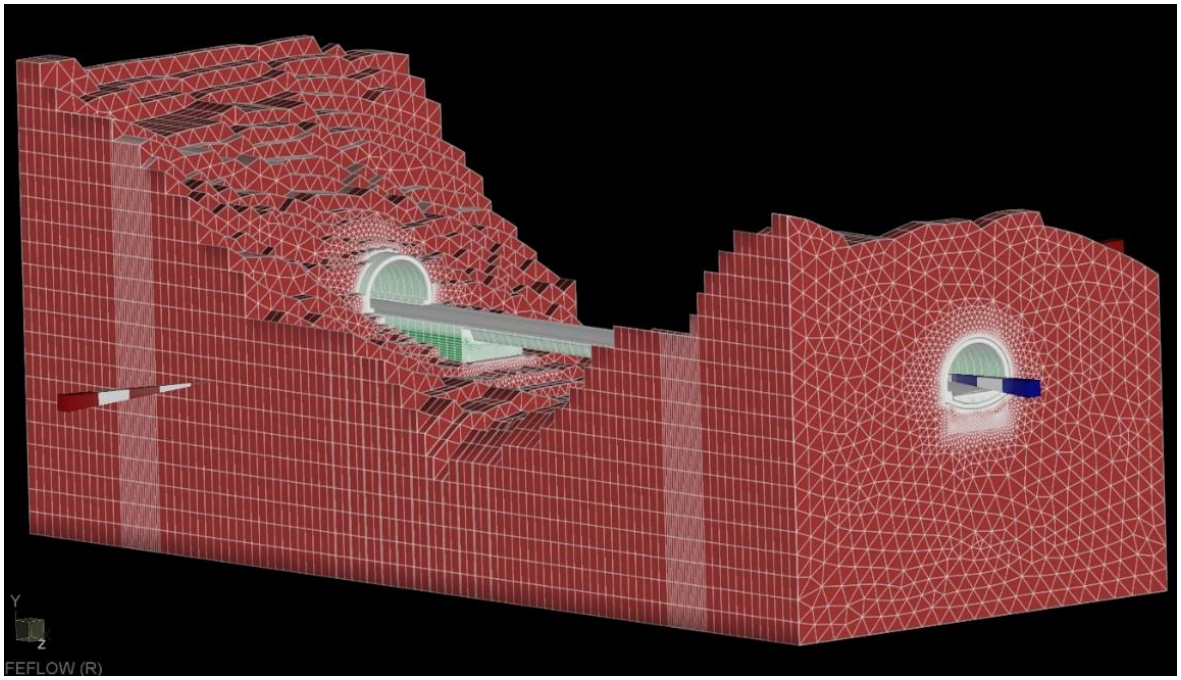

Figura 5-7: Veduta del versante che comprende la galleria "La Turina".

5.3.2 Condizioni al Contorno

Il modello esteso dell'area oggetto di studio non prevede flussi di fluido ma solamente scambi di calore al suo interno, si tratta quindi di un flusso transitorio e le condizioni al contorno relative alla temperatura che sono state applicate sono le seguenti:

- ***Condizione al contorno di temperatura del terreno:*** ai nodi appartenenti alla roccia che costituiscono anche il bordo esterno del modello è stata applicata una temperatura constante per tutta la durata dell'analisi pari a 11,5° C che corrisponde alla temperatura media annuale misurata nel comune di San Germano Chisone.
- ***Condizione al contorno di temperatura dell'aria:*** Ai nodi che costituiscono l'aria esterna del modello, quindi escludendo i nodi che rappresentano le porzioni di aria all'interno della galleria e dell'impalcato, è stato applicato un andamento ciclico nell'arco dell'anno della temperatura tramite l'opzione "Time Series".
  La curva rappresentativa della variazione di temperatura è stata ottenuta interpolando, attraverso il foglio di calcolo *Excel* con un polinomio di sesto grado, la funzione a gradini ottenuta grazie alle temperature medie mensili relative al Comune di San Germano Chisone riportate nel *Paragrafo 4.4*.
  Nel grafico riportato in *Figura 5-8* si può osservare il confronto fra la funzione a gradini derivante dalle temperature medie mensili e la sua interpolazione in arancione che è stata utilizzata come condizione al contorno nel modello.

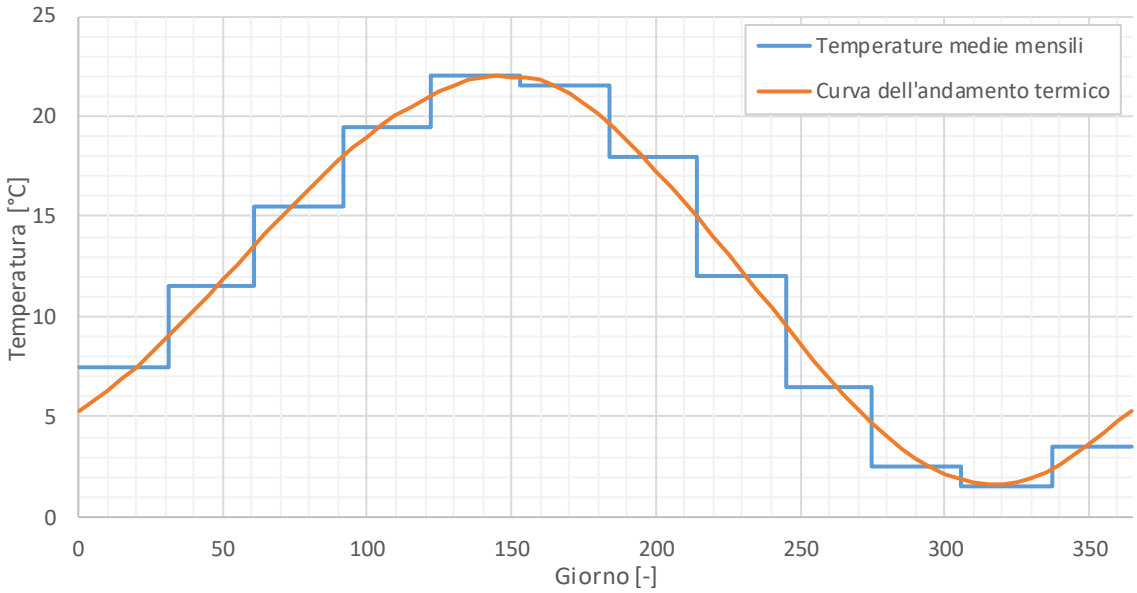

Figura 5-8: Funzioni dell'andamento termico nell'arco di un anno della temperatura misurata nel comune di San Germano Chisone.

Per quanto riguarda le condizioni iniziali del modello è stata fissata una temperatura iniziale di tutti i nodi pari a 11,5°C che corrisponde alla temperatura media annuale del comune dove è situata l'infrastruttura.

A titolo di esempio è riportata in *Figura 5-9* la sezione n.1 con evidenziati i nodi dove sono applicate le rispettive condizioni al contorno di temperatura: nella porzione superiore si possono notare i nodi rappresentativi dell'aria con assegnata la variazione ciclica precedentemente descritta, mentre, sul bordo esterno del modello, i nodi appartenenti agli elementi finiti di roccia con la temperatura costante.

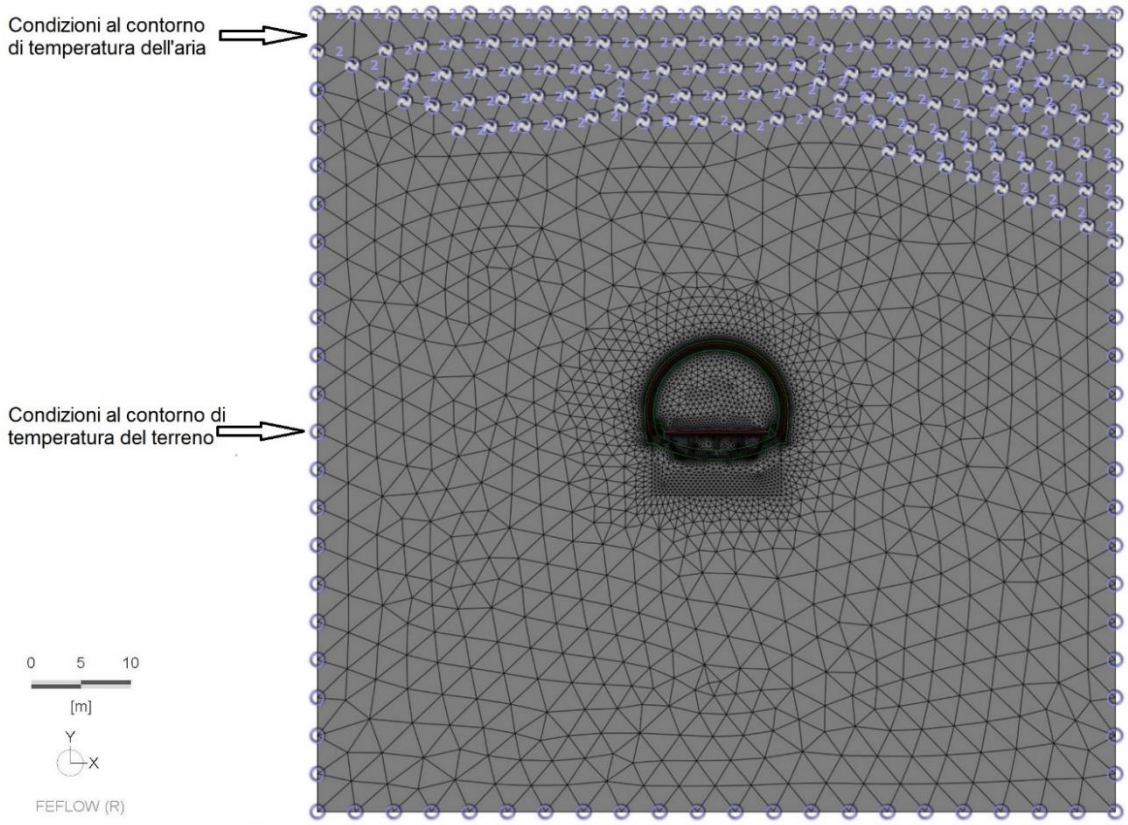

Figura 5-9: Sezione 1 con evidenziate le condizioni al contorno assegnate.

5.3.3 Risultati della Simulazione

5.3.3.1 Variazioni di Temperatura della pavimentazione stradale

La durata complessiva della simulazione è stata fissata pari a 1095 giorni che corrispondono a tre cicli di temperatura annuali. La scelta della durata deriva dalla necessità di poter osservare una risposta termica dell'infrastruttura verosimile in quanto sufficientemente lontana dalle condizioni iniziali del modello.

È stato misurato l'andamento della temperatura in quindici punti, detti punti di osservazione, fissati attraverso la funzione "Observational Points" sulla superficie in conglomerato bituminoso dell'impalcato come illustrato nella *Figura 5-10.*

In particolare i punti di osservazione di ognuna delle cinque sezioni caratteristiche, situate all'inizio, ad un quarto, a metà, a tre quarti e alla fine dell'impalcato, dove è misurata la temperatura, sono stati scelti in quanto:

- ***Punti di osservazione 2, 6, 9, 12, 15:*** sono i punti sulla superficie stradale subito al di sopra del limite sinistro del sistema di serpentine per il de-icing che si vuole studiare tramite il modello.
- ***Punti di osservazione 1, 5, 8, 11, 14:*** sono i punti al centro della carreggiata e di conseguenza, a causa della pendenza dei cigli quelli che si trovano a distanza maggiore dal sistema di riscaldamento.
- ***Punti di osservazione 3, 4, 7, 10, 13:*** sono i punti sulla superficie stradale al di sopra del limite destro del sistema di serpentine per il de-icing.

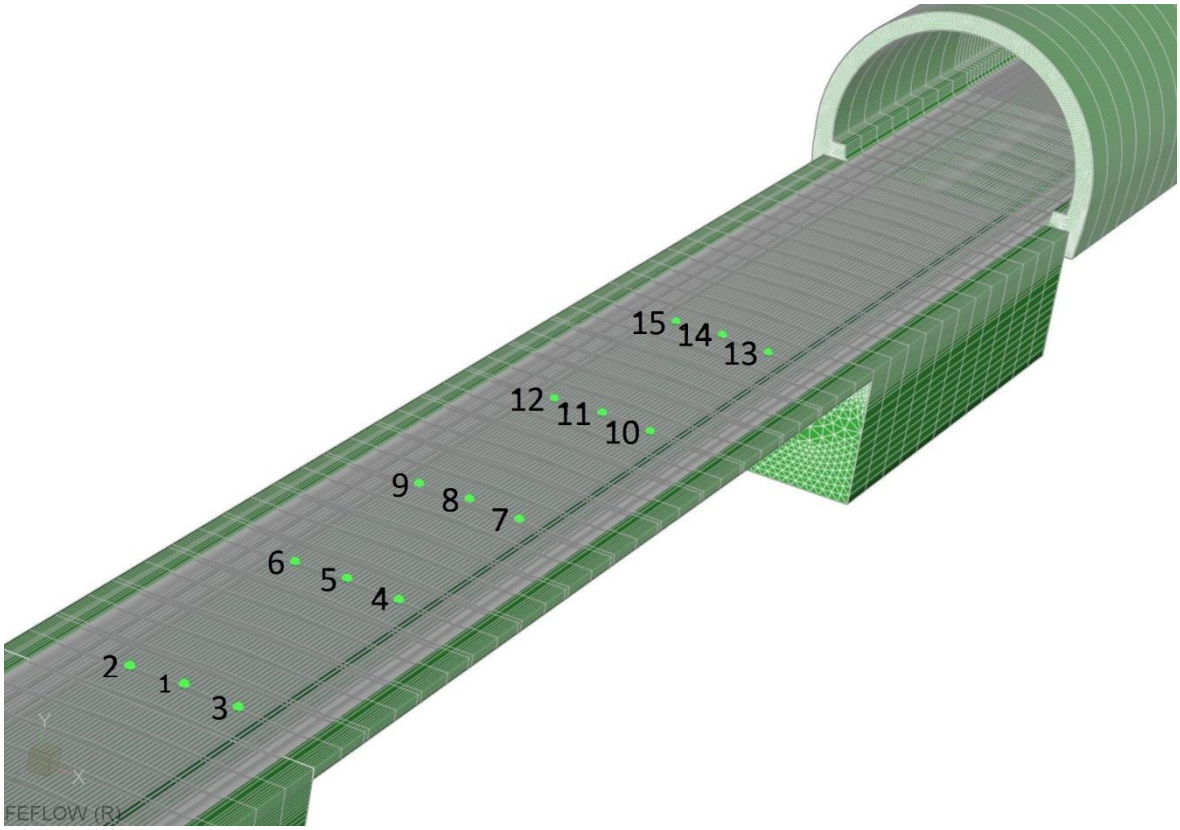

Figura 5-10: Rappresentazione tridimensionale dell'impalcato con evidenziati i punti di osservazione dove è stata misurata la temperatura.

Nei grafici riportati in *Figura 5-11* e *Figura 5-12* è raffigurato rispettivamente l'andamento della temperatura nei punti a sinistra ed al centro dell'impalcato confrontati con l'andamento della temperatura dell'aria esterna per il periodo corrispondente ai mesi invernali del terzo anno della simulazione.
Si può osservare come in entrambi i casi i punti adiacenti alle pile del viadotto subiscano più lentamente la variazione di temperatura dell'aria esterna e come i tre punti più interni presentino un comportamento esattamente identico.
Facendo un confronto fra le due figure si osserva come i punti al centro dell'impalcato cambino la propria temperatura più lentamente rispetto a quelli sinistra ma in entrambi i casi non viene mai raggiunta la temperatura minima dell'aria esterna.

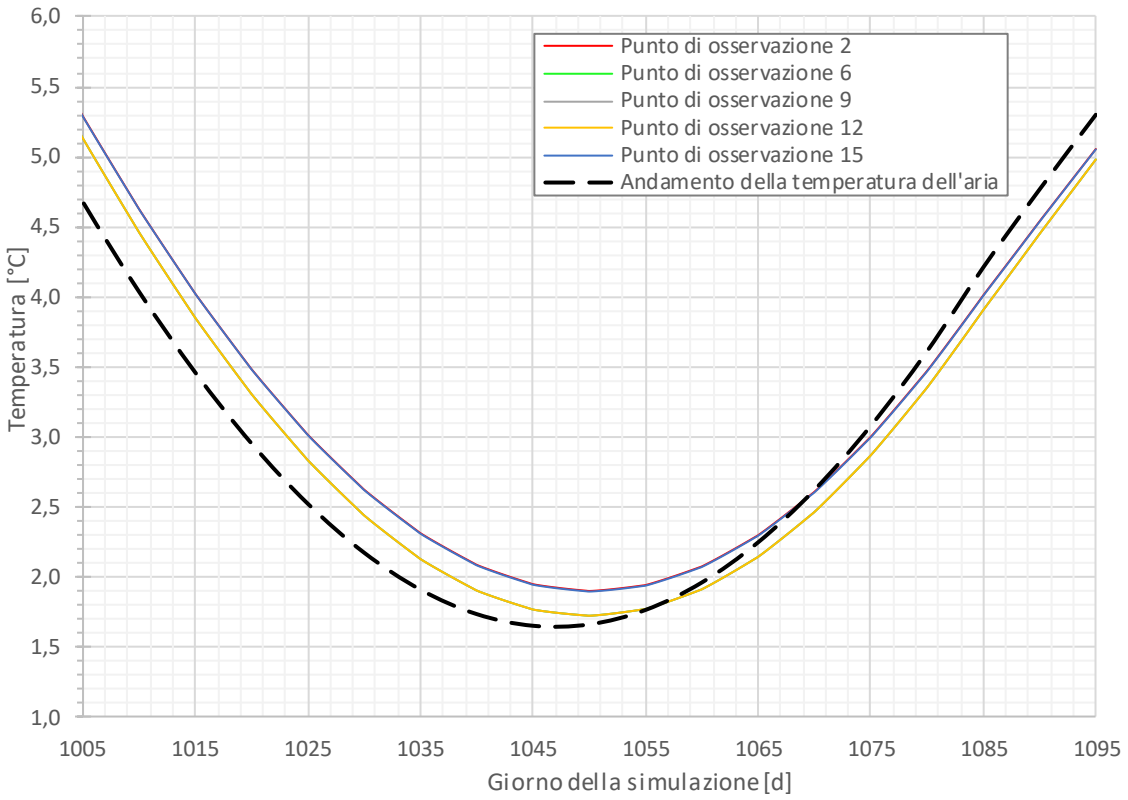

Figura 5-11: Andamento termico durante la stagione invernale misurato nei punti situati sulla sinistra dell'impalcato confrontato con la variazione della temperatura dell'aria.

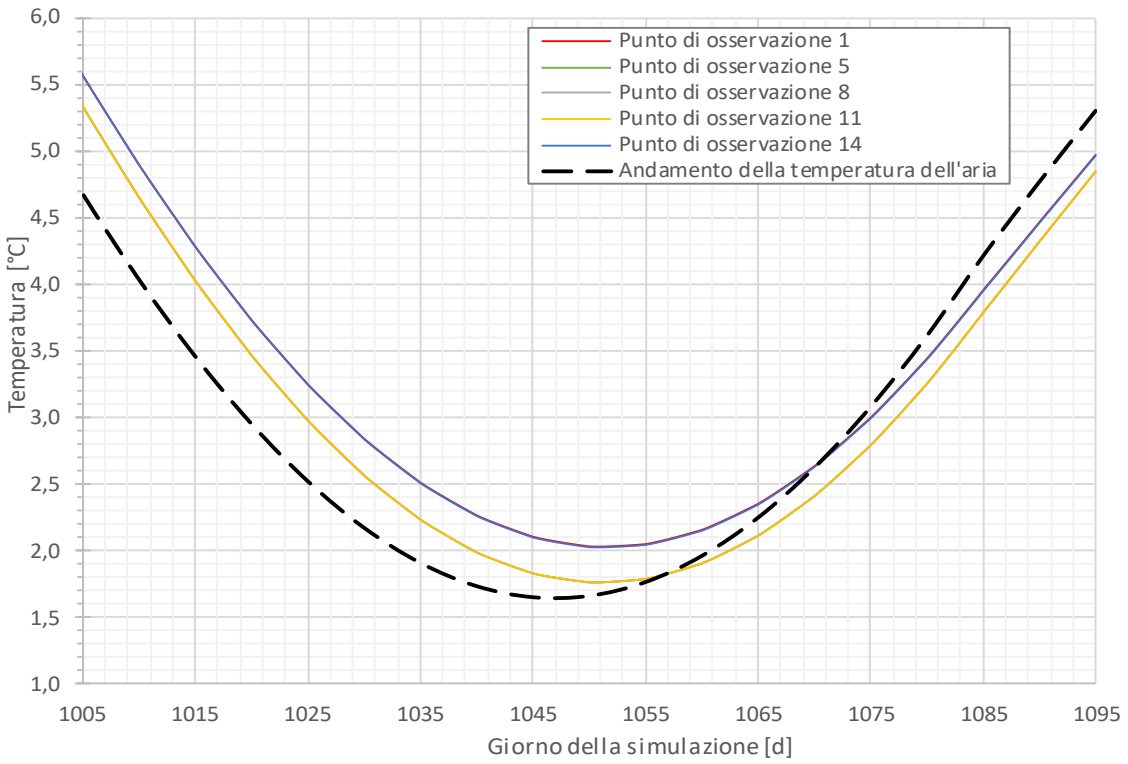

Figura 5-12: Andamento della temperatura durante la stagione invernale misurato nei punti situati al centro dell'impalcato confrontato con la variazione termica dell'aria.

In *Figura 5-13* è raffigurato invece il comportamento dei punti situati sulla destra dell'impalcato, si osserva come gli andamenti termici, per questioni di simmetria, siano uguali a quelli misurati nei punti sulla sinistra; valgono quindi le medesime considerazioni effettuate per il caso precedente.

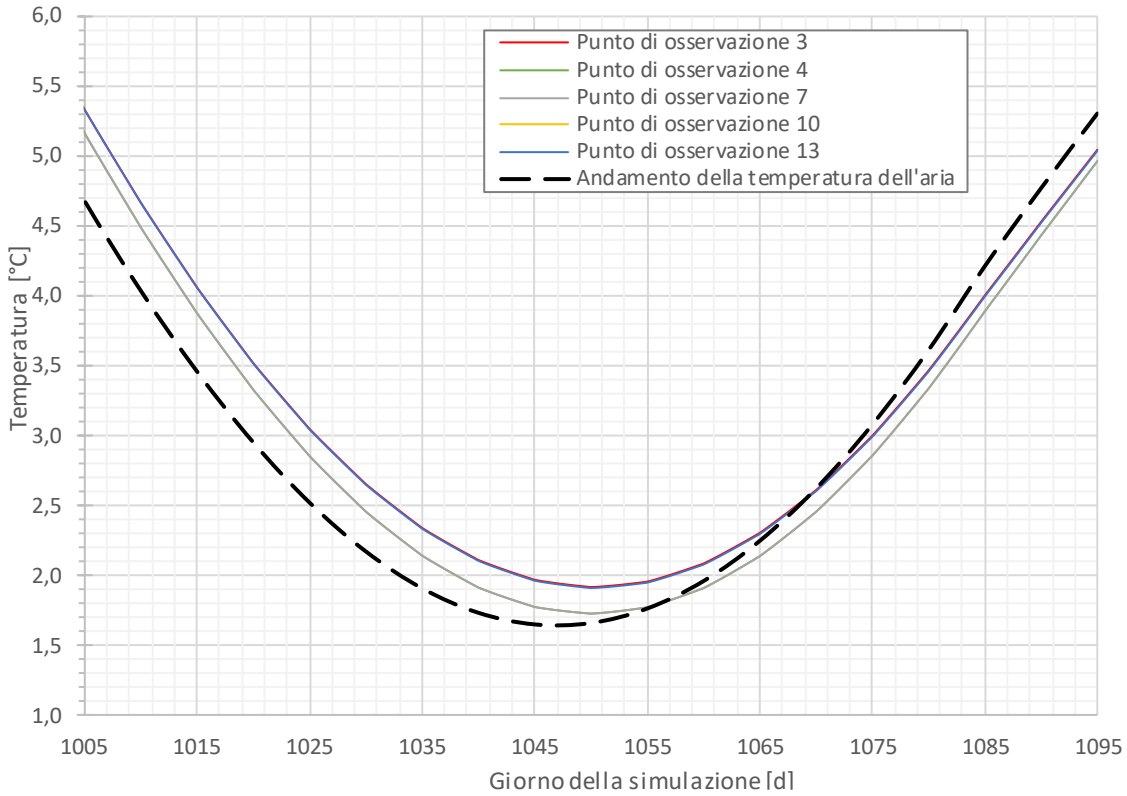

Figura 5-13: Andamento termico durante la stagione invernale misurato nei punti situati sulla destra dell'impalcato confrontato con la variazione della temperatura dell'aria.

5.3.3.2 Variazioni di Temperatura nel Rivestimento delle gallerie

Al fine di decidere a che profondità rispetto all'ingresso dei due tunnel posizionare il primo anello della galleria energetica è stato misurato l'andamento della temperatura nell'arco di tre anni di simulazione in tre punti del rivestimento.
Si è ricercato a quale distanza progressiva del modello l'oscillazione fra la temperatura massima e la minima nei punti del rivestimento dove è stata misurata, dovuta alle variazioni termiche stagionali dell'aria esterna, è inferiore a 1°C e quindi può essere considerata trascurabile.

È importante infatti che la galleria energetica sia istallata in una porzione del rivestimento la cui temperatura non subisca eccessive variazioni stagionali in quanto, in caso contrario, l'apporto di calore che è possibile estrarre dal terreno durante la stagione invernale dipenderebbe troppo dalla temperatura dell'aria esterna e risulterebbe quindi notevolmente ridotto in caso di prolungati periodi di freddo con la conseguente perdita di efficacia del sistema.

È stata inizialmente misurata la temperatura nell'arco della simulazione nelle sezioni delle gallerie, ognuna con tre punti di osservazione, riportate in *Tabella 5-2.*

Galleria "Craviale"			
Sezione	**Progressiva [m]**	**Distanza dalla superficie [m]**	**Punto di osservazione**
Sezione 13	24	11	16-17-18
Sezione 23	29	9	19-20-21
Sezione 33	34	7	22-23-24

Galleria "La Turina"			
Sezione	**Progressiva [m]**	**Distanza dalla superficie [m]**	**Punto di osservazione**
Sezione 110	166	13	25-25-27
Sezione 120	171	16	28-29-30
Sezione 130	176	20	31-32-33

Tabella 5-2: Sezioni dove è stata misurata la temperatura, relativi punti di osservazione e distanza fra il punto più alto della galleria e la superficie.

Per ogni sezione analizzata i tre punti di osservazione fissati corrispondono ai punti più bassi dell'arco dove è previsto il passaggio del tubo con all'interno il fluido termovettore ed al suo punto più in alto. A titolo di esempio se ne può osservare la posizione nel rivestimento, nella *Figura 5-14* rappresentativa della sezione 23.

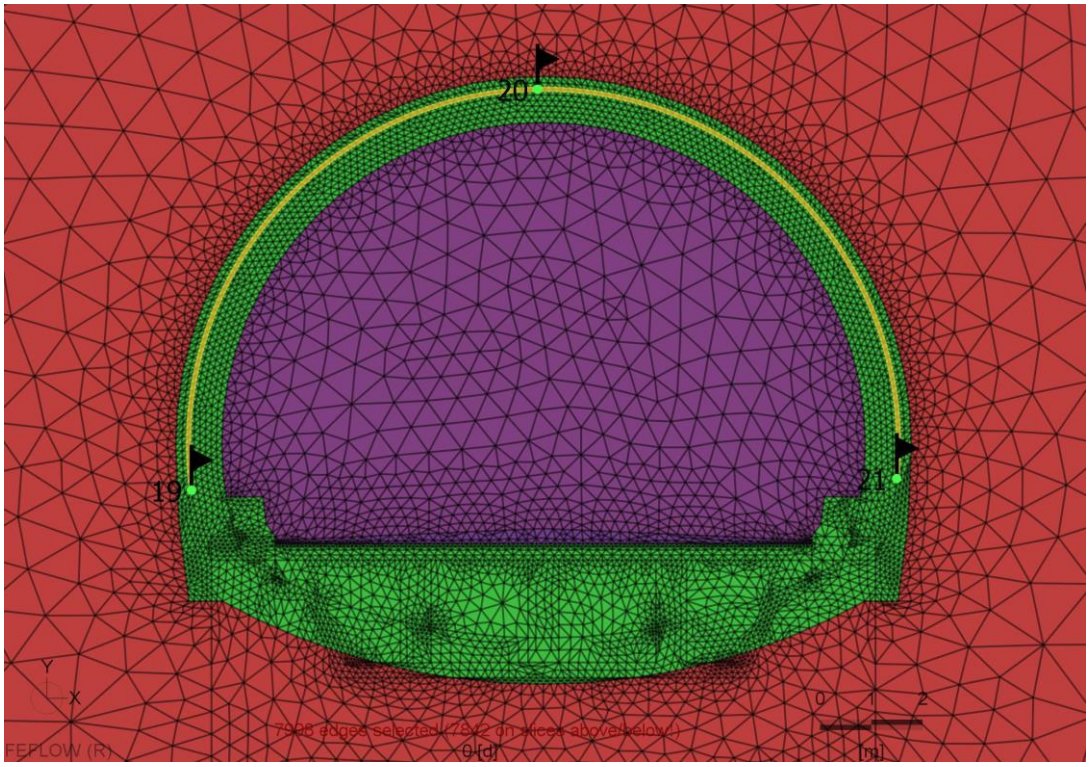

Figura 5-14: Posizione dei tre punti di osservazione per la misura dell'andamento termico all'interno del rivestimento di una sezione tipo analizzata.

GALLERIA "CRAVIALE"

Nella galleria "Craviale" sono state misurate, nell'arco dei tre anni di simulazione, le variazioni di temperatura riportate nei grafici in *Figura 5-15, Figura 5-16 e Figura 5-17* rispettivamente delle sezioni 33, 23 e 13.

In ogni grafico il punto di osservazione alla sommità dell'arco tracciato dal tubo è identificato dalla curva azzurra, quello in basso a sinistra dalla curva nera ed infine quello in basso a destra dalla curva verde.

Si può inizialmente osservare come in ogni caso la variazione annuale sia sempre massima nel punto situato al centro in quanto è posizionato più vicino alla superficie del pendio.

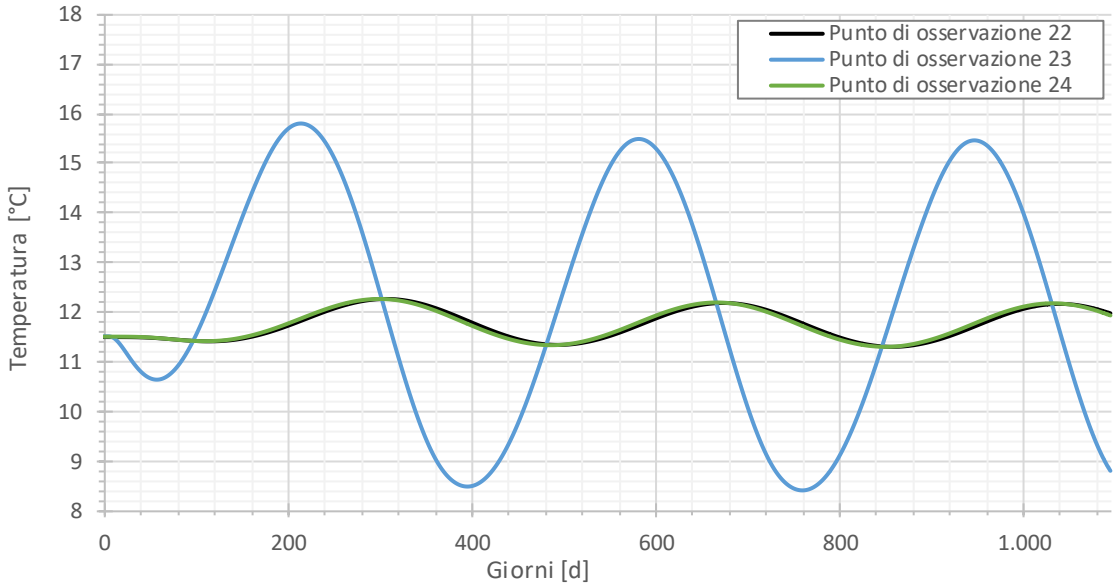

Figura 5-15: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 33.

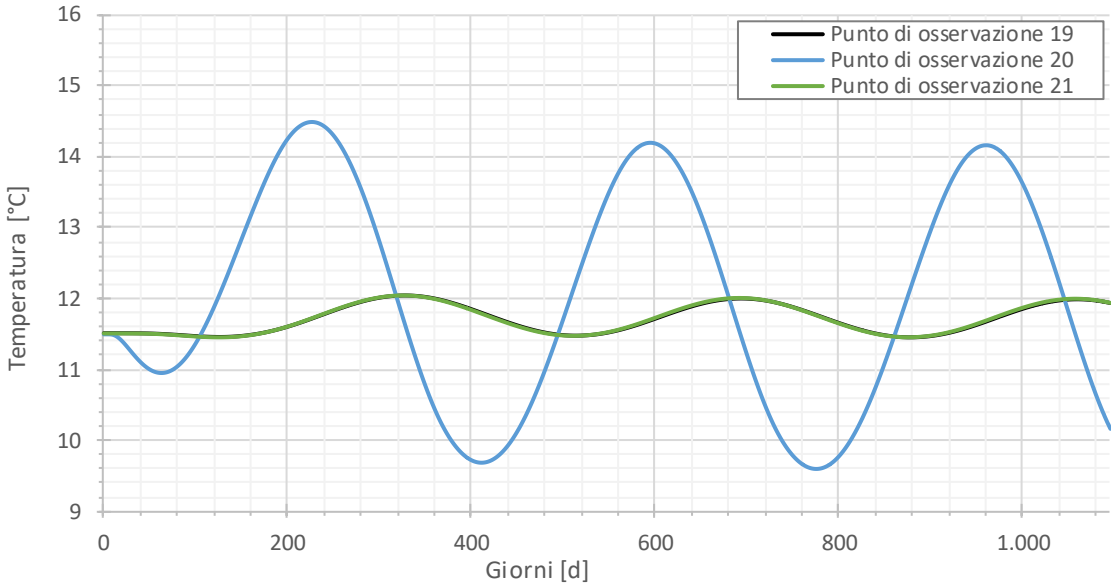

Figura 5-16: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 23.

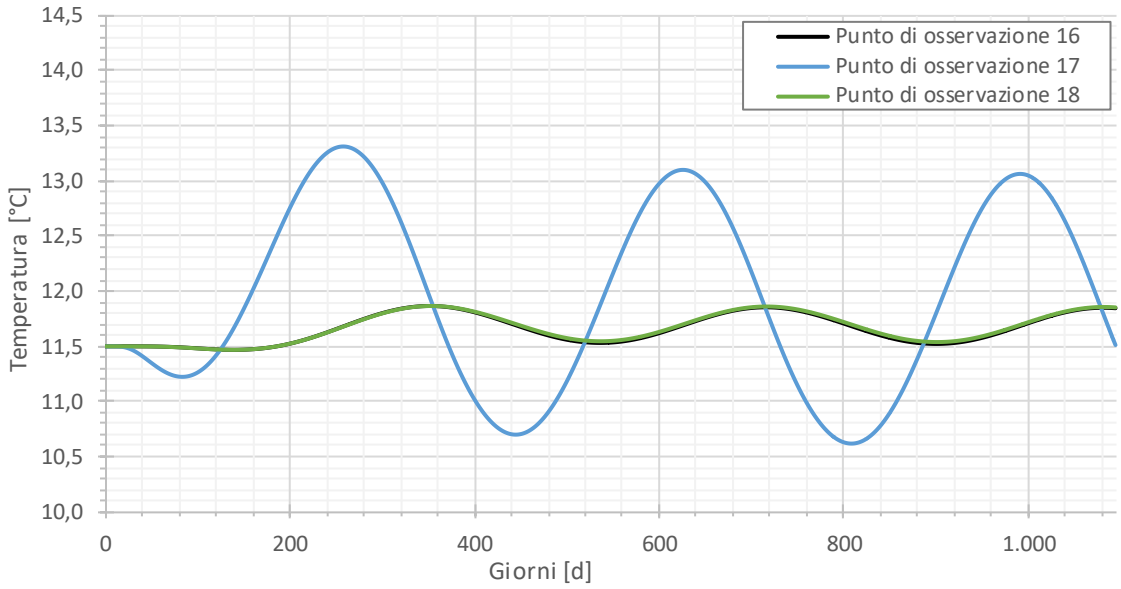

Figura 5-17: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 13.

Si è misurato come nessuna sezione nel punto più alto sia esente da un'influenza piuttosto marcata della temperatura esterna, in particolare l'oscillazione in tale punto varia fra il massimo e il minimo rispettivamente di 7°C, 4,5°C e 2,5°C per le sezioni 33, 23, 13 e quindi non ottimale all'istallazione della galleria energetica.
Al contrario i punti più bassi presentano sempre un comportamento analogo in ogni sezione e un'oscillazione termica sempre inferiore ad 1°C.

Viene quindi analizzata un'ulteriore sezione, (sezione 10) posizionata alla distanza progressiva di 18 m dove la galleria si trova a 15 m dalla superficie, il cui andamento termico nei punti di osservazione è illustrato in *Figura 5-18*.

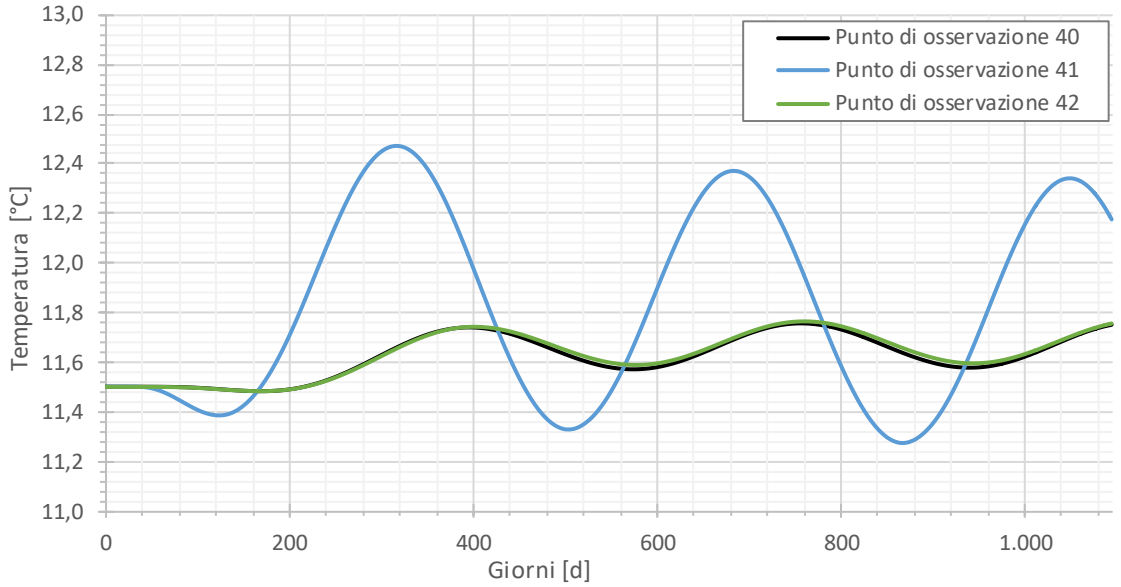

Figura 5-18: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 10.

In questo caso la variazione massima nel punto più alto si attesta intorno ad 1°C, vi è quindi un'influenza ridotta da parte della temperatura dell'aria esterna.

Operando un confronto fra gli andamenti di temperatura nei punti più sollecitati termicamente di ogni sezione relativa alla galleria "Craviale", riportato nella *Figura 5-19* si può concludere quindi che, a partite dalla sezione 10 verso l'interno della galleria, vi siano le condizioni ottimali per l'istallazione di una galleria energetica.

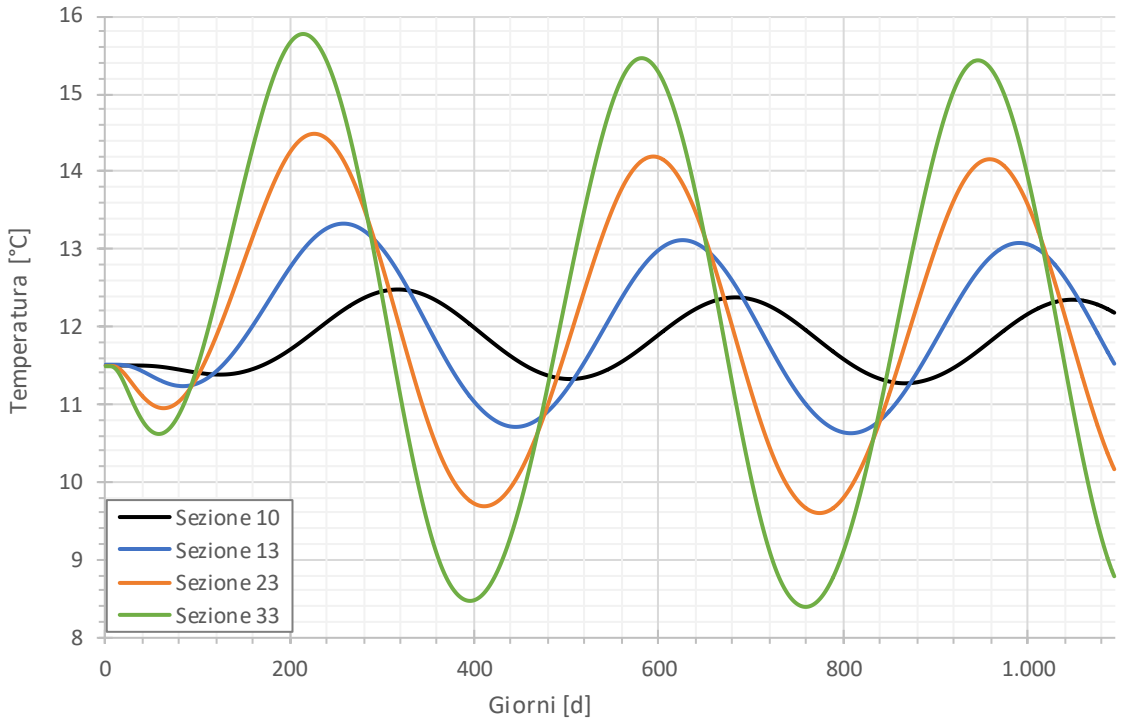

Figura 5-19: Andamento termico nel punto alla sommità di dove passa l'arco nel rivestimento nelle sezioni analizzate della galleria "Craviale".

A titolo di esempio è riportato, in *Figura 5-20,* l'andamento della temperatura nel terreno misurato nella sezione 10 alla fine della simulazione, ovvero l'ultimo giorno di febbraio e quindi della stagione invernale.
Si può osservare come i 10 metri intorno al rivestimento della galleria non presentino temperature al di sotto della media annuale tipica del comune di San Germano Chisone ma che siano al contrario interessate da una fascia di temperatura maggiore dovuta alla lentezza di propagazione del calore estivo nelle profondità del terreno.

Tale comportamento è ulteriormente confermato dal grafico riportato in *Figura 5-18*, relativo all'andamento termico nella sezione 10, dove si può notare come le temperature misurate negli ultimi 90 giorni della simulazione appartengano alla porzione delle diverse curve intorno al loro massimo.

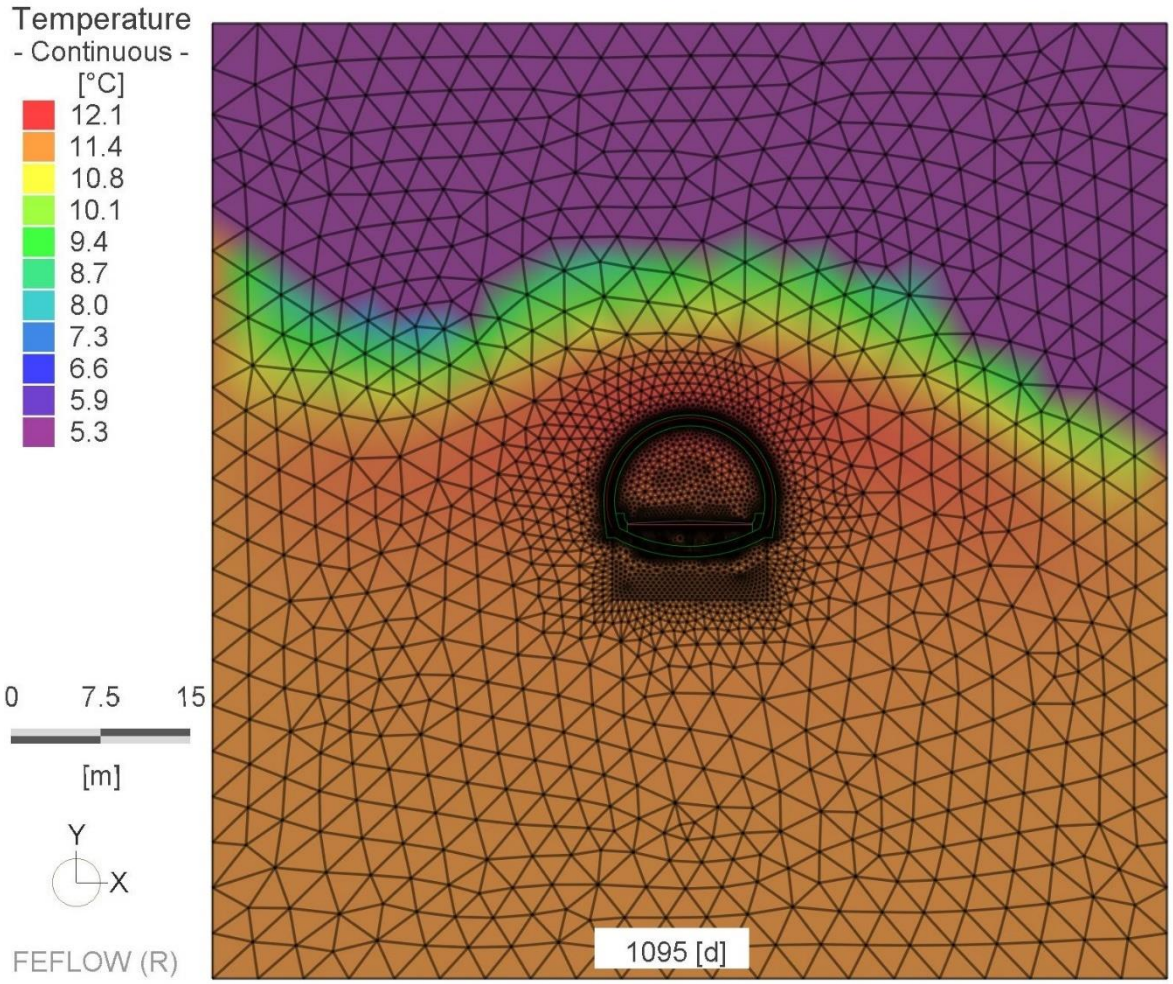

Figura 5-20: Andamento termico nel terreno circostante la galleria "Craviale" a fine simulazione relativo alla sezione 10.

GALLERIA "LA TURINA"

Per quanto riguarda invece la galleria "La Turina" sono state ottenute le variazioni di temperatura riportate nei grafici in *Figura 5-21, Figura 5-22* e *Figura 5-23* rispettivamente delle sezioni 110, 120 e 130.

Anche in questo caso la curva azzurra identifica la temperatura misurata nel punto di osservazione centrale situato alla sommità dell'arco tracciato dal tubo, la curva nera quello in basso a sinistra ed infine la curva verde quello in basso a destra.

Si può osservare come le tre curve presentino comportamenti differenti; ciò è dovuto al fatto che lo spessore del terreno al di sopra dei punti di osservazione sia diverso in ogni caso.

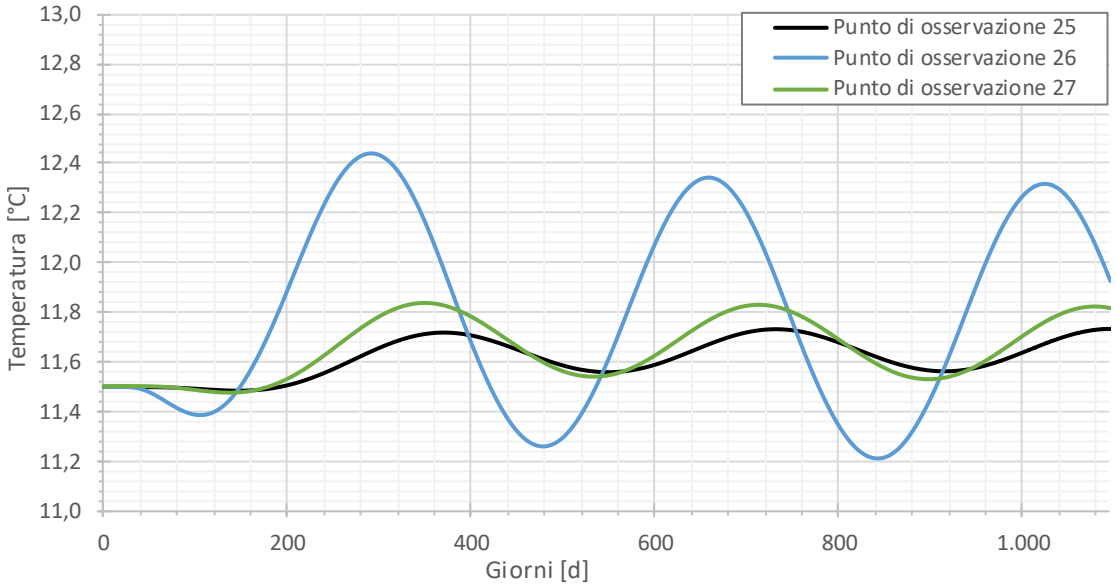

Figura 5-21: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 110.

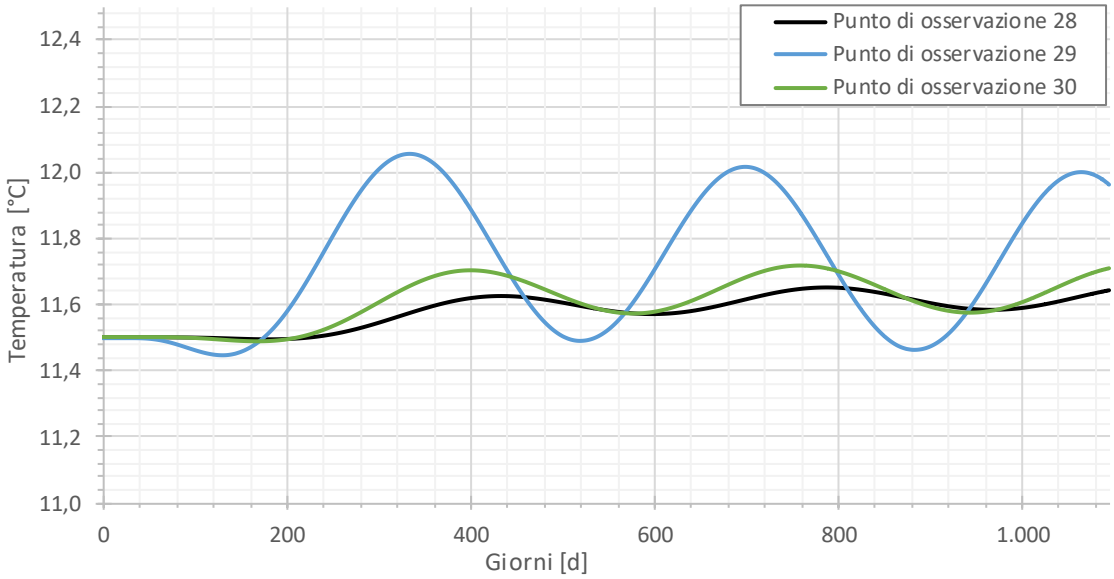

Figura 5-22: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 120.

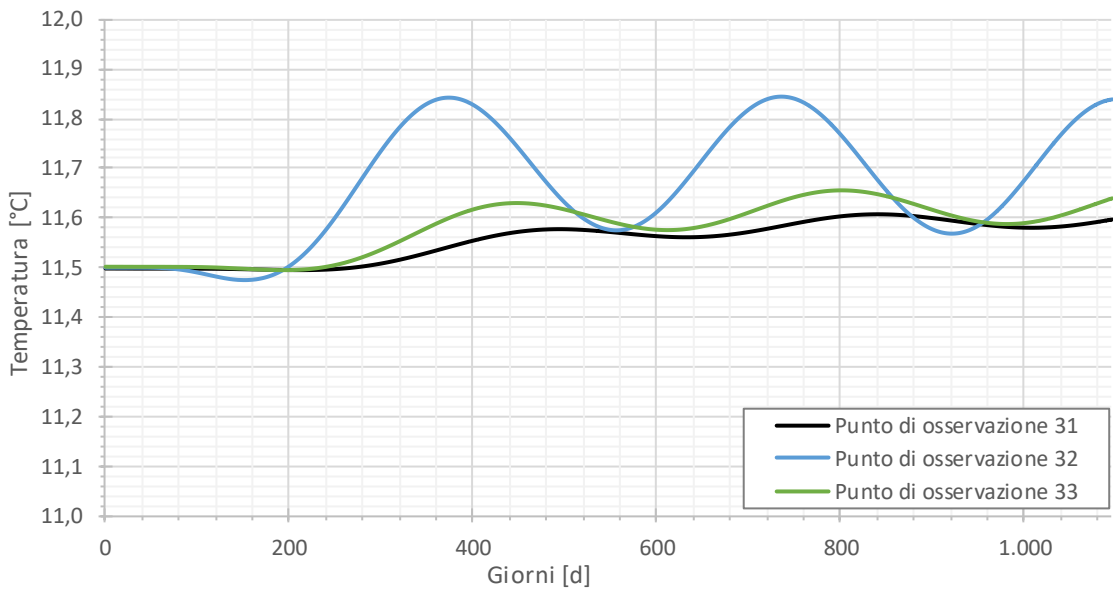

Figura 5-23: Andamento termico nel rivestimento nella sezione 130.

Nel caso della galleria "La Turina" già all'altezza della sezione 120 la variazione stagionale di temperatura nel punto più alto è inferiore a 1°C quindi è possibile istallare gli scambiatori di calore nel rivestimento a partire da tale sezione.
Sono state misurate infatti, oscillazioni fra il massimo e il minimo della curva nel punto centrale, maggiormente suscettibile alle variazioni di temperatura dell'aria esterna, rispettivamente di 1,1°C, 0,6°C e 0,3°C per le sezioni 110, 120, 130 e ne è riportato un confronto nella *Figura 5-24*.

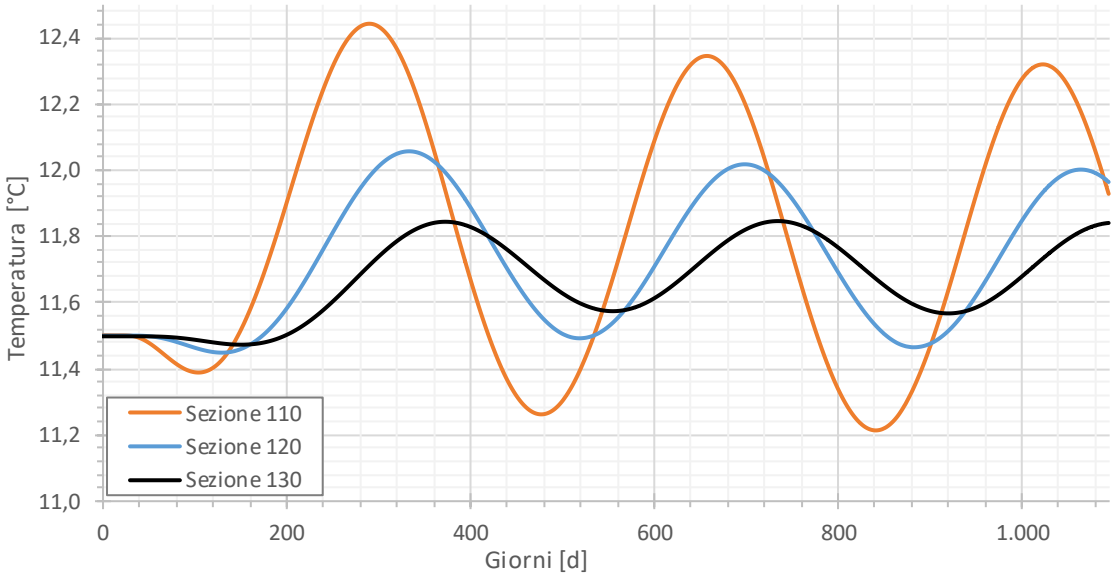

Figura 5-24: Andamento termico nel punto alla sommità di dove passa l'arco nel rivestimento nelle sezioni analizzate della galleria "La Turina".

Si può quindi concludere che la galleria "La Turina" rispetto alla galleria "Craviale" sia maggiormente indicata per l'istallazione di un sistema di gallerie energetiche grazie al maggiore spessore di terreno soprastante che la caratterizza nella porzione a ridosso del viadotto.

A titolo di esempio è riportato, in *Figura 5-25,* l'andamento termico nel terreno calcolato nella sezione 120 che è stato ottenuto alla fine della stagione invernale e quindi al giorno 1095 della simulazione.
Si può osservare come i 10 metri intorno al rivestimento della galleria "La Turina" non presentino variazioni di temperatura significative e si mantengano invece prossime alla media annuale tipica del comune di San Germano Chisone.
Analogamente a quanto accade nella galleria "Craviale" vi è uno spessore di terreno caratterizzato da una temperatura leggermente maggiore, circa 11,9 °C dovuta alla lentezza di propagazione del calore derivante dalla stagione estiva nelle profondità del terreno.
Tale comportamento è ulteriormente confermato dal grafico riportato in *Figura 5-22* che descrive l'andamento termico della sezione 120, si può infatti notare come le temperature misurate negli ultimi 90 giorni della simulazione, relativi alla stagione invernale, siano crescenti.

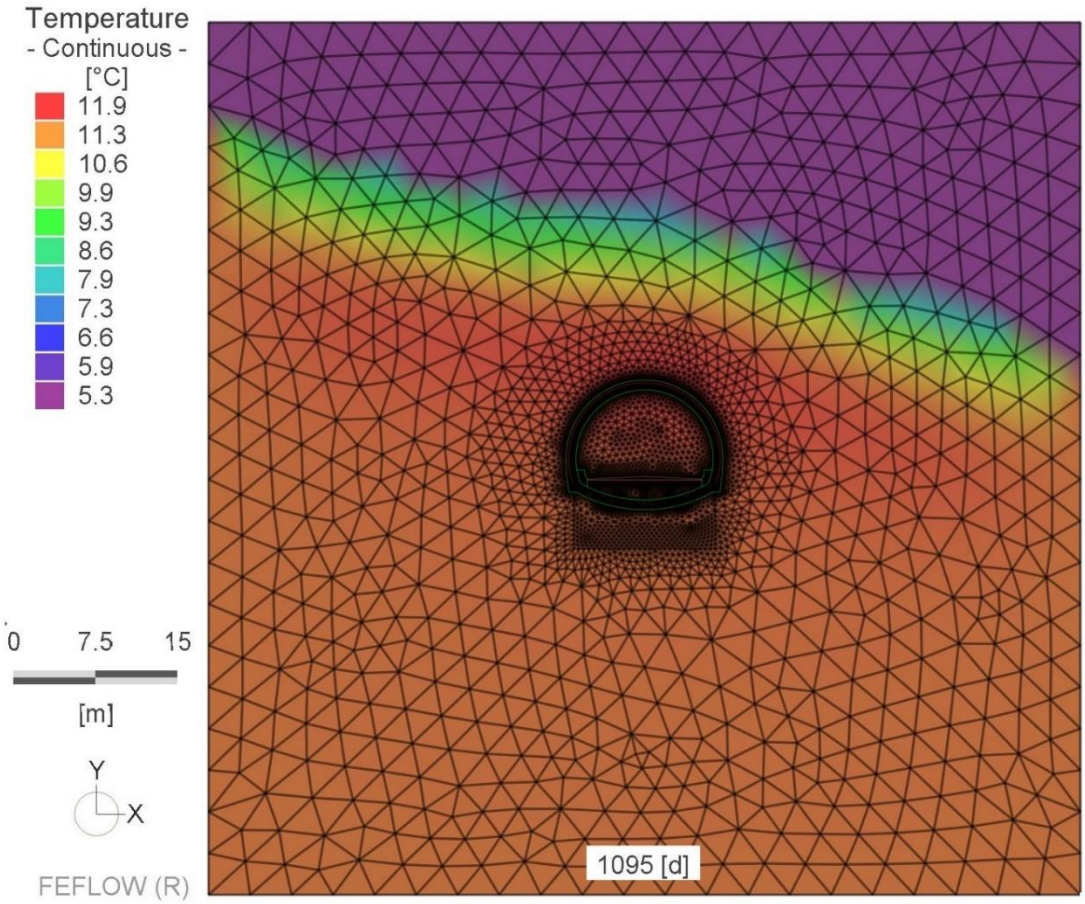

Figura 5-25: Andamento termico nel terreno circostante la galleria "Craviale" a fine simulazione relativo alla sezione 120.

5.4 SIMULAZIONE DELLA GALLERIA ENERGETICA

La galleria energetica modellata nello studio è composta da un quattro circuiti di serpentine indipendenti che a loro volta possono essere divise in tre differenti porzioni, come illustrato in *Figura 5-26*:

- ***Parte nell'impalcato:*** Le corsie di marcia, per una larghezza totale del sistema di 7,8 m, dei 50 m di lunghezza dell'impalcato sono interamente percorse da quattro serpentine indipendenti con spaziatura dei tubi di 30 cm ognuna delle quali serve una superficie totale di 7,8 m x 12 m. Ogni serpentina è posizionata 5 cm all'interno del calcestruzzo che compone la base per il conglomerato bituminoso dell'impalcato.
- ***Parte nella spalla:*** Tratto del sistema lineare di collegamento fra le porzioni dei circuiti indipendenti nella galleria dove viene attinto il calore e quelle nell'impalcato dove viene disperso.
- ***Parte nella galleria:*** I tubi creano in ognuna delle gallerie due circuiti di serpentine ad arco che sono a loro volta collegati con due delle quattro serpentine nell'impalcato, sono posizionati nei 90 cm di rivestimento a 25 cm dal terreno e hanno una spaziatura fra gli archi di 0,50 m.

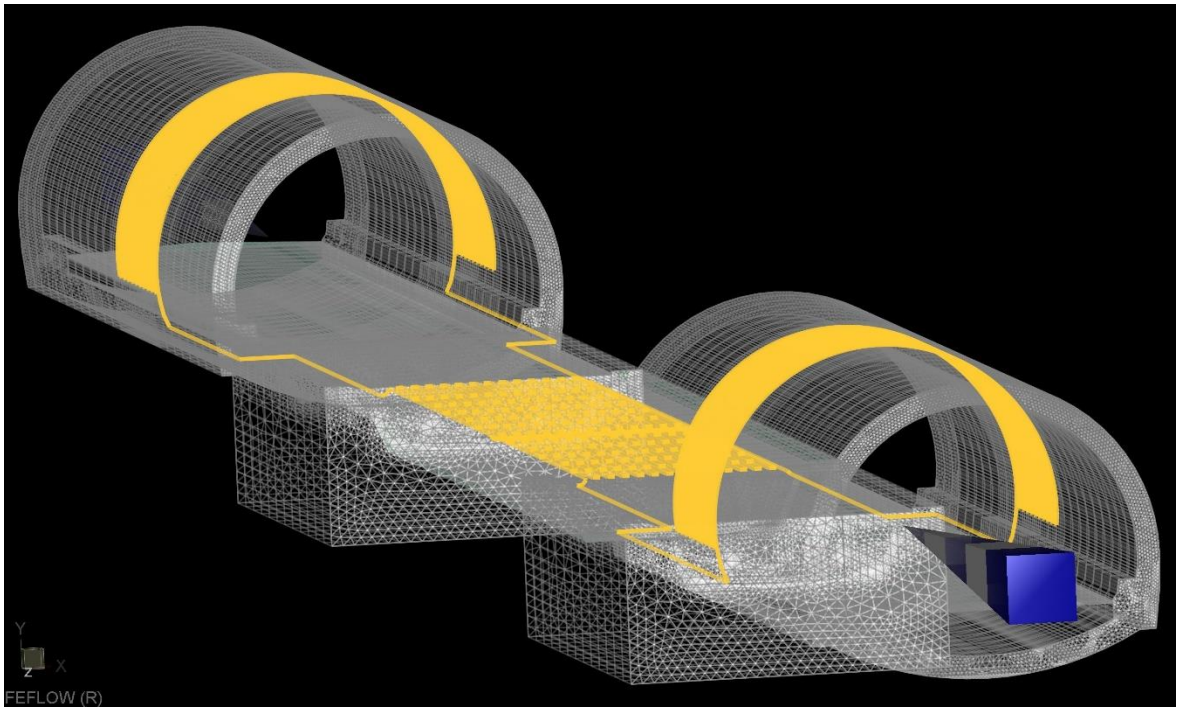

Figura 5-26: Rappresentazione tridimensionali dell'infrastruttura dove sono visibili le tre porzioni del sistema di serpentine previste a progetto.

Ognuno dei quattro circuiti indipendenti è chiuso ed è collegato ad una pompa per il ricircolo del fluido termovettore al suo interno; non è invece prevista una pompa di calore per aumentarne la temperatura prima che venga impiegato per il de-icing dell'impalcato.

Per la modellazione di uno dei quattro circuiti indipendenti che compongono il sistema geotermico, di cui verrà studiata l'efficacia, si è optato per la divisione del modello in tre porzioni autonome, rappresentative rispettivamente della porzione in galleria, nella spalla e nell'impalcato del viadotto; ciò si è reso necessario per simulare il fatto che il circuito complessivo sia chiuso. Poiché la galleria energetica è posizionata abbastanza in profondità nella porzione di galleria non è considerata l'influenza dell'aria esterna e di conseguenza il modello è valido per entrambi i tunnel.
La simulazione, caratterizzata da una durata di 30 giorni, prevede sette passaggi nei quali viene misurata la temperatura variabile del fluido termovettore in uscita dalla porzione di modello coinvolta.
In ogni passaggio, ad eccezione del primo, la temperatura variabile di uscita del fluido termovettore dal circuito viene utilizzata come condizione al contorno di temperatura del fluido stesso in ingresso nel passaggio successivo.
Alla fine del settimo passaggio, sulla base delle temperature misurate, verrà deciso se effettuare ulteriori passaggi nel processo iterativo descritto.
In *Tabella 5-3* sono riportati, per ognuno dei passaggi sopracitati della simulazione, la porzione di modello coinvolta, la temperatura di input del fluido termovettore utilizzata e le variabili misurate.

	Porzione del modello coinvolta	**Temperatura di input del fluido termovettore [°C]**	**Variabile misurata**
Passaggio 1	Galleria	1,5	Temperatura di output del fluido termovettore
			Temperature lungo la serpentina
Passaggio 2	Spalla	Temperatura di output del fluido del passaggio 1.	Temperatura di output del fluido termovettore
Passaggio 3	Impalcato	Temperatura di output del fluido del passaggio 2.	Temperatura di output del fluido termovettore
			Temperature lungo la serpentina
			Temperature sulla superficie stradale
Passaggio 4	Spalla	Temperatura di output del fluido del passaggio 3.	Temperatura di output del fluido termovettore
Passaggio 5	Galleria	Temperatura di output del fluido del passaggio 4.	Temperatura di output del fluido termovettore
			Temperature lungo la serpentina
Passaggio 6	Spalla	Temperatura di output del fluido del passaggio 5.	Temperatura di output del fluido termovettore
Passaggio 7	Impalcato	Temperatura di output del fluido del passaggio 6	Temperatura di output del fluido termovettore
			Temperature lungo la serpentina
			Temperature sulla superficie stradale

Tabella 5-3: Descrizione riassuntiva dei passaggi della simulazione.

5.4.1 Geometria e Caratteristiche dei Modelli Ridotti

5.4.1.1 Galleria

La porzione di modello che vuole rappresentare la galleria ed il terreno circostante è un parallelepipedo con una sezione 40 m x 40 m e con profondità 15 m. È composta da un totale di 49950 elementi collegati da 30726 nodi suddivisi in 31 sezioni con spaziatura costante pari a 0,5 m di cui, fra la sezione 11 e la 21, sono posizionati i tubi della serpentina come illustrato nella *Figura 5-27*.

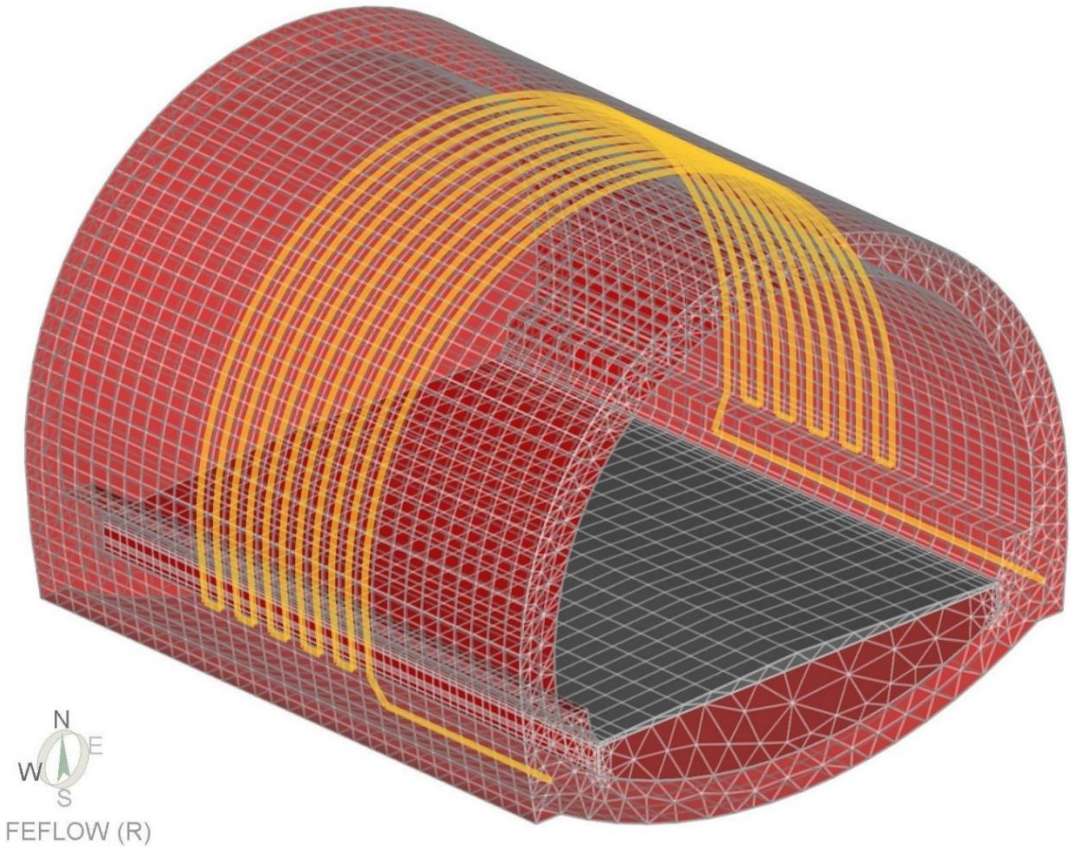

Figura 5-27: Porzione del modello rappresentativa della galleria e della relativa serpentina.

Le caratteristiche dei materiali sono analoghe a quelle del modello precedente e riportate in *Tabella 5-1* mentre i tubi in polietilene con diametro Φ32 sono stati modellati come elementi "Discrete Features" dalle caratteristiche termiche riportate in *Tabella 5-4*:

	Tubi in polietilene
Porosità [-]	1
Conducibilità termica del fluido [J/(msK)]	0,38
Conducibilità termica del solido [J/(msK)]	-
Capacità termica del fluido [MJ/(m^{3}K)]	2,16
Capacità termica del solido [MJ/(m^{3}K)]	-

Tabella 5-4: Caratteristiche termiche dei tubi in polietilene.

5.4.1.2 Spalla del ponte

Si è scelto di modellare la spalla più lunga fra le due ovvero quella adiacente alla galleria "Craviale" la cui lunghezza totale è di 26 m.

La presente porzione di modello si compone 26 strati dallo spessore costante pari a 1 m, formate da 35829 nodi e 66768 elementi.

Le caratteristiche dei materiali che compongono il modello sono analoghe ai precedenti e quindi riportate in *Tabella 5-1* e *Tabella 5-4*.

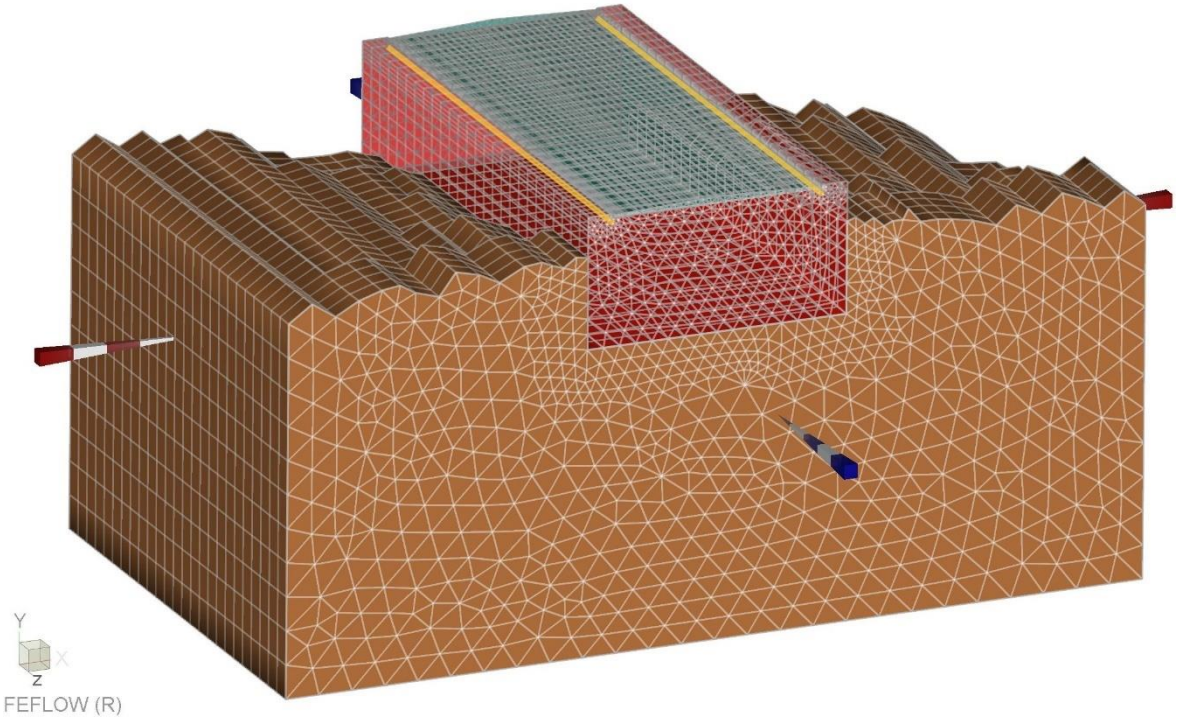

Figura 5-28: Rappresentazione tridimensionale di una spalla del ponte, del terreno circostante e del relativo tratto lineare di tubo in polietilene di andata e ritorno dall'impalcato.

5.4.1.3 Impalcato del ponte

La porzione di impalcato lunga 13 m che è stata riprodotta nel modello è formata da 17633 nodi e 31680 elementi che vanno a comporre 16 strati con spaziatura variabile in funzione della geometria della serpentina che si è costruita.

In *Figura 5-29* si può osservare come i 13 m di impalcato serviti da uno dei quattro sistemi di riscaldamento indipendenti siano a loro volta coperti da tre serpentine consecutive che ne innervano rispettivamente 4 m l'una.

Nella prima sezione del modello è posizionato sulla sinistra il punto di ingresso del fluido termovettore nel circuito mentre sulla destra quello di uscita.

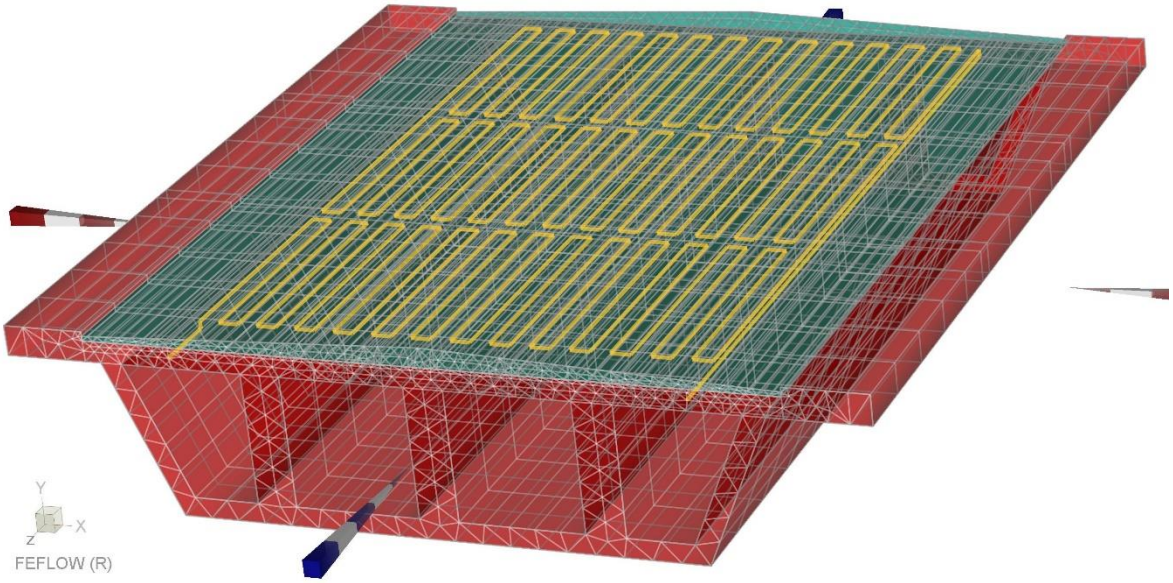

Figura 5-29: Porzione del modello rappresentativa dell'impalcato e della relativa serpentina.

5.4.2 Condizioni al Contorno

5.4.2.1 Galleria

La porzione di modello rappresentativa della galleria e del relativo circuito del fluido termovettore prevede l'imposizione delle seguenti condizioni al contorno:

- ***Condizione al contorno di temperatura del terreno:*** Ai nodi di terreno che costituiscono il bordo esterno del modello è stata applicata una temperatura constante per tutta la durata dell'analisi pari a 11,5° C che corrisponde alla temperatura media annuale dell'area studiata. Non vengono considerate le variazioni stagionali della temperatura del terreno in quanto il sistema, come precedentemente dimostrato, è istallato all'interno nel rivestimento ad una profondità (15 m per la "Craviale" e 16 per "La Turina") tale che non vi siano apprezzabili variazioni di temperatura nell'arco dell'anno. L'aria all'interno della galleria è in quiete.
- ***Condizione al contorno di temperatura del fluido termovettore:*** Nel primo passaggio del processo iterativo è stata scelta una temperatura di ingresso del fluido pari a 1,5°C corrispondente alla temperatura media mensile più bassa registrata, caratteristica del mese di gennaio. Nel quinto passaggio invece si applica la temperatura variabile di uscita del fluido termovettore dalla spalla calcolata al passaggio 4.
- ***Condizioni al contorno di flusso del fluido termovettore:*** Nel nodo di ingresso del fluido nel modello, situato sulla sinistra insieme alla condizione sulla temperatura, è stata fissata una condizione al contorno di flusso costante pari a -0,4 m/s, che per la convenzione del software FEFLOW sta ad indicare un flusso entrante nel modello.
  Nel nodo di uscita del circuito invece è applicato un flusso uscente pari a 0,4 m/s, non sono quindi previste perdite di carico all'interno della serpentina.

La temperatura iniziale di tutti i nodi del modello è stata invece posta a 11,5°C, pari alla temperatura media annuale del comune di San Germano Chisone.

A titolo di esempio sono riportate in *Figura 5-30* le condizioni al contorno di temperatura applicate alla prima sezione del modello.

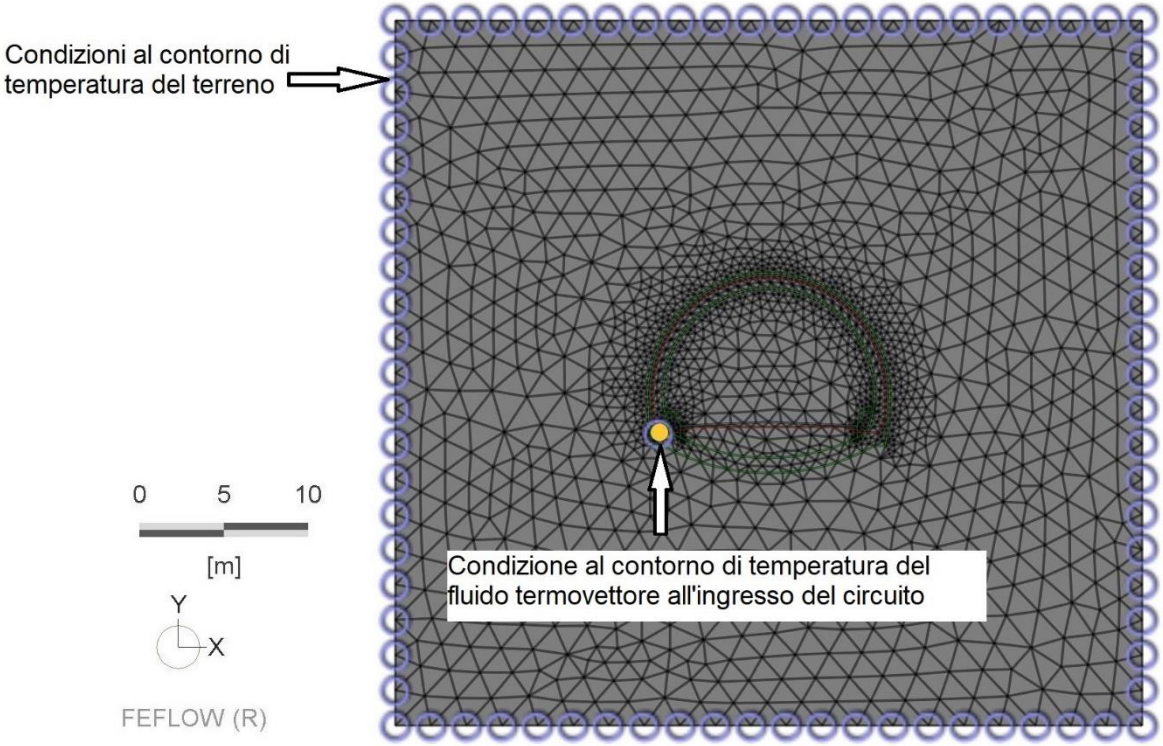

Figura 5-30: Porzione del modello che rappresenta la galleria con evidenziate le condizioni al contorno di temperatura imposte.

5.4.2.2 Spalla del ponte

Al modello che rappresenta la spalla del ponte vengono applicate le seguenti condizioni al contorno di flusso e temperatura:

- ***Condizione al contorno di temperatura del terreno:*** Ai nodi appartenenti al terreno che costituiscono il bordo esterno del modello è stata applicata una temperatura constante per tutta la durata dell'analisi pari a 11,5° C che coincide con la temperatura media annuale.
- ***Condizione al contorno di temperatura dell'aria:*** Ai nodi rappresentativi dell'aria è stata applicata una temperatura costante pari a -3°C che corrisponde alla temperatura media giornaliera minima del mese di gennaio, che risulta essere il più freddo.
- ***Condizione al contorno di temperatura del fluido termovettore:*** Nei due punti di ingresso del fluido nella spalla viene utilizzata la temperatura di uscita variabile del fluido dalla galleria calcolata nei passaggi 2 e 6 e quella di uscita dall'impalcato nel passaggio 5.

- ***Condizioni al contorno di flusso del fluido termovettore:*** Nei nodi di ingresso del fluido nel modello, insieme alla condizione sulla temperatura, è stata fissata una condizione al contorno di flusso costante pari a -0,4 m/s mentre in quelli di uscita pari a 0,4 m/s.

La temperatura iniziale dei nodi di terreno del modello è stata posta a 11,5°, pari alla temperatura media annuale dell'area oggetto di studio mentre di quelli della spalla pari a 1,5° che è la media mensile del mese più freddo.
A titolo di esempio sono riportate in *Figura 5-31* le condizioni al contorno di temperatura evidenziate sulla prima sezione della spalla del ponte.

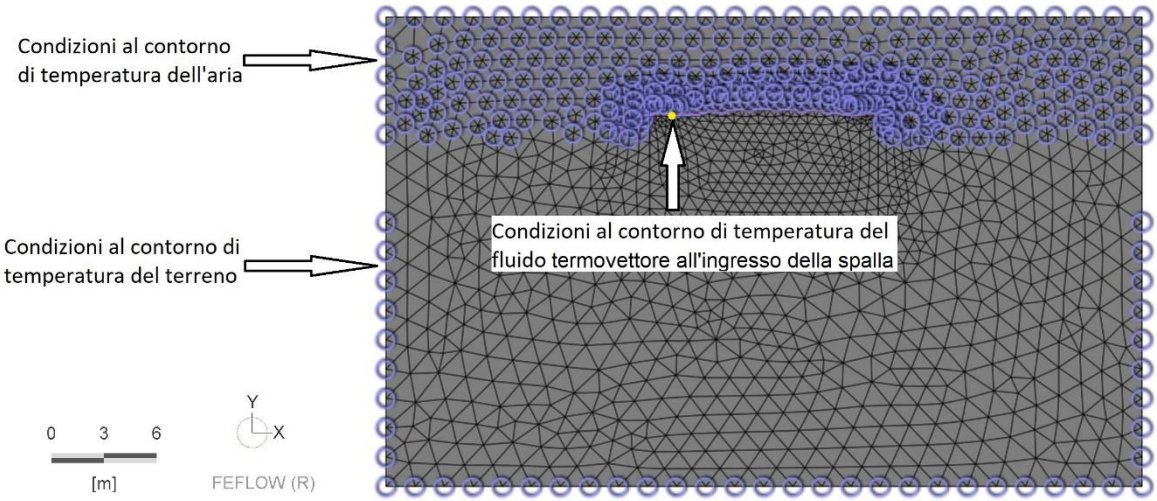

Figura 5-31: Porzione del modello che rappresenta la spalla del viadotto con evidenziate le condizioni al contorno di temperatura imposte.

5.4.2.3 Impalcato del ponte

Il modello ridotto rappresentativo della porzione di impalcato del viadotto di interesse prevede il fissaggio delle seguenti condizioni al contorno:

- ***Condizione al contorno di temperatura dell'aria:*** Ai nodi rappresentativi dell'aria esterna all'impalcato è stata applicata una temperatura costante pari a -3°C che corrisponde alla minima media giornaliera del mese più freddo.
- ***Condizione al contorno di temperatura del fluido termovettore:*** Viene utilizzata come temperatura di ingresso del fluido termovettore nella serpentina situata sotto la superficie stradale la temperatura variabile di uscita dalla spalla del fluido stesso ottenuta nel passaggio precedente.
- ***Condizioni al contorno di flusso del fluido termovettore:*** Nel nodo di ingresso del fluido nel modello, insieme alla condizione sulla temperatura iniziale, è stata fissata una condizione al contorno di flusso entrante pari a -0,4 m/s mentre in quello di uscita pari a 0,4 m/s.

La temperatura iniziale dei nodi dell'impalcato e delle sue parti cave all'interno è stata posta

pari a 1,5° che corrisponde alla temperatura media mensile del mese più freddo.
In *Figura 5-32* sono evidenziate le condizioni al contorno di temperatura che sono state assegnate alla prima sezione del modello.

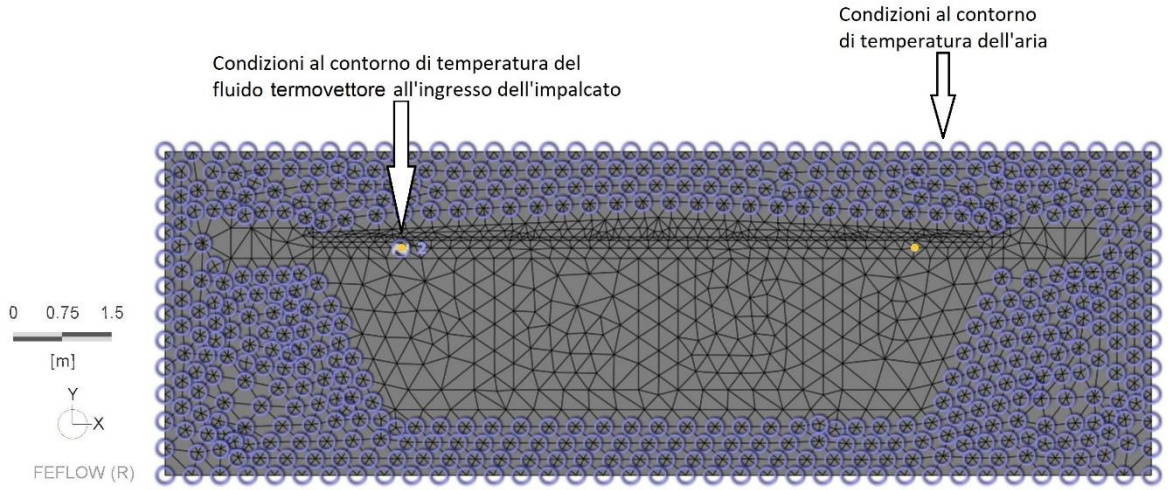

Figura 5-32: Porzione del modello rappresentativa dell'impalcato con evidenziate le condizioni al contorno di temperatura imposte.

La scelta di applicare all'impalcato e alla spalla del viadotto una temperatura pari a 1,5°C all'istante iniziale della simulazione è giustificata dal fatto che la serpentina oggetto di studio si trovi in entrambe le porzioni del modello ad una profondità tale da non risentire in maniera significativa delle variazioni di temperatura giornaliere dell'aria; lo si è desunto da quanto è emerso dalla seguente analisi.

Al modello dell'impalcato, senza che vi circoli all'interno il fluido termovettore è stata applicata una variazione giornaliera dell'aria di temperatura fra la massima di 6°C e la minima di -3°C, relative al mese di gennaio, come riportato nella *Figura 5-33* ed è stata effettuata una simulazione con una durata complessiva pari a 30 giorni.

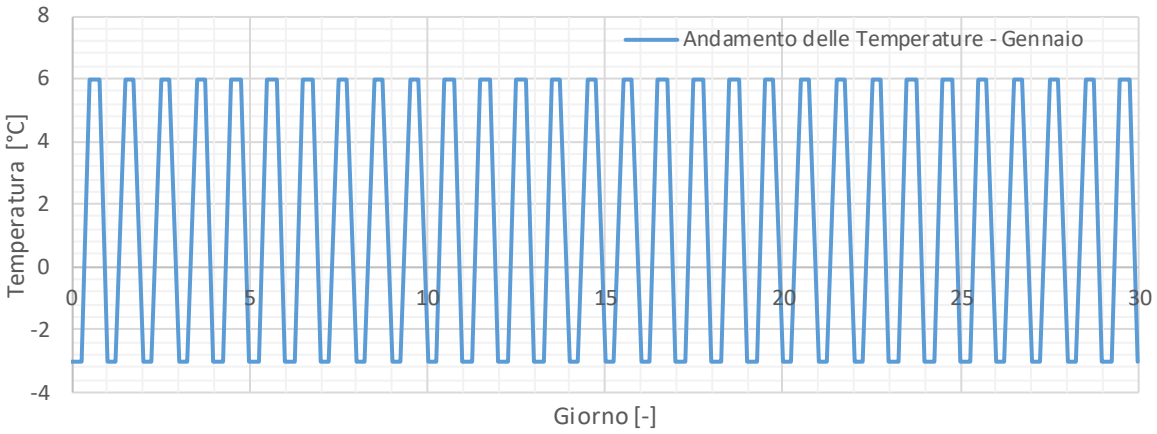

Figura 5-33: Andamento delle temperature nel mese di gennaio.

È stato misurato l'andamento termico in corrispondenza del sistema per il de-icing in due punti: uno in posizione centrale dell'impalcato e l'altro sul bordo laterale della serpentina e i risultati ottenuti sono riportati nella *Figura 5-34*.

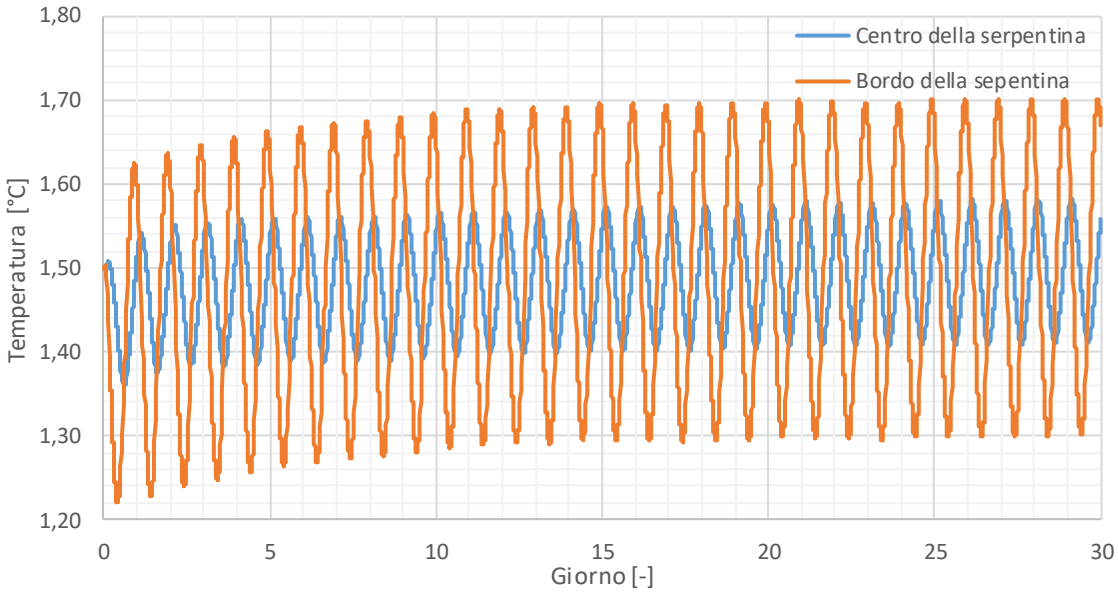

Figura 5-34: Andamento delle temperature nell'arco di un mese in corrispondenza del centro e del bordo della serpentina.

Si può osservare come entrambe le curve, dopo una perturbazione nei primi cicli giornalieri dovuta alle condizioni iniziali, si stabilizzino in un andamento a media 1,5° C. Il punto sul bordo della serpentina, soggetto alla variazione maggiore, è caratterizzato da una temperatura che oscilla fra un massimo di 1,7° C ed un minimo di 1,3°C mentre quello sul bordo fra 1,58°C e 1,42°C.

È quindi giustificabile porre la temperatura iniziale del viadotto durante la verifica di efficienza del sistema geotermico pari a 1,5°C in quanto si è dimostrato che la serpentina, nel punto più superficiale, è ad una profondità tale da non subire una significativa influenza da parte delle oscillazioni di temperatura giornaliere.

5.4.3 Risultati della Simulazione

Il fluido termovettore è stato fatto circolare in ognuno dei sette passaggi dell'analisi per 30 giorni consecutivi rappresentativi approssimativamente di un utilizzo stagionale non continuativo, tale scelta va a discapito dell'efficienza dell'impianto in quanto non permette al calore nei dintorni della galleria di ricaricarsi.

5.4.3.1 PASSAGGIO 1: Galleria

Avendo posto la temperatura di ingresso nel circuito del fluido termovettore pari a 1,5° C attraverso le condizioni al contorno, come spiegato precedentemente, ne è stata misurata la temperatura nei sei punti evidenziati in *Figura 5-35.*

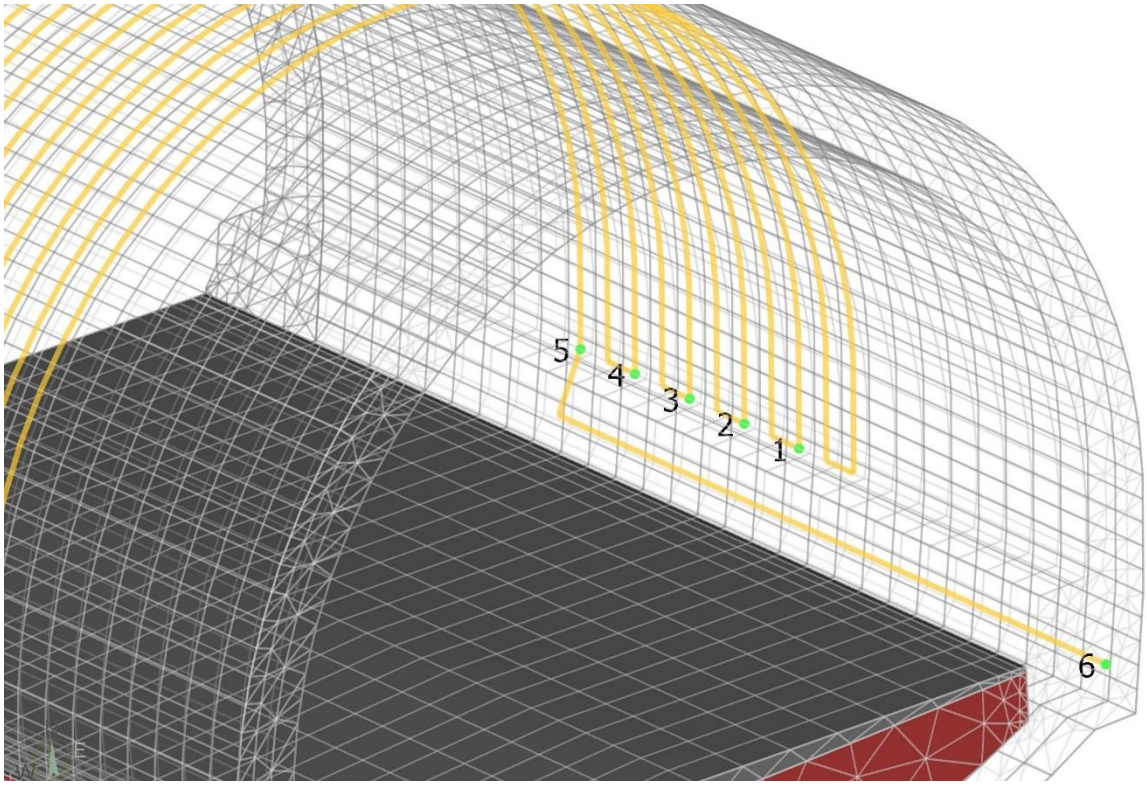

Figura 5-35: Particolare del modello ridotto rappresentativo della galleria con evidenziati i sei punti di osservazione del fluido termovettore fissati.

I punti di osservazione da 1 a 5 misurano l'andamento della temperatura del fluido termovettore nell'arco di tempo di attivazione del sistema per ogni metro di galleria attivata termicamente. Il punto 6 invece è posizionato all'uscita del modello e registra la temperatura del fluido in uscita dal modello.

I risultati misurati nei sei punti di osservazione descritti sono riportati nel grafico in *Figura 5-36*, si può osservare come la temperatura del fluido aumenti di circa mezzo grado ogni metro galleria energetica percorsa e si attesti a fine simulazione per la curva n. 6 a 5,6° C.

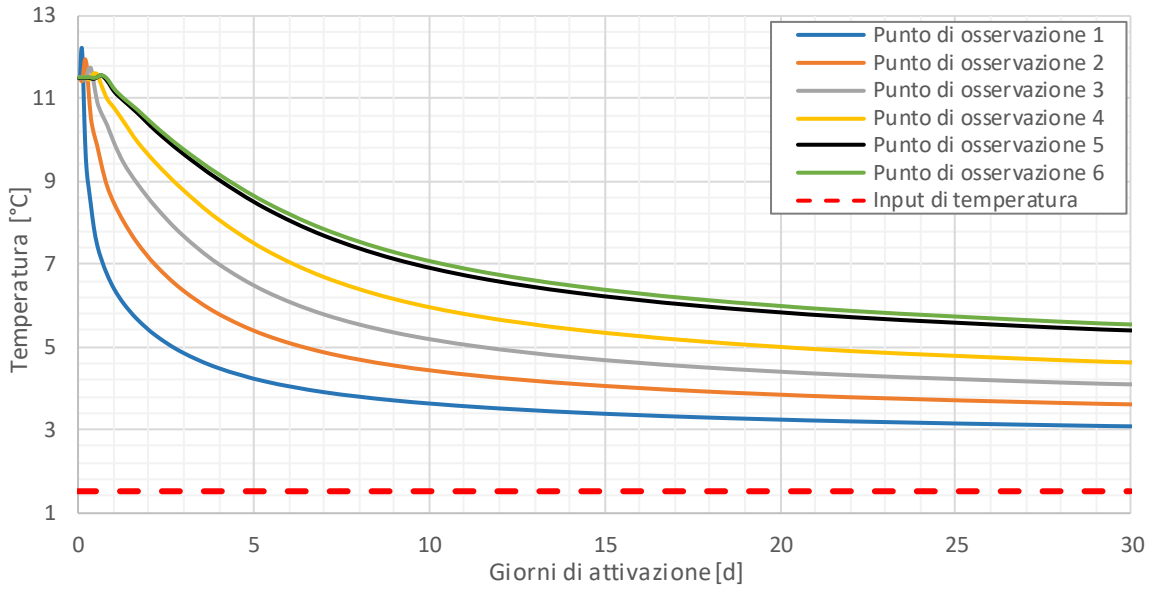

Figura 5-36: Andamento termico del fluido termovettore nei punti di osservazioni fissati del circuito.

5.4.3.2 PASSAGGIO 2: Spalla del Ponte

È stata misurata la temperatura del fluido in uscita dal modello nel punto 2 posizionato come illustrato in *Figura 5-37*, la temperatura di entrata nel modello corrisponde a quella registrata nel punto di osservazione 6 del passaggio precedente.

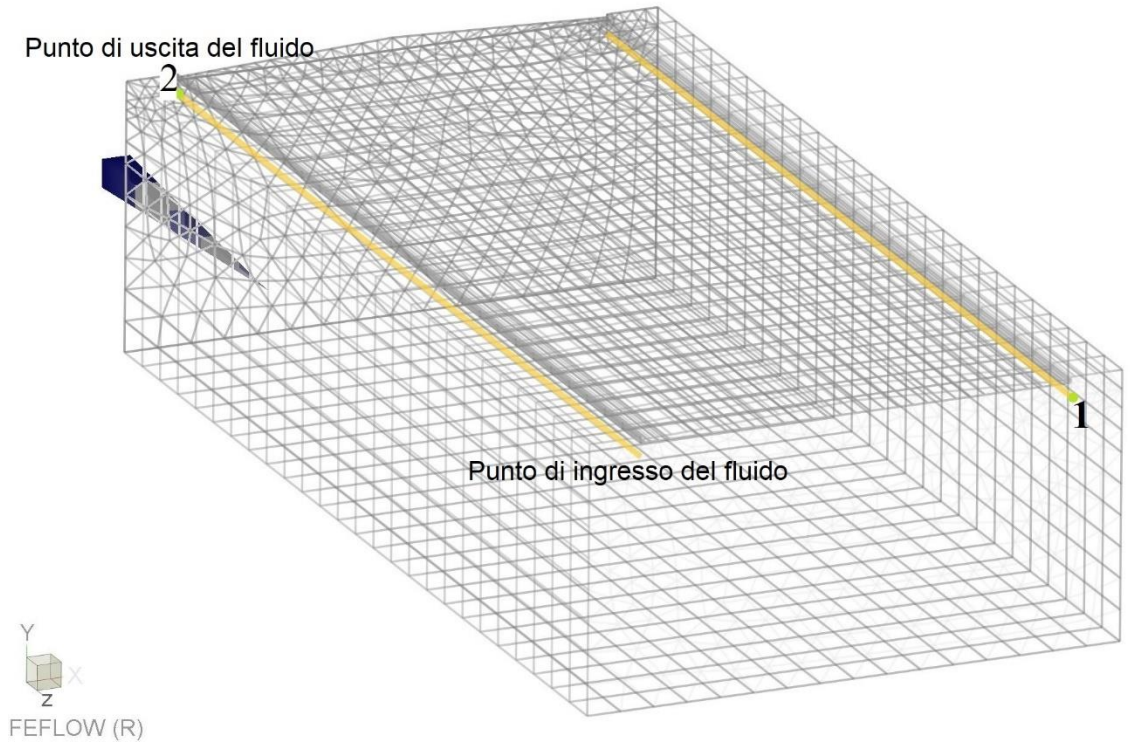

Figura 5-37: Particolare del modello ridotto rappresentativo della spalla con evidenziati i due punti di osservazione della temperatura del fluido termovettore fissati.

L'andamento della temperatura del fluido in uscita dalla spalla è riportato nel grafico in *Figura 5-38,* si nota come raggiunga la temperatura massima a inizio simulazione e poi decresca gradualmente fino ad un valore di 4,9° C al trentesimo giorno di simulazione.

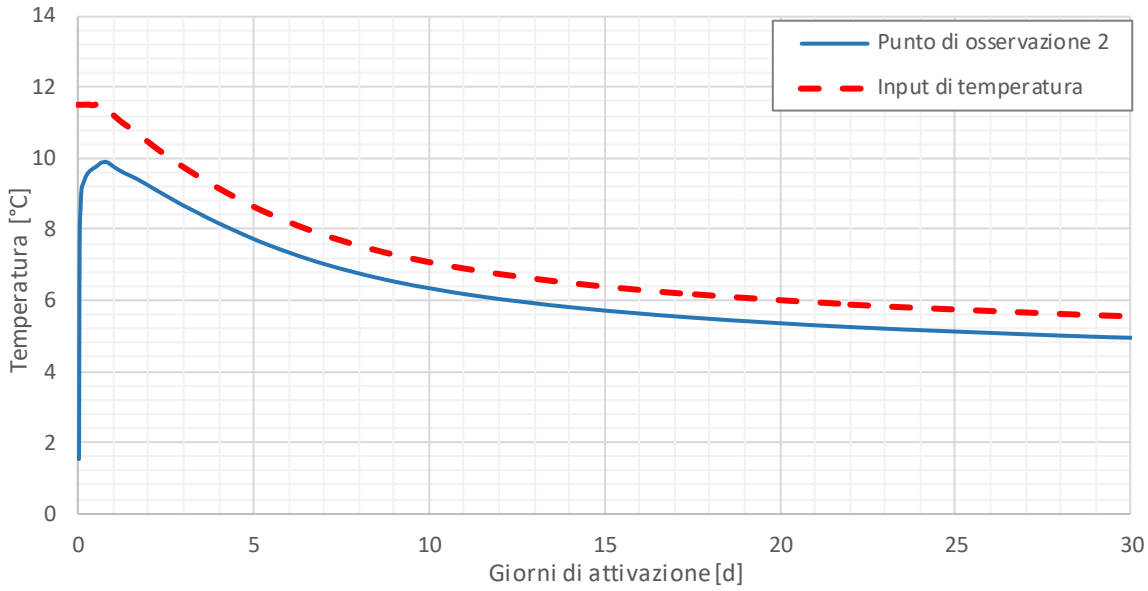

Figura 5-38: Andamento termico del fluido termovettore in uscita dalla spalla del viadotto.

5.4.3.3 PASSAGGIO 3: Impalcato del Ponte.

È stata misurata la temperatura del fluido termovettore all'interno della serpentina situata sotto la superficie stradale in quattro punti di osservazione posizionati come in *Figura 5-41*.

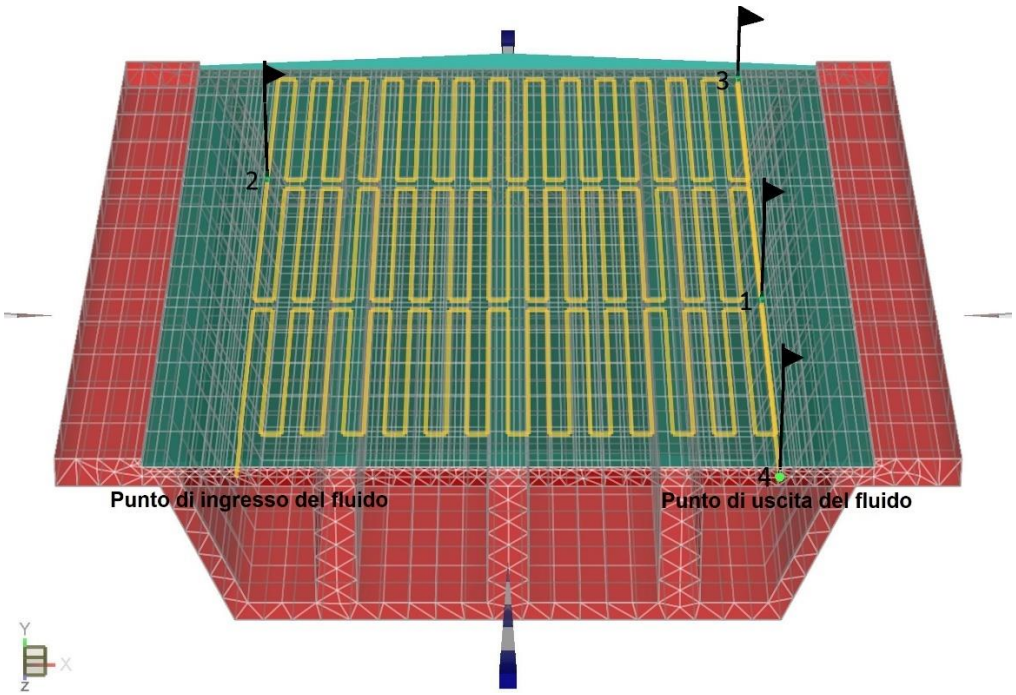

Figura 5-39: Particolare del modello ridotto rappresentativo dell'impalcato con evidenziati i quattro punti di osservazione della temperatura del fluido termovettore fissati.

La posizione di tali punti, dettata dalla loro funzione, è la seguente:

- ***Punti di osservazione 1-2-3:*** Posizionati alla fine di ognuna delle tre porzioni di serpentina consecutive.
- ***Punti di osservazione 4:*** Misura l'andamento della temperatura all'uscita dal modello ridotto dell'impalcato, è utilizzata come condizione al contorno di temperatura in entrata del fluido termovettore nella spalla nel passaggio successivo.

In *Figura 5-40* sono riportati gli andamenti termici nei punti di osservazione sopracitati, si può notare come per ogni porzione consecutiva di serpentina vi sia una dispersione di calore che comporti l'abbassamento di circa 0,5°C.
Il punto alla fine della terza serpentina presenta una curva analoga a quella del punto in uscita dal modello quindi non vi è dispersione di calore nei 12 m del tratto compreso fra i due.

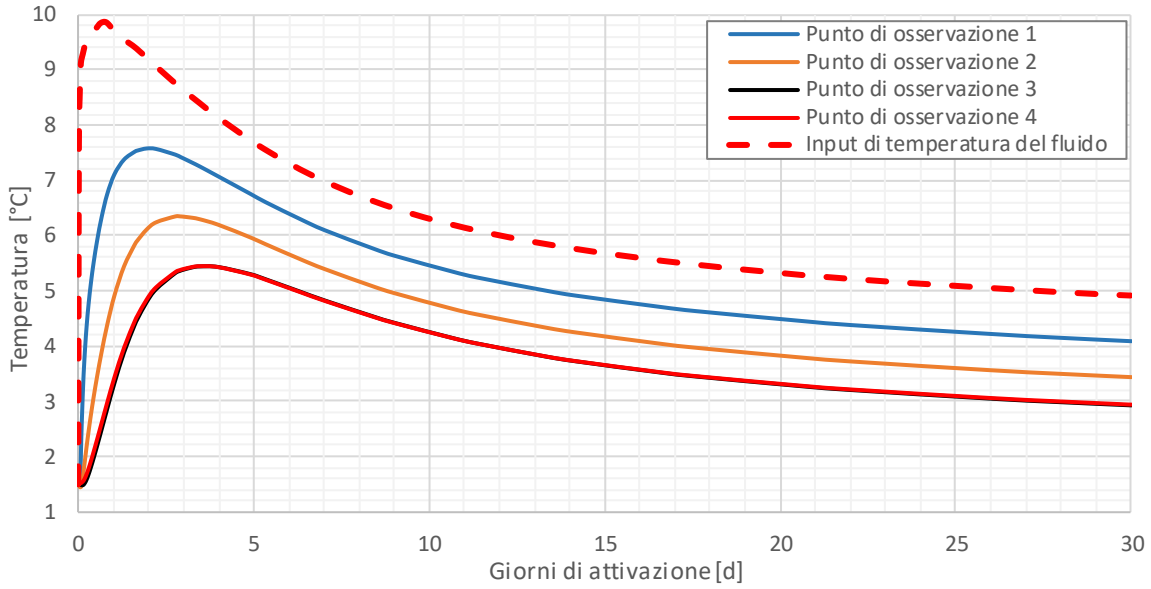

Figura 5-40: Andamento termico del fluido termovettore all'interno dell'impalcato.

È stata monitorata la variazione di temperatura sul manto stradale in tre punti appartenenti a sei sezioni caratteristiche con spaziatura 2 m; sono quindi posizionate a metà ed alla fine di ognuna delle tre porzioni di serpentina consecutive; in particolare, come si può anche osservare in *Figura 5-41* tali punti sono:

- ***Punti di osservazione 1,2,3:*** sono i punti sulla superficie stradale rispettivamente al centro, e sul limitare sinistro e destro dell'impianto per il de-icing situati a metà della prima serpentina.
- ***Punti di osservazione 4,5,6*** sono i punti sulla superficie stradale rispettivamente al centro, e sul limitare sinistro e destro dell'impianto per il de-icing posizionati alla fine della prima serpentina.
- ***Punti di osservazione 7,8,9:*** sono i punti sulla superficie stradale rispettivamente al centro, e sul limitare sinistro e destro dell'impianto per il de-icing situati a metà della seconda serpentina.

- ***Punti di osservazione 10, 11, 12:*** sono i punti sulla superficie stradale rispettivamente al centro, e sul limitare sinistro e destro dell'impianto per il de-icing posizionati alla fine della seconda serpentina.
- ***Punti di osservazione 13, 14, 15:*** sono i punti sulla superficie stradale rispettivamente al centro, e sul limitare sinistro e destro dell'impianto per il de-icing situati a metà della terza serpentina.
- ***Punti di osservazione 16, 17, 18:*** sono i punti sulla superficie stradale rispettivamente al centro, e sul limitare sinistro e destro dell'impianto per il de-icing posizionati alla fine della terza serpentina.

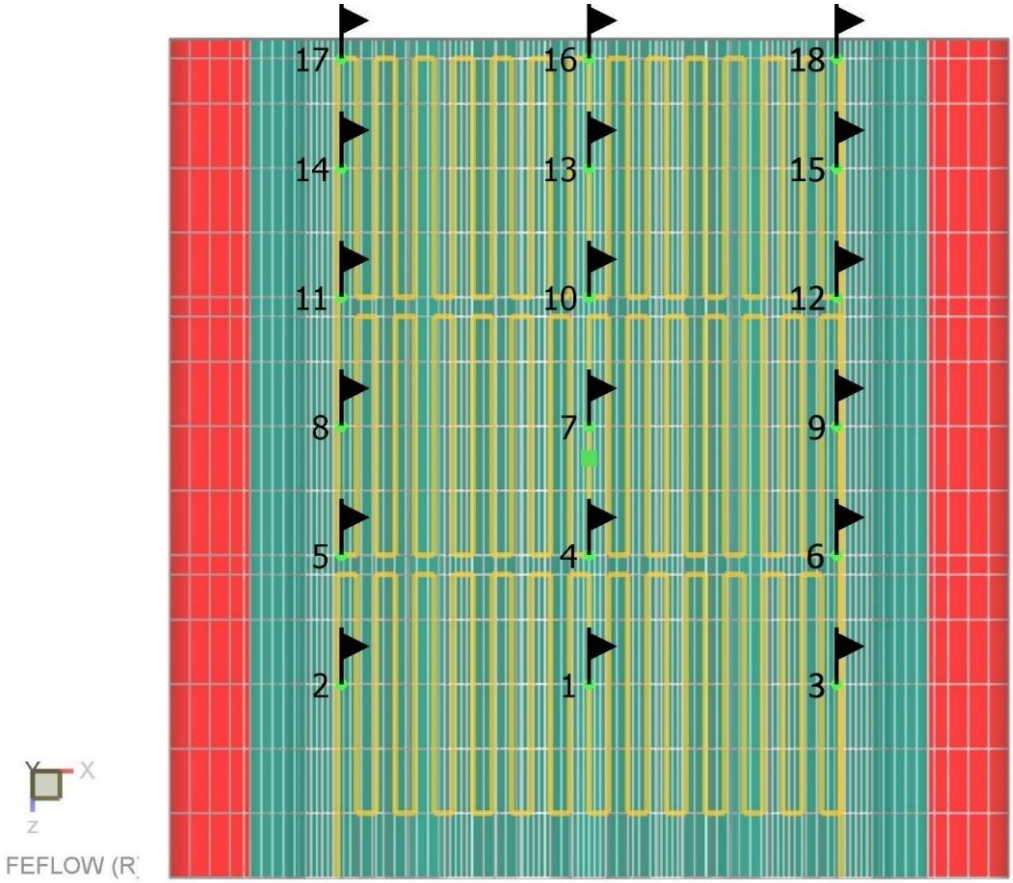

Figura 5-41: Visione dall'alto del modello ridotto rappresentativo dell'impalcato con evidenziati i punti di osservazione della temperatura della superficie stradale fissati.

I risultati dei diversi andamenti termici nei punti di osservazione descritti sono riportati sei alla volta in grafici relativi ognuno ad una porzione di serpentina consecutiva: sono rappresentati quindi nel grafico in *Figura 5-42* i punti 1, 2, 3, 4, 5 e 6; in quello riportato in *Figura 5-43* i punti 7, 8, 9, 10, 11 e 12 ed infine in quello in *Figura 5-44* gli andamenti relativi ai punti 13, 14, 15, 16, 17 e 18.

Si può notare come allontanandosi dal punto di ingresso del fluido termovettore nel circuito

la temperatura della superficie stradale rimanga più bassa nell'arco di tutta la simulazione e come i punti situati al centro della carreggiata presentino temperature inferiori in ogni sezione monitorata rispetto agli altri in quanto più lontani dal sistema di serpentine.

Il grafico relativo all'ultima porzione di serpentina in particolare presenta per i punti centrali una temperatura inferiore a 0°C a partire dal venticinquesimo giorno di simulazione che rende il sistema non sufficiente a garantire il de-icing in tutta la stagione invernale.

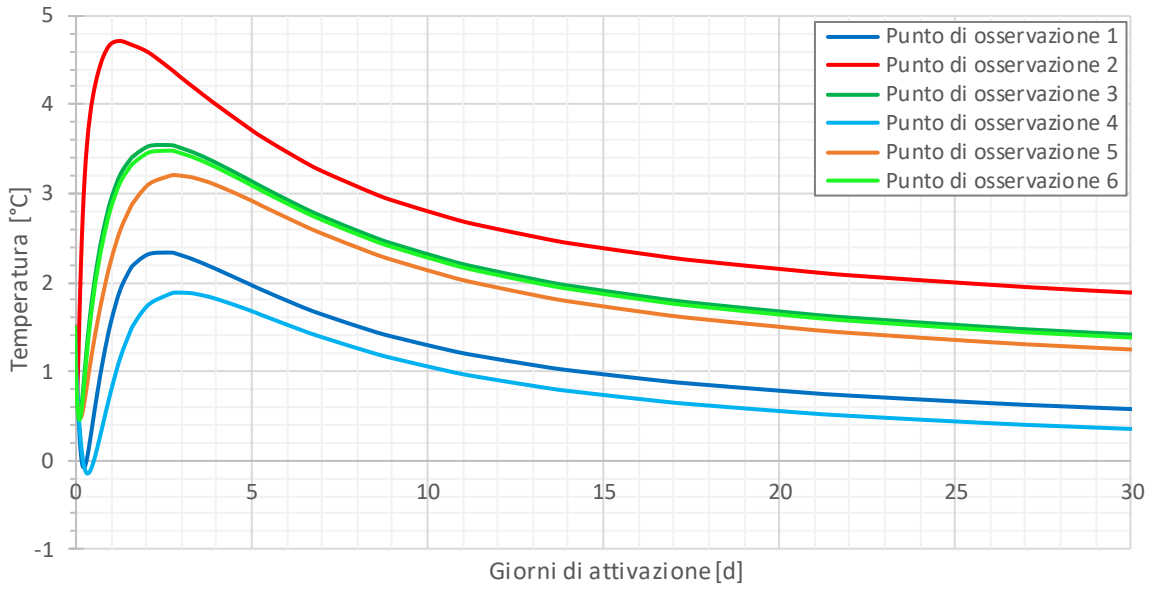

Figura 5-42: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della prima porzione di serpentina studiata.

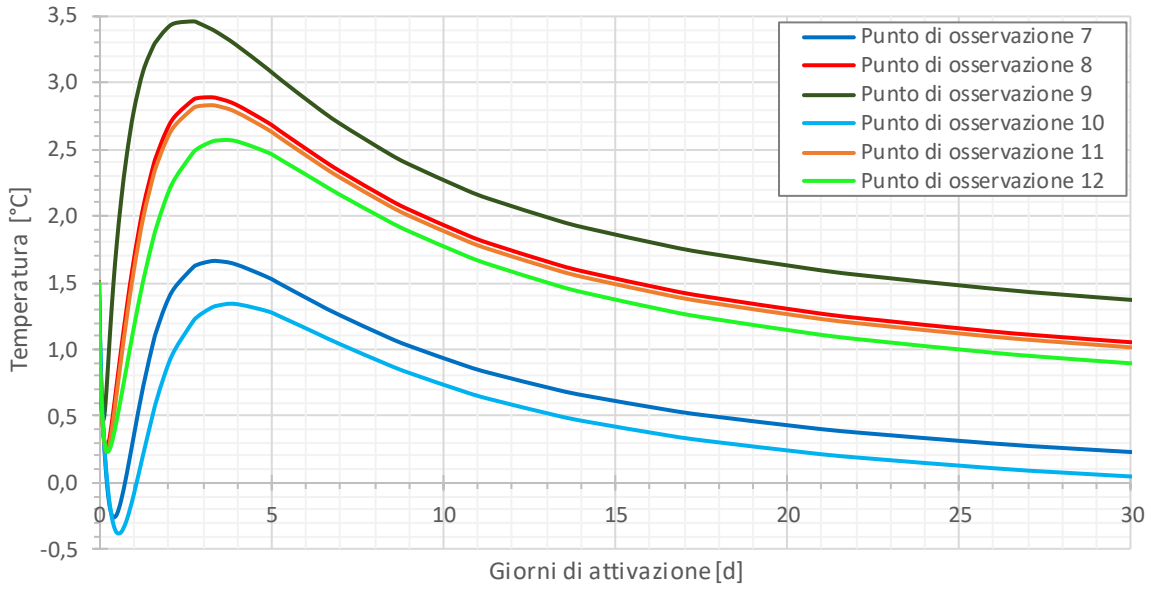

Figura 5-43: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della seconda porzione di serpentina studiata.

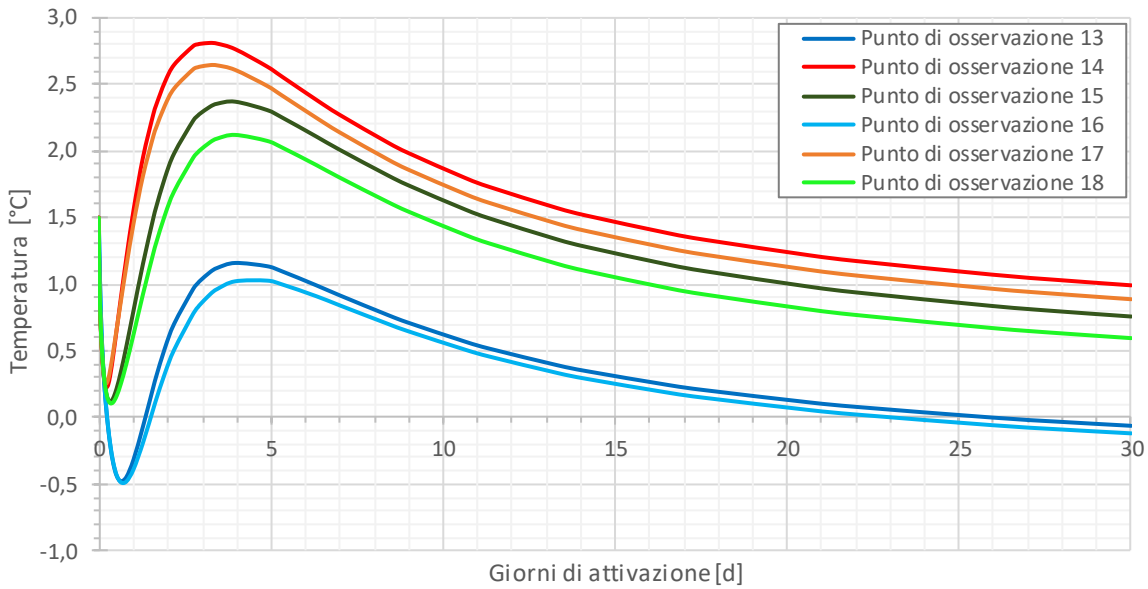

Figura 5-44: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della terza porzione di serpentina studiata.

Nella *Figura 5-45* si è posta l'attenzione sui primi tre giorni di funzionamento dell'impianto nella porzione di serpentina più critica, ovvero l'ultima.
Si può osservare come dalle condizioni iniziali del sistema, per effetto della temperatura dell'aria pari a -3°C, la temperatura dell'asfalto inizialmente diminuisca, e solo successivamente ricominci ad aumentare per effetto del calore ceduto dal fluido.
In particolare i punti di osservazione sulla sinistra dell'impianto hanno riscontrato un aumento della temperatura dopo 5 h e 15 min (0,22 giorni), quelli sulla destra dopo 8 h e 10 min (0,34 giorni) e infine quelli al centro dopo 15 h e 30 min (0,64 giorni).

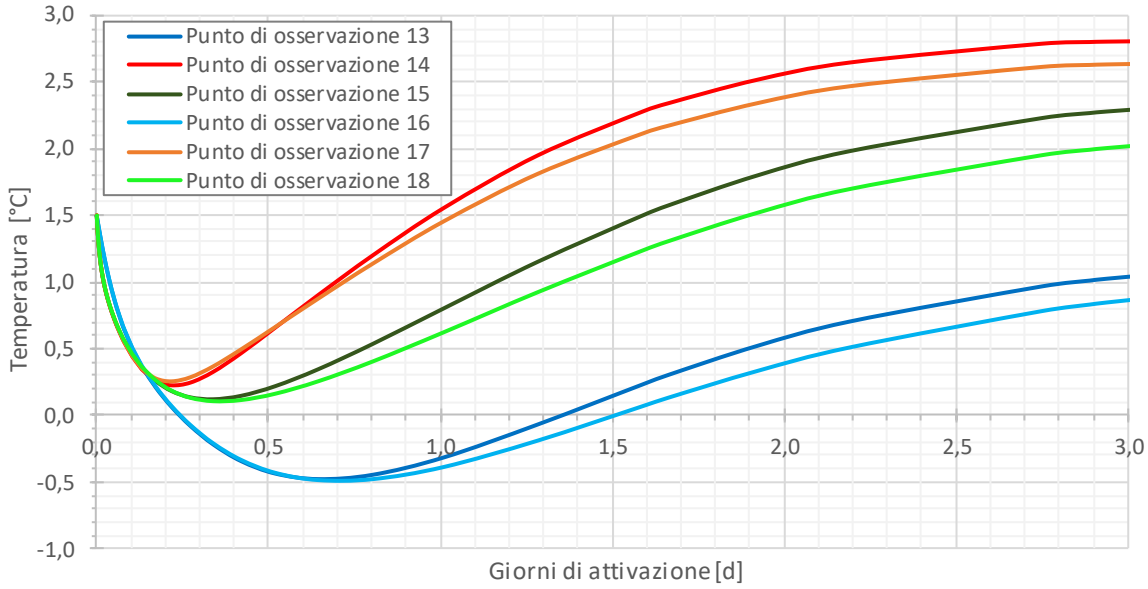

Figura 5-45: Dettaglio dell'andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione al di sopra della terza porzione di serpentina nei primi tre giorni di simulazione.

5.4.3.4 PASSAGGIO 4: Spalla del Ponte

La temperatura del fluido termovettore misurata nel punto di osservazione 4 dell'impalcato è stata utilizzata come condizione al contorno di temperatura iniziale del fluido che viene rindirizzato verso la galleria; viene misurata e riportata nel grafico in *Figura 5-46* la temperatura in uscita dalla spalla nel punto di osservazione 1.

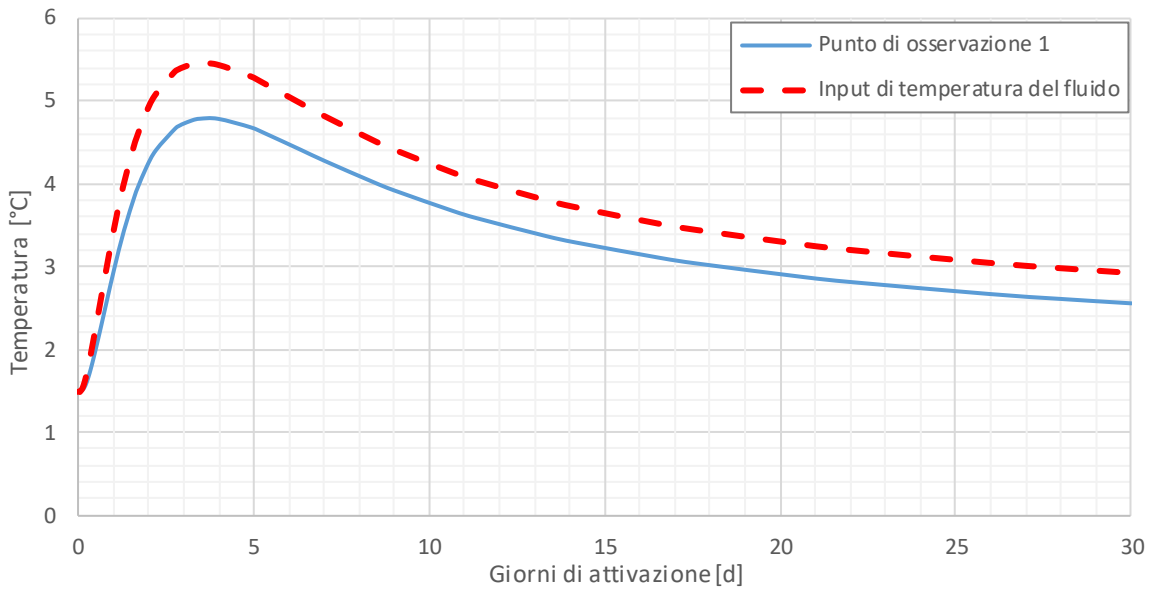

Figura 5-46: Andamento termico del fluido termovettore in uscita dalla spalla del viadotto.

5.4.3.5 PASSAGGIO 5: Galleria

Sono state effettuate le medesime misurazioni nei punti di controllo descritti durante il passaggio 1; gli andamenti di temperatura riscontrati sono riportati in *Figura 5-47*.

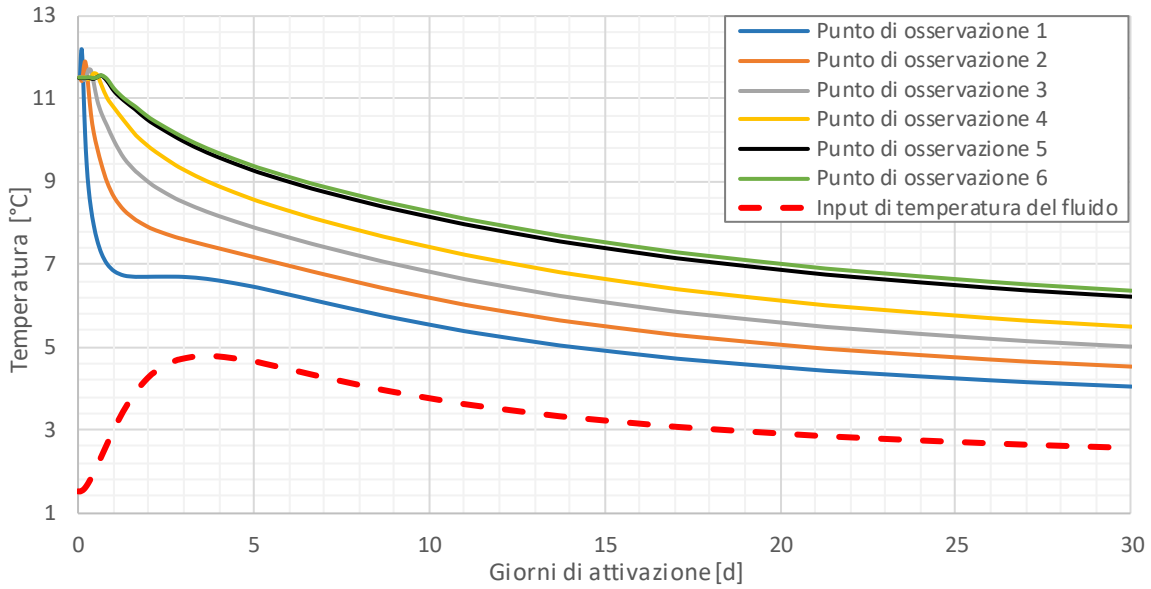

Figura 5-47: Andamento termico del fluido termovettore nei punti di osservazioni fissati del circuito.

È possibile osservare come, rispetto agli andamenti misurati al passaggio 1 ed illustrati in *Figura 5-36,* le temperature riscontrare in ogni curva siano superiori di circa 0,5°C, ciò è dovuto alla differente condizione al contorno di temperatura iniziale di ingresso del fluido termovettore nella galleria energetica.

È infine riportato in *Figura 5-48,* l'andamento termico nel terreno circostante la galleria nella sezione centrale, e quindi maggiormente sollecitata termicamente, del modello alla conclusione dei trenta giorni di simulazione.
Si osserva che il terreno che ha subito una significativa diminuzione di temperatura a fine processo, dovuta alla presenza della galleria energetica, sia limitato ai 6 m intorno al rivestimento e quindi viene confermato che le sezioni precedentemente scelte per l'istallazione delle serpentine abbiano una profondità tale da evitare l'influenza della temperatura esterna per tutta la durata della stagione invernale.

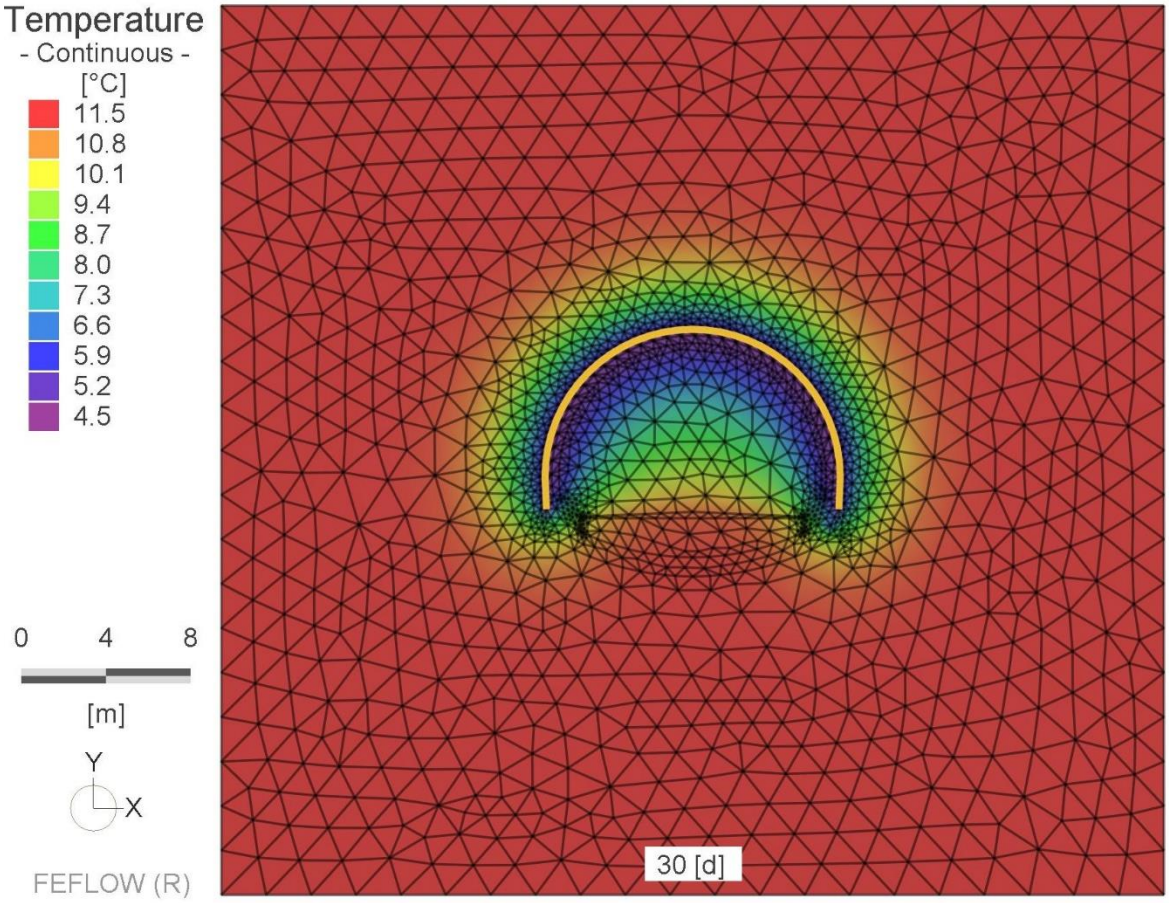

Figura 5-48 Andamento termico nel terreno circostante il modello ridotto della galleria a fine simulazione relativo alla sezione centrale.

5.4.3.6 PASSAGGIO 6: Spalla del Ponte

La temperatura del fluido termovettore nel punto di osservazione 6 proveniente dalla galleria è stata utilizzata come condizione al contorno di temperatura iniziale del fluido rindirizzato verso l'impalcato analogamente al passaggio 2; viene misurata e riportata nel grafico in *Figura 5-49* la temperatura in uscita dalla spalla nel punto di osservazione 2.

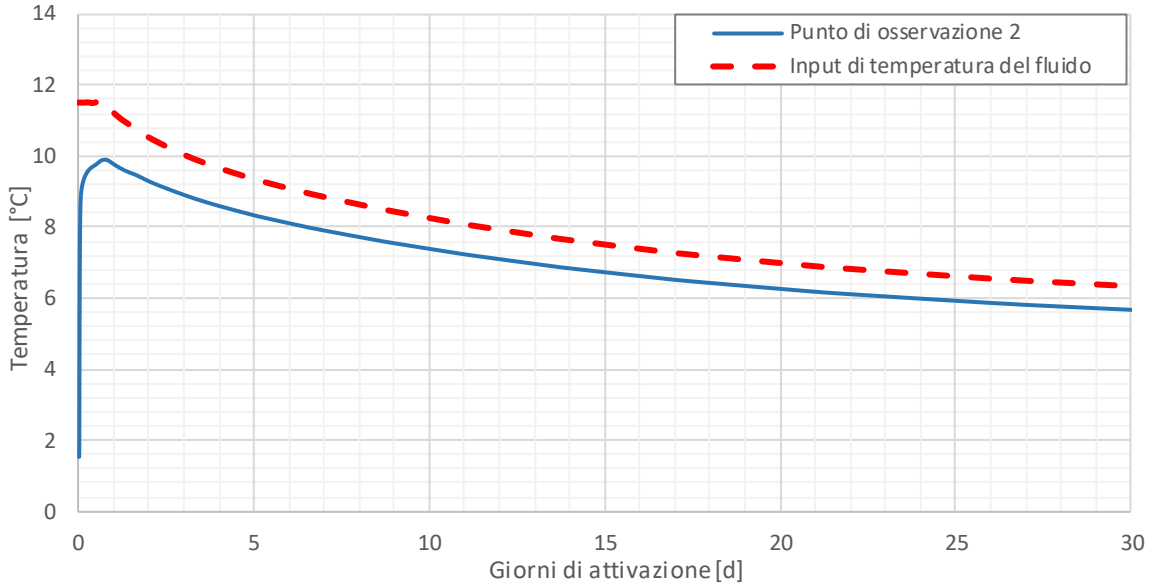

Figura 5-49: Andamento termico del fluido termovettore in uscita dalla spalla del viadotto.

5.4.3.7 PASSAGGIO 7: Impalcato del Ponte

Sono state effettuate le medesime misurazioni descritte nel passaggio 4 ed è riportato nel grafico in *Figura 5-50* l'andamento della temperatura del fluido misurato dopo ogni porzione di serpentina.

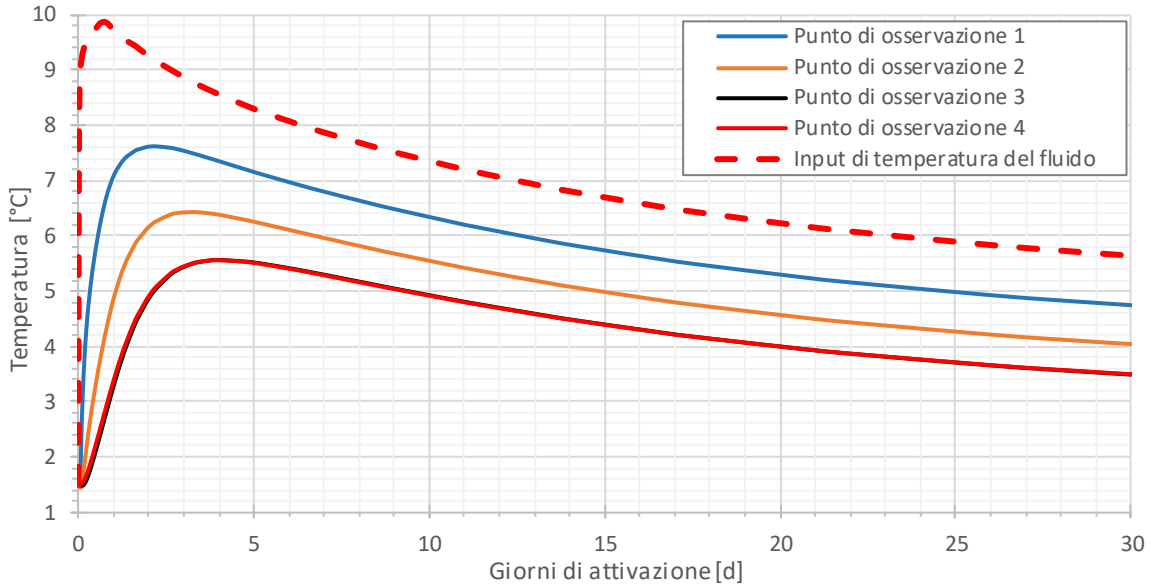

Figura 5-50: Andamento termico del fluido termovettore all'interno dell'impalcato.

I diversi andamenti termici riscontrati nei punti di osservazione fissati, analoghi a quelli descritti al passaggio 3, sono riportati sei alla volta in grafici relativi ognuno ad una porzione di serpentina consecutiva: sono rappresentati quindi nel grafico in *Figura 5-51* i punti 1, 2, 3, 4, 5 e 6; in quello riportato in *Figura 5-52* i punti 7, 8, 9, 10, 11 e 12 ed infine in quello in *Figura 5-53* gli andamenti relativi ai punti 13, 14, 15, 16, 17 e 18.

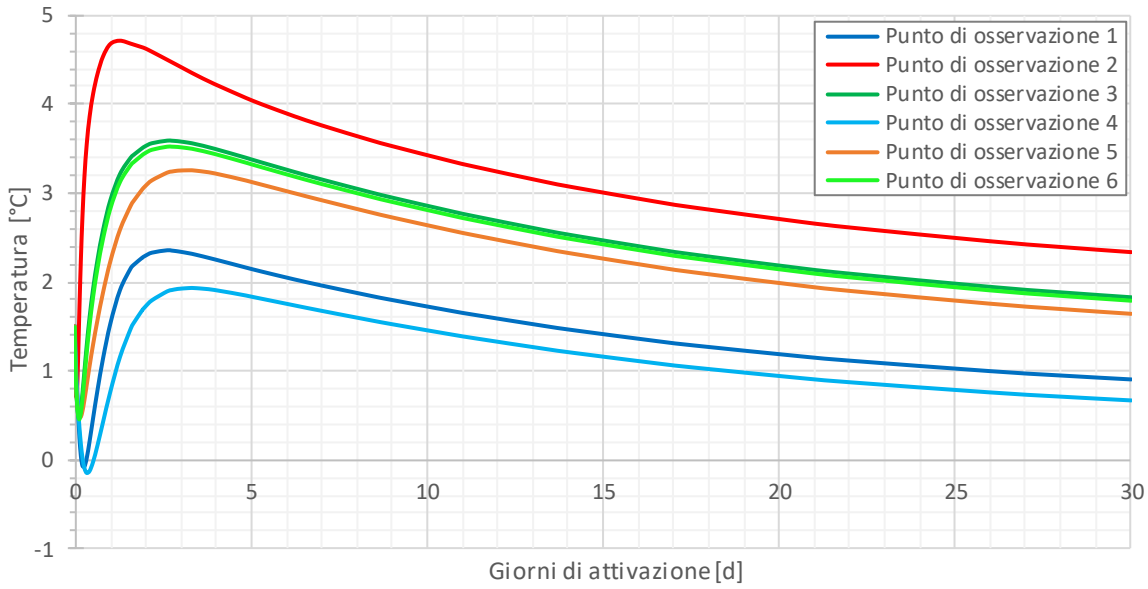

Figura 5-51: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della prima porzione di serpentina studiata.

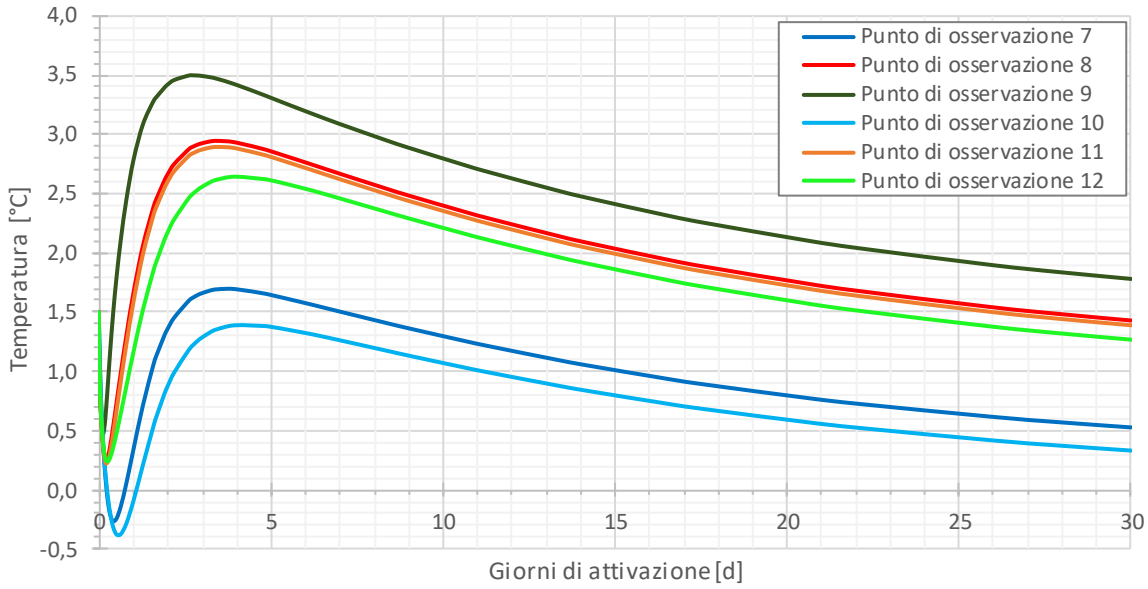

Figura 5-52: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della seconda porzione di serpentina studiata.

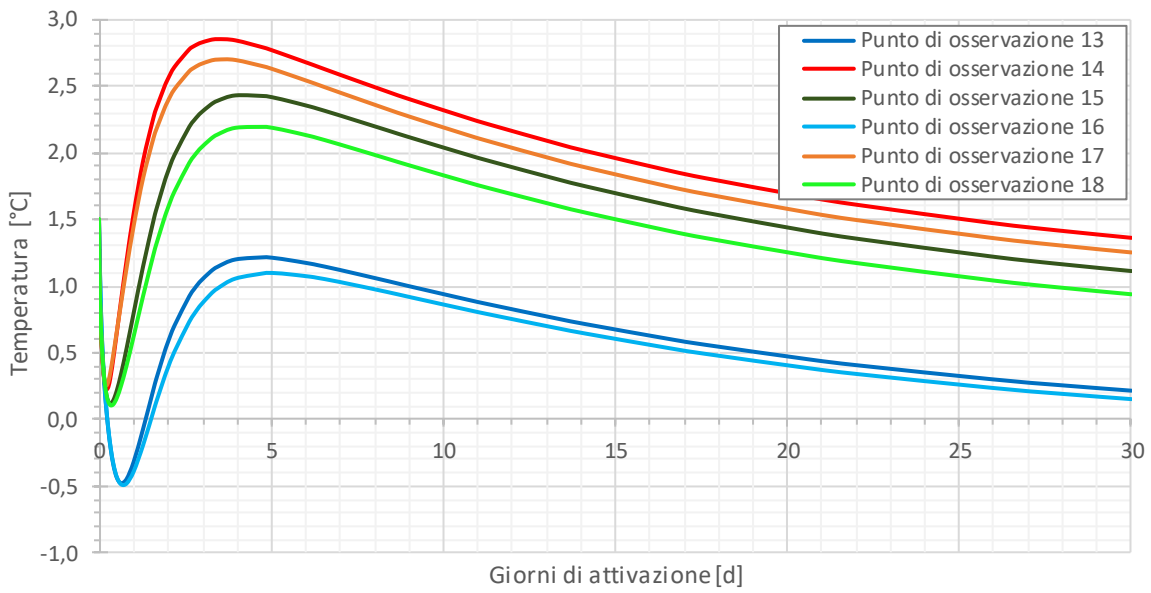

Figura 5-53: Andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione fissati al di sopra della terza porzione di serpentina studiata.

Si può osservare come la temperatura si mantenga nel corrente passaggio superiore a 0°C in ogni punto misurato per tutta la durata della simulazione ad eccezione dei punti centrali della carreggiata in corrispondenza dell'accensione dell'impianto, si è quindi ottenuto un risultato soddisfacente.

Analogamente al passaggio 3 è riportato, in *Figura 5-54,* l'andamento delle temperature relativo ai primi tre giorni di funzionamento dell'impianto per la terza porzione di serpentina.

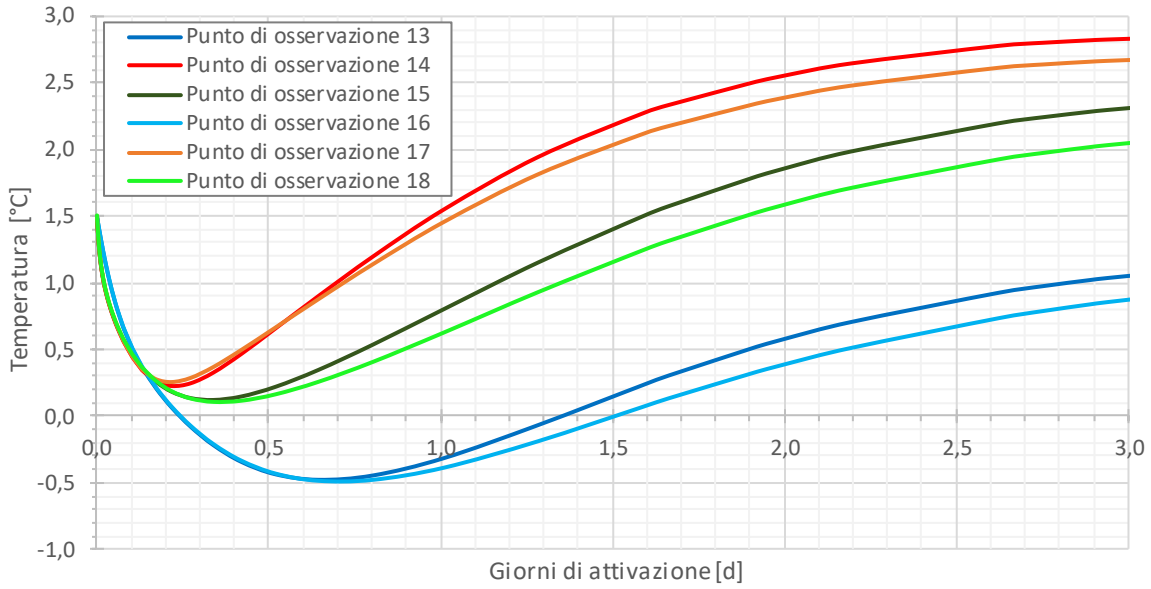

Figura 5-54: Dettaglio dell'andamento della temperatura sulla superficie stradale nei sei punti di osservazione al di sopra della terza porzione di serpentina nei primi tre giorni di simulazione.

I risultati nei primi tre giorni di simulazione sono identici per il passaggio 3 e per il 7, analogamente al passaggio 3 i punti sulla sinistra dell'impianto hanno rilevato un aumento della temperatura dopo 5 h e 15 min. (0,22 giorni), quelli sulla destra dopo 8 h e 10 min. (0,34 giorni) e infine quelli al centro dopo 15 h e 30 min. (0,64 giorni).

Quindi la condizione al contorno di temperatura del fluido termovettore all'ingresso dell'impalcato diversa nei due passaggio del processo iterativo non ne influenza il comportamento termico nel periodo successivo all'accensione dell'impianto.

Inoltre, confrontando le temperature di output del fluido misurate nel punto di osservazione 4 durante i passaggi 3 e 7 e riportato nel grafico in *Figura 5-55*, si può concludere che, in ulteriori passaggi del processo iterativo vi sarebbe un leggero aumento delle temperature misurate durante periodo di funzionamento a partire dal quarto giorno.
Tali temperature risultano tuttavia essere già soddisfacenti in quanto si mantengono, a partire dal quarto giorno, in ogni punto misurato al di sopra di 0°C durante tutta la durata della simulazione.
Al contrario un ulteriore ciclo iterativo non influenzerebbe i primi quattro giorni di simulazione in quanto le due curve risultano uguali nel citato lasso di tempo; si è quindi deciso di non procedere con ulteriori passaggi della simulazione.

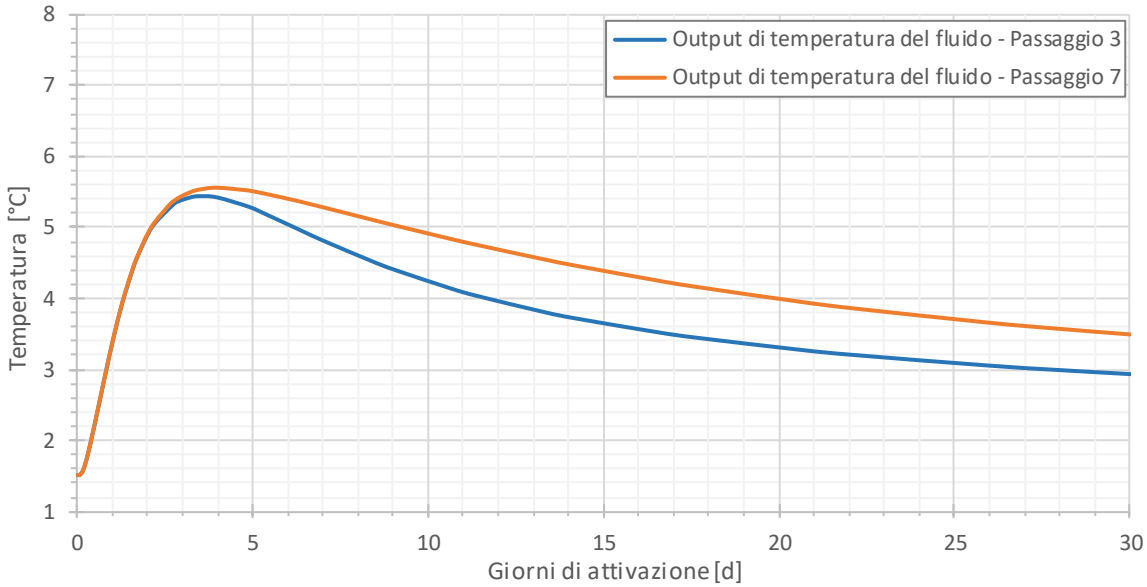

Figura 5-55: Confronto fra gli andamenti delle temperature di uscita dall'impalcato del fluido termovettore ottenute nel punto di osservazione 4 durante i passaggi 3 e 7.

A titolo di esempio è riportato in *Figura 5-56* l'andamento delle temperature a fine simulazione nella sezione 16 del modello, ovvero la più critica in quanto più lontana dal punto di ingresso del fluido nella serpentina.
Si può osservare come le porzioni di impalcato più distanti dal sistema per il de-icing assumano una temperatura prossima a quella dell'aria esterna pari a -3°C.

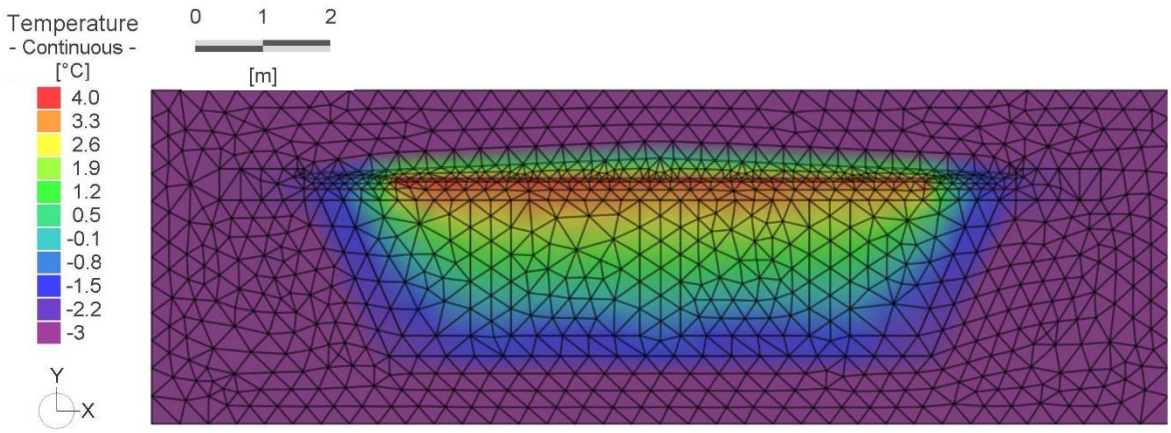

Figura 5-56: Andamento termico nella sezione più critica dell'impalcato, la più lontana dall'ingresso del fluido termovettore.

In *Figura 5-57* è invece riportato l'andamento della temperatura in corrispondenza della superficie stradale del modello alla conclusione dell'analisi.
Si nota come la diminuisca velocemente all'esterno dell'area servita dal sistema di de-icing e come risulti inferiore in corrispondenza dei punti centrali della carreggiata.

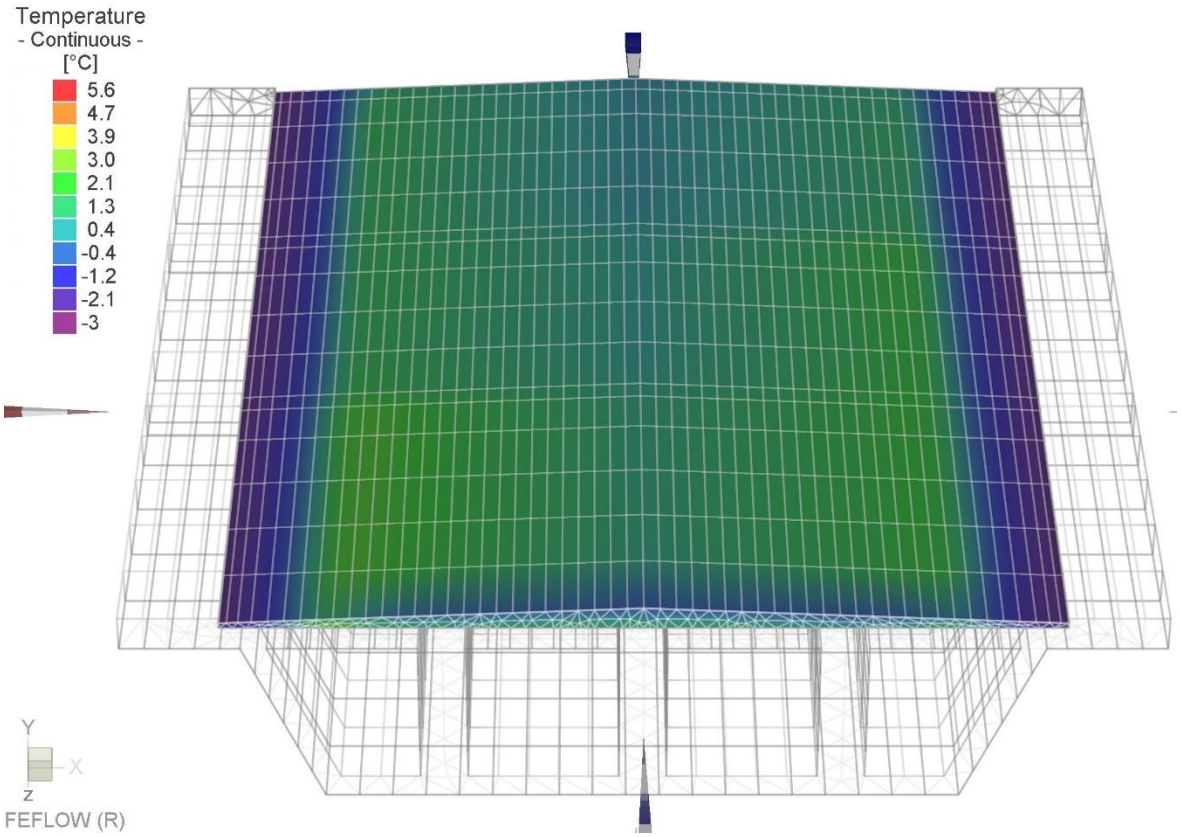

Figura 5-57: Andamento termico sulla superficie stradale tridimensionale del modello a fine simulazione.

6 CONCLUSIONI

Si ricordi innanzi tutto l'obbiettivo della tesi, il quale consisteva nello studiare l'efficienza di un sistema di gallerie energetiche di cui è stata ipotizzata l'applicazione ai tunnel "Craviale e "La Turina" al fine di mantenere sghiacciato il viadotto "Turinella" compreso fra i due durante la stagione invernale.

L'impianto per il de-icing oggetto di studio non prevede l'implementazione di una pompa di calore per aumentare la temperatura del fluido termovettore prima del suo utilizzo all'interno dell'implacato, ma solo di una pompa che ne consenta il ricircolo all'interno del circuito chiuso composto dalle serpentine.

L'utilizzo di tale tecnologia, sostitutiva dei metodi classici di de-icing, come ad esempio lo spargimento di sale sulla carreggiata, è particolarmente vantaggioso in quanto, al fronte di un consumo di energia elettrico ridotto necessario ad attivare la pompa per il ricircolo del fluido termovettore all'interno del sistema, è possibile evitare l'inquinamento ambientale, la corrosione sui veicoli e sulle infrastrutture che è invece tipico dell'impiego di prodotti chimici ed abrasivi.

È stata effettuata una simulazione dell'impianto attraverso la costruzione di quattro modelli agli elementi finiti con accoppiamento termo-idraulico rappresentativi dell'infrastruttura oggetto di studio, situata lungo la Strada Provinciale n.23 "del Colle del Sestriere"; la modellazione numerica è stata svolta tramite il software di calcolo FEFLOW grazie al quale si è giunti alle seguenti conclusioni.

Innanzitutto, tramite un modello esteso rappresentativo dell'intera area dove è stata ipotizzata l'istallazione del sistema per il de-icing, si è valutata la distanza ottimale dallo sbocco dei tunnel sul viadotto alla quale va posizionata la galleria energetica. La scelta è stata effettuata in maniera tale da evitare che l'area intorno a dove sarà modellata la serpentina subisca eccessive variazioni termiche dovute all'influenza dell'andamento della temperatura stagionale dell'aria esterna.

È stata effettuata un'analisi della durata complessiva di tre anni nei quali la temperatura dell'aria esterna è stata fatta variare secondo una curva interpolante le temperature medie mensili che caratterizzano il comune di San Germano Chisone, dove è situata l'infrastruttura.

La galleria "Craviale", nella sua porzione adiacente il viadotto, è caratterizzata da poco sovraccarico di terreno, quindi la prima sezione nella quale la variazione fra la temperatura massima e la minima del rivestimento nell'arco dell'anno è inferiore ad 1°C è la numero 10 del modello; tale sezione corrisponde ad una distanza dalla fine della galleria stessa di 32 metri ed è situata alla profondità di 15 m.

Per quanto riguarda invece la galleria "La Turina", grazie al maggiore sovraccarico di terreno che la caratterizza nella sua porzione iniziale, la potenziale istallazione può avvenire a partire dalla sezione 120 del modello la quale è situata ad una distanza di 21 metri dal viadotto ad una profondità di 16 m.

Sempre sull'analisi precedente si è valutata la risposta termica di vari punti della superficie stradale dell'impalcato alle variazioni di temperatura dell'aria nell'arco dell'anno: si è osservato come la porzione centrale della carreggiata, più spessa per effetto della pendenza dei cigli, tenda a cambiare più lentamente temperatura per adeguarsi alla variazione termica dell'aria esterna così come accade per i punti adiacenti alla pila del viadotto.
Ciò va a confermare la particolare vulnerabilità di ponti e viadotti, specialmente se caratterizzati da un impalcato sottile, ai fenomeni di formazione del ghiaccio e di accumulo delle precipitazioni nevose in quanto tendono a raffreddarsi prima rispetto alle altre tipologie di infrastrutture.

Una volta ipotizzato dove andrebbero posizionate le gallerie energetiche, attraverso un processo iterativo in sette passaggi che ha coinvolto tre modelli ridotti rappresentativi rispettivamente della galleria, della spalla e dell'impalcato del viadotto i quali ospitano il sistema per il de-icing oggetto di studio, si è verificata l'efficienza di uno dei quattro circuiti chiusi indipendenti che lo compongono.

È stata effettuata un'analisi di 30 giorni nei quali il fluido termovettore è stato fatto circolare sequenzialmente all'interno dei modelli, tale durata è stata scelta per rappresentare approssimativamente un utilizzo stagionale non continuativo e porta ad un'efficienza minore in quanto non permette al calore nei dintorni della galleria di ricaricarsi.
Le temperature utilizzate nell'arco della simulazione per le infrastrutture e per l'aria esterna sono state quelle mediamente più critiche caratteristiche del comune di San Germano Chisone del mese più freddo, ovvero gennaio, e corrispondono rispettivamente alla media (1,5°C) ed alla minima giornaliera (-3°C).

Si è osservato come l'impianto per il de-icing ipotizzato riesca a mantenere la temperatura della superficie stradale superiore a 0°C in ogni punto misurato ad eccezione dei punti centrali della carreggiata nel primo giorno e mezzo di simulazione; ciò è dovuto alla maggiore distanza di tali punti dalla serpentina. Quindi per ottenere uno sghiacciamento ottimale su ogni punto dell'impalcato, anche in quelli più critici situati in posizione centrale e nei punti più lontani dall'ingresso del fluido termovettore nel circuito, l'impianto, per le

condizioni studiate, deve essere attivato almeno un giorno e mezzo prima dell'evento nevoso previsto.
Anche una eventuale temperatura di ingresso del fluido maggiore nell'impalcato, nei limiti di quanto la mancanza della pompa di calore permetta, non influenza la risposta termica del viadotto nei primi quattro giorni.

In conclusione la simulazione ha dimostrato che la galleria energetica ipotizzata, nel caso dell'infrastruttura oggetto di studio, è in grado di estrarre dal terreno abbastanza calore da impiegare per mantenere la temperatura della superficie stradale superiore a 0°C per un mese di utilizzo continuativo in condizioni critiche; si rivela quindi essere una valida alternativa all'utilizzo delle classiche tecnologie per il de-icing, dannose sia per l'ambiente che per il materiale del viadotto, per la durata complessiva della stagione invernale.

BIBLIOGRAFIA

Akin M. et al., “Snow Removal at Extreme Temperatures”, Project 99085/CR11-04, 2013.

Athmann T. et al. “Geothermal Heating of Airport Runways”, St. Cloud State University, 2008.

Barla M. & Di Donna A. “Conci energetici per il rivestimento delle Gallerie”, Strade & Autostrade 4-2016.

County of Essex, “Geothermal Snow-Melt System For Bridge Decks”, TAC Enviromental Achievment Award Submission, 2009.

DHI-WASY GmbH “User Manual FEFLOW 6”, 2010.

Dickson M. & Fanelli M. “Cos’è l’Energia Geotermica?”, IGA-International Geothermal Association, 2004

Diersch H.-J.G. “Reference Manual FEFLOW”, DHI-WASY GmbH, 1998.

Eugster W.J. “Road and Bridge Heating Using Geothermal Energy. Overview and Examples”, Proceedings European Geothermal Congress 2007

Frodl S. et al., “Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach”, Geomechanics and Tunnelling 3 No. 5, 2010

Kalamaras G. et al., “Up-to-date excavation, support, and lining solutions meet timing requirements for the first two tunnels of the 2006 winter olympic games”, Proceedings - Rapid Excavation and Tunneling Conference, January 2005.

Lancellotta R. & Calavera J., “Fondazioni”, McGraw-Hill Education, 2016

Mauro A., J.C. Grossman, “Applied Thermal Engineering” 110 (2017) 1653–1658, 2016

Nicholson D. et al. “The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK” Engineering Sustainability Volume 167 Issue ES3, 2014.

Olgun G. “Use of Geothermal Energy in Snow Melting and Deicing of Transportation Infrastructures”, Trasportation Research Board, 2016

Rehau, manuale “Geothermal tunnel lining”

Rodonò G. & Volpes R. “Fisica Tecnica” Aracne, 2011

Sanner B. “Shallow geothermal energy”, GHC Bulletin, 2001

Spitler, J.D., M. Ramamoorthy 2000. Bridge Deck Deicing using Geothermal Heat Pumps. Proceedings of the Fourth International Heat Pumps in Cold Climates Conference, Aylmer, Québec. August 17-18, 2000.

Unterbergen W. “Utilization of Tunnels as Sources of Ground Heat and Cooling – Practical Applications in Austria”, Dept. of Civil Engineering, Vienna University of Technology, Austria

Xianming Shi, Ph.D., P.E. “Environmental Effects of Deicing and Anti-icing Chemicals”, Michigan Winter Operations Conference, 2011

Yehia S., Tuan C.Y., Bridge Deck Deicing, trasportation Conference Proceedings, 1998

Zanella E., “Elaborazione integrazioni geologiche e geomorfologiche, comune di San Germano Chisone (Gennaio 2015)”, 2015