

POLITECNICO DI MILANO

SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E TERRITORIALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



**Analisi della trasmissione del calore nel terreno
in presenza di scambiatori integrati nelle opere di fondazione**

Tesi di laurea di:

Davide CORTI

Matr. 765593

Marco RAMUS

Matr. 765972

Relatore:

Ing. Dott. Donatella STERPI

Anno Accademico 2011/2012

*"Tra un modello e la realtà,
la realtà ha sempre ragione"*

S.Mambretti

RINGRAZIAMENTI

Vorremmo ringraziare la professoressa Sterpi per averci permesso di svolgere questo lavoro e per i suggerimenti per migliorarlo e arricchirlo.

Un grazie speciale alle nostre famiglie, in particolare ai nostri genitori, che ci hanno sostenuto in questi anni. Essi ci hanno trasmesso, con il loro esempio, i valori più importanti su cui fondare la nostra vita, valori che vengono prima di qualsiasi conoscenza o sapere. Grazie per la stima che avete sempre avuto in noi!

Poi come dimenticare voi amici, compagni di studio e di mille avventure in questi cinque anni di Poli. A tutti voi va il nostro più grande grazie!!

Io Davide vorrei, in ultimo, ringraziare due persone speciali, Luca e Paola, perché hanno reso stupendi questi miei anni di università, con il loro affetto, la loro vicinanza e la loro profonda amicizia.

Grazie amici!

ABSTRACT

Il lavoro di tesi è stato focalizzato sullo studio delle fonti di energia geotermica a bassa entalpia, utilizzate per il riscaldamento e/o raffrescamento di edifici o altre strutture.

Negli ultimi anni, le tecnologie utilizzate per sfruttare queste risorse stanno subendo un rapido sviluppo e una sempre maggiore diffusione, in particolare la tipologia detta "energy foundation".

L'impianto consiste in un sistema di serpentine disposte nelle fondazioni della struttura nelle quali circola un fluido che, attraverso una pompa di calore, permette di estrarre calore dal terreno durante i mesi invernali e cederlo durante l'estate.

Le analisi sono state svolte con approccio numerico, ricorrendo al metodo degli elementi finiti.

Nella prima parte del lavoro è stato studiato il campo di temperatura che si crea nel terreno in prossimità di un edificio con piani interrati, al variare dell'altezza di falda e delle fluttuazioni stagionali della temperatura esterna.

Si è sottolineata inoltre la differenza tra le condizioni di aperta campagna e quelle di ambiente urbano, dove la diffusa presenza di edifici porta ad un aumento della temperatura nel suolo.

Nella seconda parte è stato analizzato l'impianto di energy foundation realizzato in un edificio realmente costruito nel comune di Tradate (VA), focalizzando l'attenzione sui principali fattori che ne regolano il funzionamento.

La velocità di movimento del fluido nella serpentina ha un ruolo importante nella trasmissione del calore, poiché il regime di moto presente influenza lo scambio termico e vincola la progettazione e la gestione dell'impianto.

In ultimo è stata analizzata l'influenza dell'impianto sul campo di temperatura nel terreno circostante.

ABSTRACT

The thesis work focuses on the study of low enthalpy geothermal energy sources, used as heating and/or cooling systems for buildings or other structures.

In the last years, the technologies used to exploit these sources are subject to rapid development and increasingly widespread diffusion, in particular with respect to the type called "energy foundation".

The plant consists of a system of coils, placed in the foundation works of the structure, where a fluid flows through.

This flow, due to the presence of a heat pump, enables to extract heat from the ground during winter months and release it during summer.

The analysis has been performed by a numerical approach, resorting to the finite element method

In the first part of the work we studied the change of temperature field created in the soil mass near a building with basements floors, with variation of the water table level and seasonal external temperature.

We pointed out also the difference between countryside and urban conditions, where the widespread presence of buildings leads to an average increase of soil's temperature.

In the second part we analyzed the energy foundation system created in a building under construction in the town of Tradate (VA), focusing on the main factors that regulate its efficiency.

The velocity of the fluid in the coil plays a key role in the process of heat transmission, since the motion type affects the thermal exchange and constrains the design and management of the plant.

Finally the influence of the presence of the plant on the temperature field in the surrounding soil has been analyzed.

INDICE

INDICE	6
Elenco delle figure.....	9
Elenco delle tabelle.....	12
1 INTRODUZIONE	13
1.1 Energie rinnovabili e situazione italiana.....	13
1.2 Geotermia: situazione italiana e mondiale	14
1.3 Impianti geotermici a bassa entalpia	19
1.4 Obiettivi della tesi e limiti della trattazione	20
1.5 Sommario.....	22
2 TEORIA DELLA TRASMISSIONE DEL CALORE	23
2.1 Conduzione, convezione, irraggiamento	23
2.2 Aspetti di calcolo agli elementi finiti	27
2.2.1 Elementi finiti utilizzati per le analisi	31
3 TRASMISSIONE DEL CALORE NEL TERRENO	33
3.1 Modelli esistenti.....	33
3.2 Casi strumentati.....	36
4 ANALISI PRELIMINARI.....	39
4.1 Analisi su un elemento di volume rappresentativo (REV)	39
4.2 Confronto soluzione analitica e soluzione numerica	42
5 EDIFICIO DI TRADATE.....	45
5.1 Geometria	45
5.2 Materiali.....	46
5.3 Condizioni al contorno	50
5.4 Condizioni iniziali	51
5.5 Costruzione della mesh	52
5.6 Risultati	55
5.6.1 Campo di temperatura nel terreno	55
5.6.2 Variazione del livello di falda	62
5.6.3 Studio dell'effetto di eventuali edifici adiacenti.....	65

5.7	Conclusioni.....	67
6	SCAMBIATORI DI CALORE INTEGRATI NELLE OPERE DI FONDAZIONE - STATO DELL'ARTE	69
6.1	Elementi del circuito	71
6.2	Geometria delle fondazioni.....	74
6.3	Raccomandazioni per la pratica	75
6.4	Problematiche	76
6.5	Esempio di applicazione su tipologia differente dall'edificio.....	76
7	STUDIO DI UN PANNELLO TEST	81
7.1	Geometria	81
7.2	Influenza della velocità del fluido sulla trasmissione del calore.....	84
7.2.1	Aspetti idraulici.....	84
7.2.2	Aspetti termodinamici.....	88
7.3	Condizioni al contorno e iniziali	90
7.3.1	Temperatura.....	90
7.3.2	Velocità del fluido	90
7.4	Costruzione della mesh	92
7.5	Analisi	93
7.6	Risultati	93
7.6.1	Considerazioni sulla geometria delle serpentine	93
7.6.2	Relazioni tra flusso di calore, temperatura di uscita dalla serpentina e velocità del fluido	94
7.6.3	Andamento della temperatura lungo l'asse della serpentina	96
7.7	Conclusioni.....	99
8	IMPIANTO DI TRADATE.....	101
8.1	Geometria	101
8.2	Materiali.....	104
8.3	Condizioni al contorno e iniziali	105
8.3.1	Funzionamento MEDIO ANNUO	105
8.3.2	Analisi INVERNO.....	107
8.3.3	Analisi ESTATE	107

8.4	Costruzione della mesh	108
8.5	Risultati	110
8.5.1	Parametri idraulici e termici	110
8.5.2	Andamento della temperatura in uscita dalla serpentina.....	111
8.5.3	Quantità di energia scambiata tra serpentina e terreno	114
8.5.4	Andamento della temperatura lungo l'asse del tubo.....	117
8.5.5	Andamento della temperatura lungo l'estradosso della paratia.....	119
8.5.6	Variazioni del campo di temperatura intorno all'edificio provocate dall'accensione dell'impianto.	122
8.6	Conclusioni.....	129
9	CONCLUSIONI	131
	BIBLIOGRAFIA.....	135

Elenco delle figure

Figura 1.1 - Percentuale della potenza elettrica e termica prodotta di origine geotermica installata nei 5 continenti, 2005 (Unione Geotecnica Italiana, 2007).....	15
Figura 1.2 - Distribuzione percentuale della potenza termica installata nei diversi settori nel mondo, 2005 (Unione Geotecnica Italiana, 2007)	16
Figura 1.3 - Diffusione degli impianti geotermici in Italia al 2012 (Legambiente, 2012)	18
Figura 1.4 - Distribuzione percentuale delle fonti di energia per il riscaldamento in Italia, 2005 (Unione Geotecnica Italiana, 2007).....	19
Figura 1.5 - Schema di un impianto a bassa entalpia.....	19
Figura 2.1 - Elemento di volume rappresentativo in un sistema di coordinate cartesiane (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine).....	24
Figura 2.2 - Elemento di volume rappresentativo in un sistema di coordinate cilindriche (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine).....	24
Figura 2.3 - Elemento di volume rappresentativo in un sistema di coordinate sferiche (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine).....	25
Figura 2.4 - Esempio di convezione naturale.....	25
Figura 2.5 - Esempi di elementi finiti quadrangolari(Corigliano & Taliercio)	28
Figura 2.6 - Funzioni di forma per elementi finiti triangolari(Corigliano & Taliercio).....	29
Figura 3.1 - Sezione dell'edificio strumentato, università del Minnesota, USA(Adjali, Davies, & Rees, 2004).....	35
Figura 3.2 - Confronto dati misurati e formule empiriche.(Adjali, Davies, & Rees, 2004).....	35
Figura 3.3 - The west building, planimetria e sezione (Adjali, Davies, & Rees, 2004).....	37
Figura 3.4 - Localizzazione strumenti (Thomas & Rees, 2009).....	37
Figura 3.5 - Piastra per la misura del flusso di calore.....	38
Figura 4.1 - Condizioni al contorno e iniziali sull'elemento REV.....	39
Figura 4.2 - Andamento temporale della temperatura nel centro del dominio.....	40
Figura 4.3 - Andamento temporale temperatura al variare della profondità (le curve tratteggiate riguardano il terreno saturo, quelle continue il terreno secco)	41
Figura 4.4 - Ritardo della risposta termica del terreno rispetto alla condizione di superficie.....	41
Figura 4.5 - Soluzione analitica: isoterme e linee di flusso (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine)	42
Figura 4.6 - Modello analizzato	43
Figura 4.7 - Isoterme ottenute dalle analisi numeriche, al variare della mesh.	43
Figura 4.8 - Confronto soluzione analitica e risultati numerici.....	44
Figura 5.1 - Sezione studiata dell'edificio di Tradate	45
Figura 5.2 - Andamento di k , ρ , c con il grado di saturazione	49
Figura 5.3 - Condizioni al contorno	50
Figura 5.4 - Andamento medio annuo della temperatura in superficie	51
Figura 5.5 - Mesh definitiva utilizzata per le analisi.....	52
Figura 5.6 - Path per la calibrazione della mesh.....	53

Figura 5.7 - Confronto delle temperature, lungo i path di calibrazione, ottenute con due diverse mesh.....	54
Figura 5.8 - Path orizzontali e verticali.....	55
Figura 5.9 - Campo di temperatura a gennaio (sopra) e a luglio (sotto) nel 10° anno di analisi.....	56
Figura 5.10 - Confronto del profilo di temperatura lungo z tra terreno tra il path v0 e il terreno indisturbato	57
Figura 5.11 - Terreno in condizioni indisturbate: andamento della temperatura nel tempo al variare della profondità.....	57
Figura 5.12 - Temperatura lungo i path orizzontali superficiali.....	58
Figura 5.13 - Temperatura lungo i path orizzontali profondi.....	59
Figura 5.14 - Temperatura lungo i path verticali a sinistra della paratia	60
Figura 5.15 - Temperatura lungo i path verticali a destra della paratia	61
Figura 5.16 - Variazioni del livello di falda.....	62
Figura 5.17 - Andamento della temperatura lungo il path v10 al variare del livello di falda	63
Figura 5.18 - Andamento della temperatura lungo il path o28 al variare del livello di falda	63
Figura 5.19 - Andamento della temperatura lungo il path o25 al variare del livello di falda	64
Figura 5.20 - Geometria del modello con 2 edifici	65
Figura 5.21 - Confronto tra assenza e presenza di un edificio limitrofo (inverno 10° anno).....	66
Figura 5.22 - Confronto tra presenza e assenza di un edificio limitrofo (estate 10° anno).....	66
Figura 6.1 - Esempi d'impianti a bassa entalpia, con serpentine disposte in trincee, pannelli o in pali realizzati appositamente (Brandl, 2006)	69
Figura 6.2 - Schema dei due circuiti e dei flussi di calore (Brandl, 2006)	70
Figura 6.3 - Schema della pompa di calore e dei flussi termici (Brandl, 2006).....	71
Figura 6.4 - Schema dei flussi di calore nella HP	72
Figura 6.5 - Tubi e armature prima del getto del calcestruzzo (Brandl, 2006).....	73
Figura 6.6 - Diverse geometrie di energy foundation (Adam & Markiewicz, 2002).....	74
Figura 6.7 - Sezione del Lainzer Tunnel realizzata con il metodo cut and cover (Brandl, 2006).....	77
Figura 6.8 - Tratto del Lainzer Tunnel realizzato con il New Austrian Tunnelling Method (NATM) (Brandl, 2006)	78
Figura 6.9 - Sezione del rivestimento per il metodo cut and cover (Brandl, 2006).....	78
Figura 6.10 - Membrana in geocomposito con tubi assorbenti (NTAM) (Brandl, 2006).....	79
Figura 6.11 - Dati tecnici della stazione di Hadrtsdorf-Weidlingau (Brandl, 2006)	79
Figura 7.1 - Modelli analizzati	84
Figura 7.2 - Rappresentazione qualitativa dei regimi di moto (Inzoli & Dassù, 2003a).....	85
Figura 7.3 - Abaco di Moody (Citrini & Nosedà, 1987).....	86
Figura 7.4 - Campi di velocità nella zona d'ingresso del tubo, fino a moto completamente sviluppato(Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine).....	89
Figura 7.5 - Profilo di temperatura sulla sezione del tubo al variare del regime di moto	90
Figura 7.6 - Perdite di carico per i diversi modelli al variare della velocità.....	91
Figura 7.7 - Mesh del modello 3D_3	92
Figura 7.8 - Confronto campo di temperatura nei modelli 3D_4 e 3D_5.....	94
Figura 7.9 - Relazione tra lunghezza della serpentina e q scambiata nei 7 modelli analizzati, con V=5mm/s.....	95

Figura 7.10 - Risultati $q(V)$ per i 7 modelli	95
Figura 7.11 - Risultati $T_{out}(V)$ per i 7 modelli	96
Figura 7.12 - Volume di controllo per lo studio del flusso interno in un tubo	97
Figura 7.13 - Path verticale per il calcolo di q_s''	98
Figura 7.14 - Risultato numerico dell'andamento di q_s'' lungo la parete del tubo.	98
Figura 7.15 - Risultato numerico di $T(x)$ lungo l'asse della serpentina.	99
Figura 8.1 - Geometria della sezione studiata dell'edificio di Tradate.....	102
Figura 8.2 - Sezione orizzontale di un pannello	102
Figura 8.3 - Assonometria della paratia, con indicati i piani di simmetria del problema.....	103
Figura 8.4 - Andamento temperatura in ingresso, funzionamento MEDIO ANNUO.....	106
Figura 8.5 - Andamento temperatura in ingresso, analisi INVERNO	107
Figura 8.6 - Andamento temperatura in ingresso, analisi ESTATE.....	108
Figura 8.7 - vista nel piano xy della mesh.....	109
Figura 8.8 - Dettagli della mesh tridimensionale in corrispondenza della serpentina	109
Figura 8.9 - Andamento del coefficiente convettivo h al variare della velocità del fluido.....	111
Figura 8.10 - Temperatura fluido in uscita al variare della velocità, funzionamento MEDIO ANNUO.....	112
Figura 8.11 - Temperatura fluido in uscita al variare della velocità, analisi ESTATE.....	113
Figura 8.12 - Temperatura fluido in uscita al variare della velocità, analisi INVERNO.....	114
Figura 8.13 - Energia scambiata tra serpentina e terreno nei 12 mesi di funzionamento MEDIO ANNUO.....	115
Figura 8.14 - Energia e perdite di carico in funzione della velocità, analisi ESTATE e INVERNO.....	116
Figura 8.15 - Andamento del flusso di calore e della temperatura lungo il tubo	118
Figura 8.16 - Schema pannello e relativo andamento qualitativo temperatura estiva e invernale.	120
Figura 8.17 - Temperatura sull'estradosso della paratia al variare della velocità del fluido	121
Figura 8.18 - Path analizzati con impianto funzionante	122
Figura 8.19 - Andamento temperatura lungo il path v19 al variare della velocità del fluido.....	123
Figura 8.20 - Andamento temperatura lungo il path o28 al variare della velocità del fluido	123
Figura 8.21 - Andamento temperatura lungo il path o25 al variare della velocità del fluido	124
Figura 8.22 - Campo di temperatura del terreno in prossimità dell'estremità inferiore della paratia, con velocità del fluido $V=50$ mm/s (estate e inverno)	125
Figura 8.23 - Confronto campo di temperatura in prossimità della paratia con velocità fluido $V=5$ mm/s e $V=1000$ mm/s	126
Figura 8.24 - Andamento temperatura lungo il path o17,5 al variare della velocità del fluido	126
Figura 8.25 - Andamento temperatura lungo il path o10 al variare della velocità del fluido	127
Figura 8.26 - Bulbo di temperatura in gennaio alla base della paratia, con velocità del fluido $V=50$ mm/s.....	128
Figura 8.27 - Confronto forma bulbo tra fronte (sinistra) e retro (destra) del modello.....	128

Elenco delle tabelle

Tabella 1 - Produzione di energia da fonti geotermiche nel mondo, 2006 (Unione Geotecnica Italiana, 2007)	15
Tabella 2 - Pompe di calore geotermiche in Europa, 2005 (Unione Geotecnica Italiana, 2007)	17
Tabella 3 - Elementi finiti utilizzati nelle analisi	32
Tabella 4 - Proprietà del terreno nell'analisi REV	39
Tabella 5 - Errori massimi dei risultati numerici rispetto alla soluzione analitica	44
Tabella 6 - Proprietà di solido, acqua e aria	47
Tabella 7 - Pesi di terreno saturo, grani solidi e acqua	47
Tabella 8 - Proprietà del terreno saturo e insaturo	48
Tabella 9 - Proprietà del C.A. della paratia (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine)	49
Tabella 10 - Errori massimi percentuali temperatura rispetto all'utilizzo di un mesh più fitta	54
Tabella 11 - Proprietà terreno saturo (sotto falda) e insaturo (sopra falda)	62
Tabella 12 - Calore specifico scambiato (Adam & Markiewicz, 2002)	74
Tabella 13 - Parametri dei materiali nei 7 modelli.....	82
Tabella 14 - Parametri idraulici e termici al variare della velocità del fluido	90
Tabella 15 - Lunghezza della serpentina, numero di curve e perdita di carico ammissibile.....	91
Tabella 16 - Temperatura di uscita e flusso di calore q per i 7 modelli.....	93
Tabella 17 - Parametri materiali modello 3D	104
Tabella 18 - Tabella riassuntiva dei parametri idraulici e termici.....	110

1. INTRODUZIONE

1.1 Energie rinnovabili e situazione italiana

Con il termine “energie rinnovabili” s’intende tutte quelle fonti di energia il cui rinnovo sia apprezzabile alla scala della vita umana. Tra le più frequenti e utilizzate fonti di energia rinnovabile troviamo: solare, eolica, idroelettrica, da biomasse, geotermica.

Negli ultimi decenni, per far fronte a una possibile riduzione della produzione dei giacimenti petroliferi e all’inquinamento prodotto dall’utilizzo di combustibili fossili, nuove tecnologie per lo sfruttamento delle energie rinnovabili hanno subito un forte sviluppo.

Anche se oggi non sono sempre economicamente vantaggiose nel breve periodo, tali energie costituiscono, di fatto, un settore in rapida crescita e potrebbero in futuro rivestire un ruolo sempre più importante nel panorama energetico italiano e mondiale.

Il rapporto di Legambiente “Comuni rinnovabili 2012”, analizzando la distribuzione delle risorse rinnovabili nei comuni italiani, ha evidenziato come la loro crescita in Italia stia già producendo risultati importanti in termini di:

- Riduzione della produzione termoelettrica da fonti fossili.
- Diminuzione delle importazioni dall’estero di fonti fossili.
- Riduzione dell’emissione di CO₂, con evidenti vantaggi sul clima.
- Diminuzione del costo dell’energia elettrica sul mercato.
- Creazione di nuovi posti di lavoro nel settore delle fonti rinnovabili.

L’utilizzo delle risorse rinnovabili permette, combinato con un miglioramento dell’efficienza energetica, di ridurre sia la dipendenza dai mercati energetici esteri sia i consumi.

Proprio l’efficienza energetica è il primo indispensabile pilastro del nuovo scenario energetico. Interventi su di essa permettono di ridurre i fabbisogni, sia di calore sia di elettricità, che possono inoltre essere maggiormente soddisfatti da fonti rinnovabili. Interi edifici, quartieri e ambiti territoriali possono puntare, attraverso questa politica, all’autonomia energetica.

La politica che dovrebbe attuare l’Italia è quindi di sviluppo delle energie rinnovabili, che indirizzi gli utenti, mediante incentivi e agevolazioni, verso un consumo energetico auto-sostenibile e soprattutto pulito.

1.2 Geotermia: situazione italiana e mondiale

Quella geotermica è una forma di energia che trova origine dal calore della terra; da qui esso si propaga fino alle rocce prossime alla superficie.

Quest'aspetto è un vantaggio dell'energia geotermica rispetto a altre fonti rinnovabili (eolico, solare), poiché l'indipendenza dalle condizioni climatiche esterne ne consente uno sfruttamento regolare e costante (salvo casi particolari di estrazione da profondità estremamente ridotte).

dove può essere sfruttato essenzialmente in due modi diversi (Legambiente, 2012):

- Per temperature superiori ai 150 °C si parla di **energia geotermica ad alta entalpia**; l'energia termica è trasformata, grazie ad una turbina a vapore, in energia elettrica (centrale geotermoelettrica).
- Per temperature inferiori ai 150 °C si parla di **energia geotermica a bassa entalpia**, utilizzata esclusivamente come fonte di energia termica.

Si sfrutta in questo caso la costanza di temperatura nel terreno rispetto alla temperatura dell'aria esterna, che risente delle oscillazioni stagionali.

In particolare, temperature del terreno prossime a 15°C, riscontrabili a 15-20 m di profondità permettono di sfruttare il sottosuolo sia come fonte di riscaldamento sia come fonte di raffreddamento degli edifici secondo le esigenze.

Mentre la geotermia ad alta entalpia ha trovato applicazioni sin dall'inizio del 1900 (impianto di Larderello in Toscana, inaugurato nel 1904), la tecnologia a bassa entalpia è piuttosto recente ed è in costante crescita nel nostro Paese e nel mondo.

I dati riguardanti l'utilizzo dell'energia geotermica sono riportati nel rapporto dell'Unione Geotermica Italiana del 2007 e nell'articolo di Lund et al. (Lund, Freeston, & Boyd, 2005)

I dati sono divisi in due tipologie:

- Produzione di energia elettrica attraverso centrali geotermoelettriche (alta entalpia).
- Uso diretto dell'energia termica (bassa entalpia).

La Tabella 1 riassume i dati riguardanti la potenza installata e l'energia annua prodotta a livello globale, rispettivamente espressi in MW o GWh elettrici e termici; è bene notare la differenza di significato tra MW_e e MW_t .

Pur valendo, per entrambi i casi, la definizione generale di potenza, bisogna tener conto che la potenza termica non è uguale a quella elettrica, ma a circa un terzo ($27 kW_e = 9 kW_t$), poiché, convertendo l'energia termica (calore) in elettricità, una parte del calore è persa ed è ceduta all'ambiente. Non è vero il contrario, in quanto l'energia elettrica si può convertire pressoché totalmente in calore, senza perdite (Unione Geotecnica Italiana, 2007).

I dati riguardanti la produzione elettrica, specialmente in merito alla potenza installata, hanno un grado di affidabilità più elevato, poiché il censimento delle centrali geotermoelettriche nel mondo è abbastanza accurato; qualche errore in più è commesso nella stima della potenza prodotta, poiché non è facile quantificare i periodi di fermo impianto per guasti, manutenzioni o altre cause.

Invece i dati riguardanti l'uso "termico" sono meno accurati a causa della frammentazione delle realtà che utilizzano direttamente il calore come fonte di energia, che vanno dall'impianto domestico a quello industriale e possono essere presenti in luoghi remoti e spesso non censiti dagli stessi stati.

Inoltre le tipologie di utilizzo sono molto varie (come illustrato di seguito), per cui i dati vanno considerati solamente come indicativi dell'ordine di grandezza.

Produzione di energia da fonti geotermiche nel mondo (anno 2006)		
Uso	Potenza installata [MW]	Energia annua prodotta [GWh/anno]
Energia elettrica	8933	56786
Usi diretti del calore	28268	75943

Tabella 1 - Produzione di energia da fonti geotermiche nel mondo, 2006 (Unione Geotecnica Italiana, 2007)

La produzione totale di energia elettrica nel mondo è pari a 11.300.000 GWh, da cui si deduce che la produzione da fonti geotermiche copre solo lo 0,5% del fabbisogno totale.

La Figura 1.1 illustra la distribuzione (in %) della potenza totale installata (elettrica e termica) nei 5 continenti.

Si nota come America, Europa e Asia abbiano le maggiori percentuali di potenza installata, in particolare l'Europa ha la maggiore potenza termica, seguita dall'America.

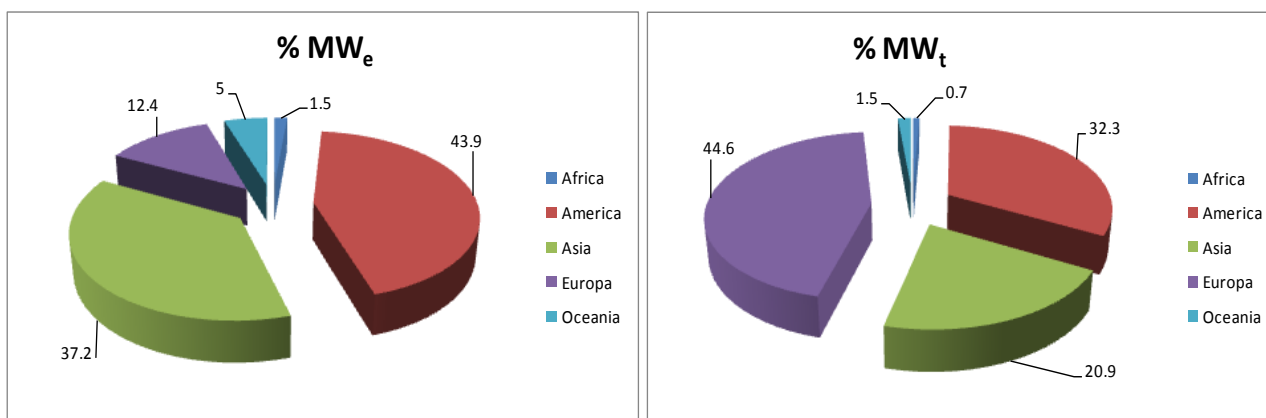


Figura 1.1 - Percentuale della potenza elettrica e termica prodotta di origine geotermica installata nei 5 continenti, 2005 (Unione Geotecnica Italiana, 2007)

L'utilizzo diretto del calore è distribuito nei diversi settori come riportato in Figura 1.2.

Gli impianti con pompa di calore hanno quasi il 60% della potenza totale installata, seguiti dalla balneologia (piscine, centri termali, ecc).

Nella Figura 1.2 per "riscaldamento di ambienti" s'intende quello realizzato utilizzando direttamente acqua calda naturale, senza dover innalzare la temperatura mediante una pompa di calore.

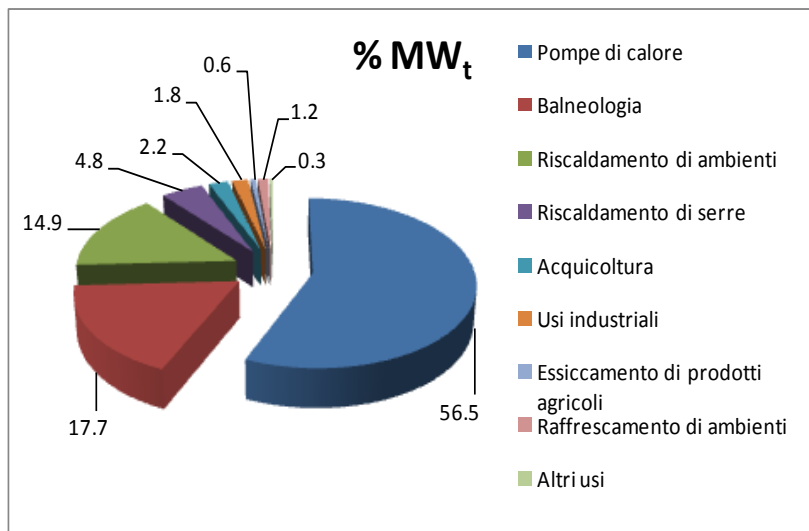


Figura 1.2 - Distribuzione percentuale della potenza termica installata nei diversi settori nel mondo, 2005 (Unione Geotecnica Italiana, 2007)

In Europa la produzione di energia elettrica da centrali geotermiche, è presente quasi esclusivamente in Italia e Islanda (rispettivamente 791 e 202 MW_e su un totale europeo di 1030 MW_e), poiché solo in questi stati vi sono condizioni della litosfera, legate all'attività vulcanica, tali da generare aree con temperatura sufficiente per la produzione di vapore.

Molto diffuso è l'utilizzo d'impianti (a bassa entalpia) con pompa di calore che, richiedendo temperature più basse, possono essere installati ovunque sul territorio (Tabella 2).

La Svezia guida la classifica in termini d'impianti equivalenti da 12 kW_t installati (presi come riferimento di un impianto con potenza media, così da poter comparare i risultati).

L'energia prodotta, riportata nella seconda colonna, è espressa in TJ, dove:

$$1 \text{ TJ} = 3600 \text{ GWh}$$

Paese <i>Country</i>	Potenza installata <i>Installed capacity (MW_t)</i>	Uso annuo di energia <i>Annual energy use (TJ/a)</i>	Numero di unità equivalenti da 12 kW _t <i>Equivalent 12 kW_t units</i>
Austria	300,0	1450,0	25.000
Belgio	60,0	324,0	5000
Bielorussia <i>Belarus</i>	1,0	3,3	42
Bulgaria	0,3	4,4	25
Danimarca	309,0	3940,0	25.750
Finlandia	260,0	1950,0	21.667
Francia	16,1	468,8	1342
Germania	400,0	2200,0	33.333
Gran Bretagna	10,2	45,6	850
Grecia	4,0	39,1	333
Irlanda	19,6	83,6	1633
Islanda	4,0	20,0	333
Italia	120,0	500,0	10.000
Lituania	18,0	429,0	1500
Norvegia	600,0	3085,0	50.000
Olanda	253,5	685,0	21.125
Polonia	103,6	574,4	8633
Portogallo	0,2	0,0	17
Rep. Ceca <i>Czech Rep.</i>	200,0	1130,0	16.667
Russia	1,2	11,5	100
Slovenia	3,3	69,9	275
Svezia	3840,0	36.000,0	320.000
Svizzera	532,4	2854,0	44.367
Serbia	6,0	40,0	500
Slovacchia	1,4	12,1	117
Ungheria	4,0	22,6	333
TOTALE / TOTAL	7.067,8	55.942,3	588.983

Tabella 2 - Pompe di calore geotermiche in Europa, 2005 (Unione Geotecnica Italiana, 2007)

Come per il resto del mondo, anche in Italia negli ultimi anni lo sfruttamento dell'energia geotermica sta subendo una rapida diffusione, soprattutto per quanto concerne la bassa entalpia.

Il motivo risiede nell'uniformità con cui essa è disponibile sul territorio nazionale; infatti, le temperature di cui necessita la tecnologia ad alta entalpia sono disponibili a profondità accettabili solo in zone circoscritte, situate in: Toscana, Lazio, Sardegna, Lombardia, Sicilia, Campania, Veneto, Emilia Romagna.

Attualmente, dei 334 comuni italiani che sfruttano energia geotermica, sono 11 quelli che hanno impianti ad alta entalpia: 9 comuni toscani (nei pressi di Lardarello), Ferrara e a San Pellegrino Terme (BG).

La potenza complessiva degli impianti ad alta entalpia fine 2006 è pari 810,5 MW, per un'energia totale di 5.500.000 MWh elettrici lordi all'anno, che rappresentano l'1,7 % dell'energia elettrica prodotta in Italia.



Figura 1.3 - Diffusione degli impianti geotermici in Italia al 2012 (Legambiente, 2012)

L'energia geotermica totale prodotta per uso diretto del calore è pari 805 GWh, somma dei contributi derivanti da varie attività: climatizzazione edifici, acquicoltura, balneologia (piscine, impianti termali), usi industriali, ecc (Unione Geotecnica Italiana, 2007).

Del totale di 805 GWh, 196 GWh rappresenta l'energia utilizzata per il riscaldamento e/o raffreddamento degli edifici, un'esigua parte (poco più dello 0,1%) rispetto al fabbisogno italiano, stimato intorno ai 160.000 GWh.

Come la geotermia, anche le altre fonti di energia rinnovabile rappresentano una piccola parte (4,73%) dell'energia totale utilizzata per la climatizzazione degli edifici (Figura 1.4), segno di un settore sì in aumento ma ancora poco diffuso rispetto alle fonti energetiche tradizionali.

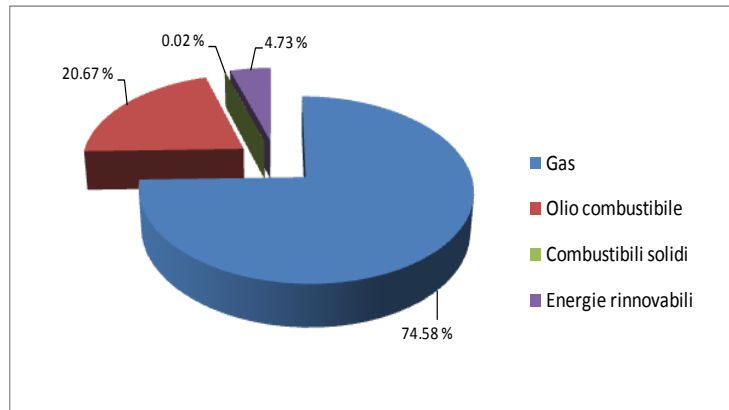


Figura 1.4 - Distribuzione percentuale delle fonti di energia per il riscaldamento in Italia, 2005 (Unione Geotecnica Italiana, 2007)

Secondo il rapporto UGI (2007) lo sviluppo della produzione di energia elettrica da fonti geotermiche negli ultimi anni ha subito un rallentamento, mentre in forte crescita è l'uso diretto del calore, specialmente nelle nuove applicazioni come impianti combinati di riscaldamento/raffrescamento o opere di fondazione dotate di scambiatori integrati.

La trattazione nella seguente tesi è limitata agli impianti a bassa entalpia, che utilizzano direttamente l'energia termica senza la produzione di energia elettrica.

1.3 Impianti geotermici a bassa entalpia

In Figura 1.5 si riporta lo schema di un impianto a bassa entalpia:

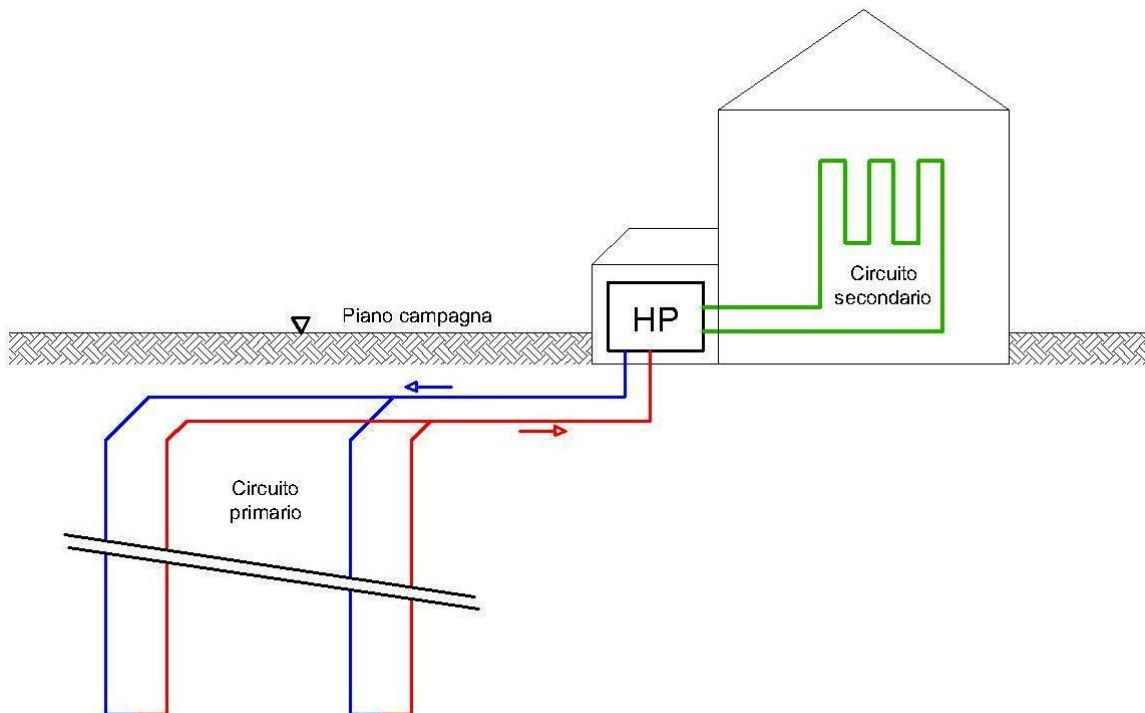


Figura 1.5 – Schema di un impianto a bassa entalpia

Il circuito primario è costituito da un sistema di serpentine, disposte a contatto col terreno, nelle quali circola un fluido termovettore.

Quest'ultimo scambia calore con il terreno circostante e lo trasferisce, attraverso una macchina detta pompa di calore (HP), al circuito secondario che lo distribuisce all'interno dell'edificio.

Una tipologia particolare d'impianto, detta **energy foundation**, prevede l'inserimento di scambiatori integrati direttamente nella struttura di fondazione dell'edificio (muri a diaframma, pali, platea ecc). Questo consente di avere una riduzione dei costi rispetto a un'installazione direttamente nel terreno (in trincee), poiché non è necessario realizzare opere aggiuntive rispetto a quelle già necessarie per una struttura ordinaria.

Di contro questi impianti limitano lo scambio di calore a una porzione di terreno piuttosto limitata, limitrofa alle opere di fondazione, la cui forme e dimensioni giocano un ruolo decisivo nel bilancio energetico terreno-impianto.

1.4 Obiettivi della tesi e limiti della trattazione

L'obiettivo della tesi è la costruzione di un modello numerico a elementi finiti per lo studio del campo di temperatura nel terreno, in presenza di un edificio dotato di energy foundation.

Il modello numerico deve permettere la descrizione dell'interazione tra fluido e terreno, **considerandone l'influenza reciproca**, alla presenza di condizioni al contorno variabili e geometrie non regolari.

Lo studio si focalizza sull'analisi di un impianto a bassa entalpia costituito da scambiatori integrati nelle opere di fondazione di un edificio residenziale situato nel comune di Tradate (VA).

L'edificio in questione è stato scelto come riferimento durante lo svolgimento della tesi, così da avere un esempio realistico per quanto riguarda la scelta dei parametri del modello, quali materiali, geometria, condizioni al contorno, condizioni iniziali, ecc.

Il modello numerico a elementi finiti è stato analizzato attraverso il codice di calcolo *Abaqus 6.10*.

La tesi è organizzata in due parti.

Nella **prima parte** è stato studiato il campo di temperatura che si crea nel terreno in prossimità dell'edificio a impianto spento, assumendo le seguenti ipotesi:

1. Il terreno è considerato un mezzo omogeneo e isotropo, le cui proprietà sono ottenute come media pesata di quelle dei singoli costituenti. Esso, infatti, è un mezzo generalmente trifase, costituito da una parte solida (grani), una liquida (acqua) e una gassosa (aria).
2. Il regime di falda è idrostatico, cioè non sono considerati moti di filtrazione.

3. Lo scambio termico tra terreno e ambiente esterno è regolato dall'alternanza delle stagioni; è stato ipotizzato un andamento annuo della temperatura esterna dell'aria, ma sono stati trascurati i contributi allo scambio termico dati dall'irraggiamento solare, dalla velocità del vento e dalle precipitazioni atmosferiche.
4. Lo scambio termico nel terreno è descritto attraverso un modello di sola conduzione in materiale omogeneo, trascurando l'accoppiamento tra la temperatura, l'umidità del suolo e lo stato di sforzo.

Il campo di temperatura è stato studiato al variare dell'altezza di falda e ipotizzando la presenza di un secondo edificio vicino a quello in esame, così da riprodurre una situazione tipica di un ambiente urbano.

Nella **seconda parte** l'attenzione è stata concentrata sullo studio degli scambiatori integrati installati nell'edificio di Tradate; la trattazione si limita all'interazione tra il circuito primario e il terreno circostante, senza considerare gli aspetti impiantistici (pompa di calore, dispositivi di controllo, ecc.) e il circuito secondario di distribuzione nell'edificio.

Le ipotesi adottate sono le stesse riguardanti la prima parte, con l'aggiunta delle seguenti:

5. Non si considera il tratto d'impianto compreso tra la pompa di calore e il pannello nel quale è inglobata la serpentina.
6. Il fluido si muove nelle serpentine con velocità costante, trascurando i disturbi localizzati dovuti a discontinuità geometriche quali curve o restringimenti.
7. L'andamento della temperatura del fluido in ingresso nella serpentina è stato ipotizzato, essendo in realtà dipendente dall'interazione tra il circuito primario, quello secondario e la pompa di calore.

È stato prima condotto lo studio su un pannello test, di dimensioni ridotte, così da poter cogliere i parametri che influenzano il problema.

In seguito le analisi sono state riprodotte sull'impianto dell'edificio, per valutare quantitativamente lo scambio termico terreno-impianto e l'influenza di quest'ultimo sul campo di temperatura circostante.

Per l'edificio di Tradate non sono disponibili dati sperimentali rilevati in sito riguardanti il funzionamento dell'impianto e la trasmissione del calore nel terreno. Questo non consente una calibrazione del modello e la verifica dei risultati è basata sul confronto con alcune soluzioni teoriche disponibili.

1.5 Sommario

Nel **capitolo 2** è esposta la teoria di base della trasmissione del calore e della modellazione a elementi finiti del fenomeno.

Parte 1

Nel **capitolo 3** sono riassunti i principali modelli esistenti per la descrizione del fenomeno della trasmissione del calore nel terreno e riportati alcuni esempi di casi strumentati.

Nel **capitolo 4** sono riportate le analisi preliminari fatte sull'elemento di volume rappresentativo (REV); queste analisi permettono di verificare la modalità di modellazione e la procedura di calcolo del codice a elementi finiti utilizzato (Abaqus 6.10), prima di analizzare il problema in scala reale.

Nel **capitolo 5** si analizza il campo di temperatura che si forma in prossimità di un edificio reale, realizzato a Tradate, al variare di alcuni parametri quali posizione della falda e in presenza o meno di edifici limitrofi.

Parte 2

Nel **capitolo 6** si riporta lo stato dell'arte relativo agli impianti a bassa entalpia, con particolare attenzione agli scambiatori integrati nelle fondazioni e ai relativi aspetti tecnici, costruttivi e applicativi.

Nel **capitolo 7** si procede allo studio dell'ottimizzazione della disposizione delle serpentine in un pannello test, esaminando sette configurazioni differenti al variare della velocità di movimento del fluido termovettore. È inoltre approfondito lo studio del legame tra la velocità e la trasmissione del calore.

Nel **capitolo 8** sono applicati i concetti studiati nel capitolo 7 all'impianto situato nell'edificio di Tradate, valutando inoltre l'influenza dell'impianto stesso sul campo di temperatura del terreno.

2 TEORIA DELLA TRASMISSIONE DEL CALORE

2.1 Conduzione, convezione, irraggiamento

Si definisce calore l'energia che fluisce tra due corpi a temperature differenti, attribuibile a livello microscopico al diverso stato d'agitazione molecolare.

Le modalità secondo le quali avviene la trasmissione del calore sono le seguenti (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine):

- Conduzione
- Convezione
- Irraggiamento

Conduzione

La conduzione può essere definita come il trasferimento di energia, per contatto diretto, da particelle a livello energetico più alto (cioè a temperatura maggiore) verso quelle a energia più bassa. La temperatura più alta è associata a una maggiore oscillazione delle particelle stesse, che per contatto diretto provocano l'aumento del movimento nelle molecole adiacenti.

Un esempio semplice di conduzione è la propagazione del calore in un corpo solido, avente due estremità a temperatura differente.

Il trasferimento di energia richiede quindi la presenza di un gradiente termico negativo. Si definisce flusso termico q [W/m²]:

$$q = -k\nabla T = -k\left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

In cui:

- T : temperatura [°C]
- k : conducibilità termica [W/(m °C)], caratteristica del materiale. Maggiore è k , più facilmente avviene il processo di trasferimento del calore per conduzione

Dato un sistema di coordinate cartesiane (x,y,z) , applicando l'equazione di continuità del flusso termico a un volume unitario e ipotizzando k isotropa, si ottiene l'equazione generale della conduzione:

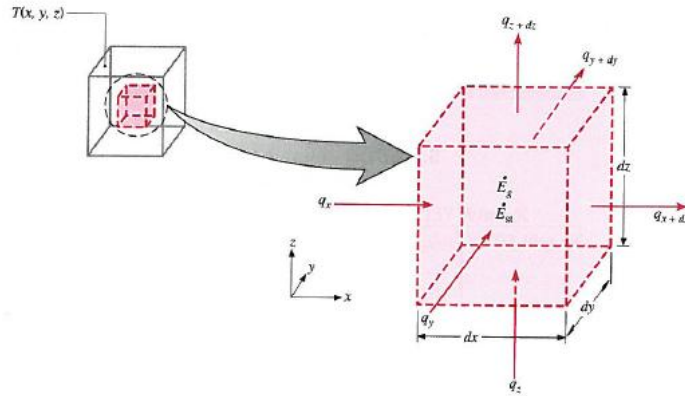


Figura 2.1 – Elemento di volume rappresentativo in un sistema di coordinate cartesiane (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

- α : diffusività termica [m^2/s], pari a:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c}$$

- ρ : densità del mezzo [kg/m^3]
- c : calore specifico [$\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$]

\dot{q} è presente solo se si ha generazione interna di calore; il termine a destra dell'uguale descrive la variazione di temperatura nel tempo (transitorio) ed è nullo se si considera il regime stazionario.

L'equazione può essere scritta anche in coordinate cilindriche e sferiche, con riferimento ai disegni seguenti:

Coordinate cilindriche:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

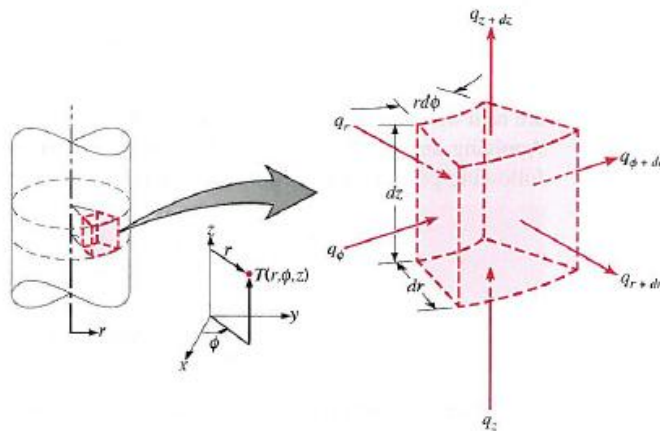


Figura 2.2 - Elemento di volume rappresentativo in un sistema di coordinate cilindriche (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine)

Coordinate sferiche:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

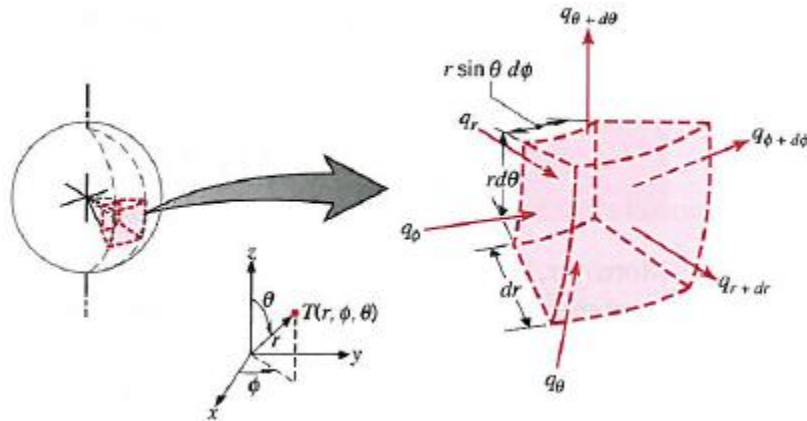


Figura 2.3 - Elemento di volume rappresentativo in un sistema di coordinate sferiche (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine)

Convezione

La convezione termica è un fenomeno di trasmissione del calore che avviene in presenza di un mezzo fluido in moto relativo rispetto a una parete (Inzoli & Dassù, 2003a).

In base alla causa che genera il movimento del fluido si possono distinguere i seguenti tipi di convezione:

- Se si considera un mezzo fluido (aria o acqua) a temperatura T_1 che entra in contatto con una superficie solida a temperatura T_2 , con $T_2 > T_1$, il fluido in prossimità della parete scambia calore per conduzione e, aumentando di temperatura, diminuisce la propria densità.

A causa della spinta di Archimede, il fluido a temperatura maggiore sale verso l'alto e richiama il fluido più freddo che lo circonda, generando così moti convettivi; la convezione si dice **naturale** (Figura 2.4).

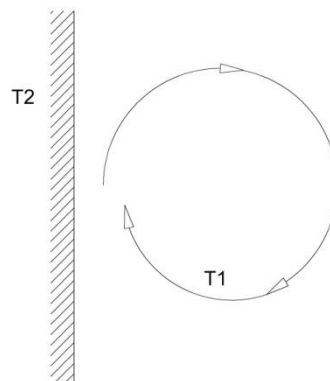


Figura 2.4 - Esempio di convezione naturale

- Nel caso in cui i moti convettivi non siano generati da una differenza di densità dei due mezzi, ma da cause perturbatrici esterne, quali pompe, compressori e ventilatori, la convezione è definita **forzata**.
- Quando il moto convettivo del fluido è dovuto sia a differenze di densità sia a forze esterne, si parla di convezione di tipo **misto**.

Il fenomeno è composto di due meccanismi: diffusione molecolare a livello microscopico e movimento di fluido a livello macroscopico.

Per risolvere il problema generale della convezione è richiesta la soluzione di un sistema di tre equazioni:

- Bilancio di massa.
- Bilancio delle forze.
- Bilancio di energia.

La terza equazione, scritta per un volume di fluido infinitesimo e fisso, è la seguente:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho c \left[u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right]$$

Dove:

- $\rho c \frac{\partial T}{\partial t}$ variazione di energia interna.
- $k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$ calore scambiato per conduzione.
- $\rho c \left[u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right]$ calore scambiato per convezione.

Lo scambio termico per convezione è strettamente legato alle caratteristiche fisiche del fluido e alla geometria del problema.

In generale la trattazione analitica del fenomeno è molto complessa e spesso possibile solo per geometrie semplici; da ciò deriva la scelta di procedere a uno studio sperimentale del problema attraverso l'introduzione di una legge fenomenologica detta legge di Newton:

$$q = h(T_p - T_f)$$

Dove:

- q : flusso termico [W/(m² °C)].
- h : coefficiente convettivo [W/(m² °C)]. In esso sono concentrate tutte le difficoltà di determinazione del flusso termico convettivo, poiché h è funzione della natura del fluido, della geometria del sistema e del regime di moto.
- T_p : temperatura della parete [°C].
- T_f : temperatura del fluido, opportunamente definita in base al problema [°C].

Nei casi esaminati in questo elaborato, si ha sempre un problema di convezione forzata, dove il fluido si muove all'interno di un tubo. Sull'interfaccia tra parete e fluido, a causa dell'attrito, il liquido è praticamente fermo, per cui la trasmissione del calore avviene per pura conduzione, quindi funzione del gradiente locale di temperatura. Il flusso termico convettivo quindi non è altro che il flusso conduttivo all'interfaccia solido-liquido (Inzoli & Dassù, 2003a).

Il valore di h può essere stimato attraverso il numero di Nusselt Nu , parametro adimensionale rappresentante il rapporto tra la potenza termica scambiata per conduzione in uno strato di fluido in quiete di spessore L e la potenza termica scambiata per convezione con il fluido in movimento:

$$Nu = \frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{h(T_p - T_f)}{\frac{k}{L}(T_p - T_f)} = \frac{hL}{k}$$

Ulteriori aspetti legati alla relazione tra scambio termico e campo fluidodinamico saranno approfonditi nel capitolo 7.2.

Irraggiamento

L'irraggiamento è uno dei tre modi attraverso cui avviene la propagazione del calore. In particolare, al contrario della conduzione e della convezione, non prevede contatto diretto tra gli scambiatori e non richiede un mezzo per propagarsi.

È quindi un fenomeno che interessa ogni aggregato materiale, non importa se solido, liquido o gassoso, e avviene anche nel vuoto. Questo è giustificato dal fatto che il trasferimento di calore per irraggiamento avviene sotto forma di onde elettromagnetiche.

Il flusso di calore emesso da un corpo a temperatura T è proporzionale a T^4 (con T espressa in gradi Kelvin); l'irraggiamento nel suolo è trascurabile rispetto alla conduzione e alla convezione (Thomas & Rees, 2009).

Il calore nell'irraggiamento si propaga sia dal corpo a temperatura maggiore verso quello a temperatura minore sia viceversa; questa caratteristica lo distingue dalla conduzione e dalla convezione, non essendo richiesto un gradiente di temperatura esclusivamente negativo. Ovviamente, per quanto detto sopra, il flusso sarà maggiore nel primo dei due casi.

2.2 Aspetti di calcolo agli elementi finiti

L'approccio a elementi finiti prevede una discretizzazione spaziale del dominio, che viene suddiviso in elementi geometrici composti da spigoli e nodi; l'insieme degli elementi è chiamato mesh.

La forma e la tipologia degli elementi finiti varia in funzione del dominio da discretizzare. Per domini bidimensionali in genere si usano elementi finiti triangolari o quadrangolari, per domini 3D tetraedrici o esaedrici.

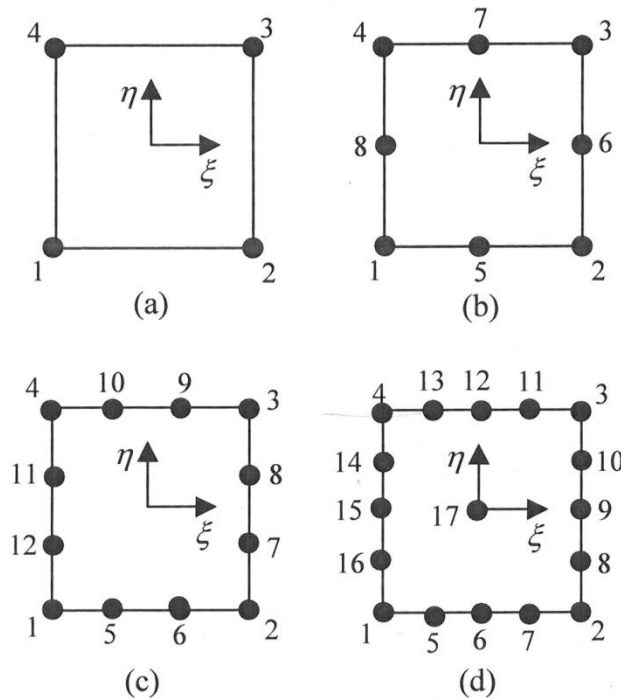


Figura 2.5 – Esempi di elementi finiti quadrangolari (Corigliano & Taliercio)

A ogni nodo dell'elemento è associata una variabile nodale (in questo caso la sola temperatura); le variabili di tutti i nodi della mesh sono poi raccolte nel vettore \mathbf{T}^* , che contiene le incognite del problema.

Un'altra caratteristica dell'elemento finito è la tipologia della funzione di forma N_i , che permette di interpolare il risultato lungo la superficie dell'elemento. Infatti, il calcolo della soluzione è fatto nei nodi (o nei punti di Gauss, che garantiscono migliori proprietà d'integrazione), e poi la soluzione per i restanti punti dell'elemento è interpolata attraverso la funzione di forma.

Più alto è il grado della funzione, maggiore è il numero di nodi richiesto; cresce quindi la precisione del calcolo ma di conseguenza anche l'onere computazionale. Generalmente si utilizzano funzioni di forma lineari o quadratiche, che impongono rispettivamente la presenza di 2 o 3 nodi lungo ogni lato.

La temperatura in ogni punto dell'elemento T può essere calcolata come:

$$T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) T_i(t)$$

dove:

- N_i è la funzione di forma relativa al nodo i .
- T_i è la temperatura nel singolo nodo, variabile nel tempo per il regime transitorio.

- n è il numero di nodi dell'elemento.

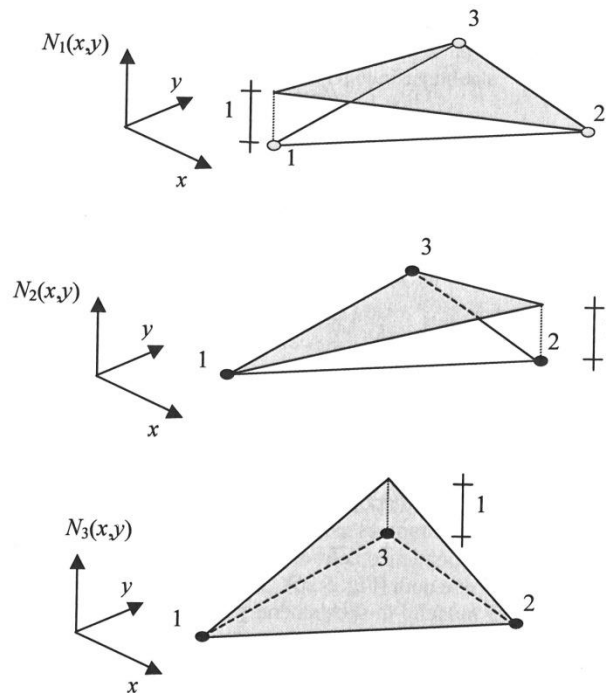


Figura 2.6 – Funzioni di forma per elementi finiti triangolari (Corigliano & Taliercio)

Come indicato nella Figura 2.6 (esempio di funzione lineare), la funzione di forma ha valore unitario nel nodo e decresce verso gli altri nodi. Questo significa, com'è intuitivo osservare, che la temperatura in un punto dell'elemento è maggiormente influenzata dal nodo più vicino e in misura minore dai nodi più distanti.

Realizzata la mesh, è necessario trasformare l'equazione della trasmissione del calore dalla forma differenziale alla forma matriciale (discretizzata) così da permetterne la risoluzione numerica.

Esistono diversi modi per compiere quest'operazione; nei casi di trasmissione del calore in genere si possono adottare due approcci: quello variazionale o il metodo di Galerkin.

Entrambi impongono una condizione che, una volta verificata, garantisce il rispetto dell'equazione differenziale di partenza.

Si esamina qui il solo metodo di Galerkin, poiché è quello utilizzato dal codice di calcolo (*Abaqus 6.10*) impiegato per le analisi.

La condizione imposta è:

$$\int_{\Omega} N_k f(\mathbf{T}^*) d\Omega = 0$$

Dove Ω rappresenta il volume considerato, \mathbf{T}^* il vettore delle temperature nodali e $f(\mathbf{T}^*)$ rappresenta in questo caso la funzione che esprime il bilancio termico in forma differenziale.

Nel caso si voglia trattare il solo processo di conduzione termica, in assenza di generazione interna e con conducibilità termica k isotropa e indipendente dalla temperatura T :

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

la condizione di Galerkin diventa:

$$\int_{\Omega} N_i \left[k \left(\frac{\partial^2 \mathbf{T}^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{T}^*}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{T}^*}{\partial z^2} \right) - \rho c \frac{\partial \mathbf{T}^*}{\partial t} \right] d\Omega = 0$$

Essendo presenti derivate del 2° ordine, è spesso essenziale l'integrazione per parti (Lewis, Nithiarasu, & Seetharamu, 2004); utilizzando il teorema di Green si possono scomporre le derivate di 2° ordine in due parti ottenendo:

$$\begin{aligned} - \int_{\Omega} \left[k \left(\frac{\partial N_k}{\partial x} \frac{\partial \mathbf{T}^*}{\partial x} + \frac{\partial N_k}{\partial y} \frac{\partial \mathbf{T}^*}{\partial y} + \frac{\partial N_k}{\partial z} \frac{\partial \mathbf{T}^*}{\partial z} \right) + N_i \rho c \frac{\partial \mathbf{T}^*}{\partial t} \right] d\Omega \\ + \int_{\Gamma} N_i k \left(\frac{\partial \mathbf{T}^*}{\partial x} \right) d\Gamma + \int_{\Gamma} N_i k \left(\frac{\partial \mathbf{T}^*}{\partial y} \right) d\Gamma + \int_{\Gamma} N_i k \left(\frac{\partial \mathbf{T}^*}{\partial z} \right) d\Gamma = 0 \end{aligned}$$

dove Γ è il contorno del dominio.

Isolando i termini contenenti \mathbf{T}^* si giunge all'espressione sintetica:

$$\mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{T}^*}{\partial t} + \mathbf{K} \mathbf{T}^* = \mathbf{f}$$

La matrice \mathbf{K} contiene i termini legati alla conducibilità termica:

$$\mathbf{K} = - \int_{\Omega} k \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} \mathbf{T}_j + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \mathbf{T}_j + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \mathbf{T}_j \right) d\Omega$$

La matrice \mathbf{C} contiene i termini legati alla capacità termica del dominio, funzione quindi del calore specifico c :

$$\mathbf{C} = \int_{\Omega} \rho c N_i N_j d\Omega$$

mentre il vettore \mathbf{f} contiene i termini noti e il vettore \mathbf{T}^* le incognite.

La condizione di Galerkin permette di verificare che ad ogni iterazione venga soddisfatto il bilancio termico globale; in particolare, quando la conducibilità termica k , come in questo caso, è indipendente dalla temperatura T , il sistema è lineare e non richiede una soluzione iterativa.

Qualora si voglia descrivere il fenomeno della convezione, la condizione di Galerkin assume la seguente espressione:

$$\int_{\Omega} N_i \left[k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho c \left[u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right] d\Omega = 0$$

e la risoluzione numerica del problema è del tutto analoga al caso della conduzione.

2.2.1 Elementi finiti utilizzati per le analisi

In Abaqus gli elementi finiti sono contraddistinti da un codice identificativo che ne riporta in sintesi le caratteristiche, come nell'esempio sotto riportato:

DC2D4

In cui:

- 1° lettera: rappresenta il tipo di analisi, D = Diffusion Heat Transfer
- 2° lettera: rappresenta la famiglia dell'elemento finito, C = Continuum Element
- 3°- 4° lettera: rappresentano il numero di dimensioni dell'elemento 2D= bidimensionale
- 5° lettera: rappresenta il numero di nodi dell'elemento.

Le analisi svolte nel corso dell'elaborato riguardano la sola trasmissione del calore in un mezzo continuo, quindi sono considerati elementi DC, secondo lo schema di seguito riportato:

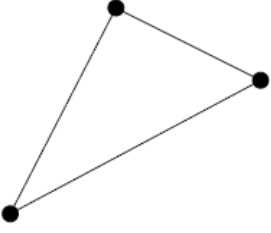
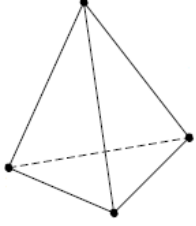
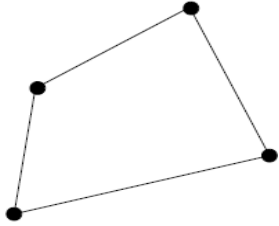
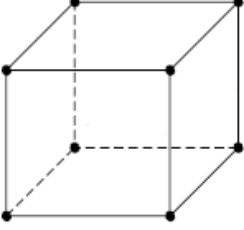
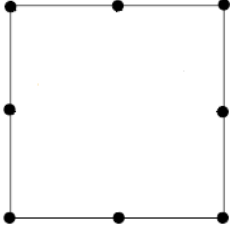
<p>DC2D3</p> 	<p>DC3D4</p> 
<p>DC2D4</p> 	<p>DCC3D8</p> 
<p>DC2D8</p> 	

Tabella 3 – Elementi finiti utilizzati nelle analisi

Gli elementi finiti di tipo DCC sono un'estensione di quelli DC e permettono di riprodurre il movimento del fluido nel caso di convezione forzata un tubo. Sono stati utilizzati nelle analisi dei capitoli 7 e 8, per la discretizzazione della serpentina.

Parte 1

In questa prima parte dell'elaborato si analizza il problema della trasmissione del calore nel terreno.

Dopo una breve sintesi dello stato dell'arte sullo studio del campo di temperatura nel terreno, sono state svolte analisi semplificate su un elemento unitario (REV), per poi passare all'analisi di una geometria realistica prendendo ad esempio un edificio situato a Tradate.

3 TRASMISSIONE DEL CALORE NEL TERRENO

3.1 Modelli esistenti

Al fine di eseguire una corretta analisi quantitativa del calore estratto dal terreno, è necessario innanzitutto creare un modello concettuale il più possibile corretto delle caratteristiche del sottosuolo.

Nei sistemi ad alta entalpia, essendo basati sull'estrazione di calore a elevate profondità, il terreno può essere considerato un mezzo bifase solido-acqua, mentre in quelli a bassa entalpia, e in particolare per le energy foundation, il terreno va considerato un mezzo trifase (acqua-solido-aria) in cui percentuali dei singoli costituenti sono fortemente influenzate dall'escursione del livello di falda.

Come specificato nel capitolo 2.1, nel bilancio termico l'irraggiamento viene in genere trascurato, poiché costituisce una piccola percentuale del calore scambiato tra terreno e impianto; questo semplifica molto la descrizione del fenomeno di trasmissione del calore. Supportati da dati sperimentali, diversi autori negli ultimi anni hanno elaborato modelli più o meno approfonditi per la descrizione della propagazione del calore nel terreno.

Un modello completo per la descrizione del fenomeno è quello proposto da Janssen et al. (Janssen, Carmeliet, & Hens, 2004).

Il problema della trasmissione del calore è studiato considerando l'accoppiamento tra il trasferimento di calore e quello di umidità all'interno del suolo.

Infatti, le proprietà termiche (coefficiente di conducibilità e calore specifico) dipendono dal contenuto d'acqua nel suolo e quest'ultimo è a sua volta funzione della temperatura.

La risoluzione (numerica) del problema è molto complessa, richiedendo la soluzione accoppiata delle equazioni di trasferimento del calore e dell'umidità, che per giunta sono non lineari, contenendo i termini che descrivono il calore latente presente nel cambiamento di fase dell'acqua, da liquido a vapore.

La soluzione è inoltre onerosa dal punto di vista computazionale, richiedendo un tempo di calcolo molto grande, e soggetta a possibili instabilità o problemi di convergenza.

Lo stesso autore termina considerando che la differenza rispetto a modelli più semplici (che affrontano il problema in modo disaccoppiato) può essere trascurata nelle normali applicazioni ingegneristiche, anche a seguito dell'elevata complessità del modello accoppiato, che lo rende difficilmente utilizzabile in campo pratico.

Altri modelli (Thomas & Rees, 2009) semplificano il problema trascurando l'accoppiamento degli effetti tra trasmissione del calore e filtrazione dell'acqua. Secondo questi modelli il flusso di calore è dovuto alla sola conduzione; questo permette di semplificare il problema e avere simulazioni meno onerose dal punto di vista computazionale.

L'equazione di conduzione bidimensionale utilizzata è:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Le proprietà termiche del suolo (conducibilità termica e calore specifico), essendo il mezzo trifase, sono state ottenute come media pesata sulle percentuali dei tre componenti, come descritto nel capitolo 5.2.

La risoluzione del problema, tranne che per geometrie molto semplici, deve essere affrontata per via numerica.

In alternativa ai modelli numerici, alcuni autori (Adjali, Davies, & Rees, 2004) sulla base di dati sperimentali, hanno formulato espressioni empiriche per la quantificazione del flusso di calore tra terreno ed eventuali strutture.

Tali formule possono restituire dati discordi rispetto a quelli effettivamente misurati, ma costituiscono comunque un valido strumento per verifiche speditive.

Esistono molte formule empiriche proposte in letteratura, alcune delle quali sono entrate a far parte della normativa tecnica in materia di quantificazione del calore disperso da un edificio attraverso le fondazioni.

Alcuni esempi sono le formule fornite da enti quali ASHRAE, CIBSE, AICVF, CEN o il metodo di Krarti.

Queste formule si basano sulla stima empirica della conducibilità termica k , al fine di determinare il flusso di calore mediante la formula:

$$q = -k \nabla T$$

Ad esempio, nel metodo di Krarti il flusso di calore è stimato come prodotto di tre fattori, che tengono conto rispettivamente di:

- geometria della struttura (CF)
- geologia del suolo (LF)
- isolamento termico (IF)

$$q = CF \cdot LF \cdot IF$$

A titolo d'esempio si riporta di seguito il confronto tra i risultati forniti dalle singole formule empiriche sopra citate e dati misurati, per il particolare caso di un edificio strumentato costruito all'università del Minnesota (USA) (Adjali, Davies, & Rees, 2004).

L'edificio, realizzato in calcestruzzo, presenta una pianta quadrata di $5,89 \times 5,89 \text{ m}^2$ per un'altezza complessiva di 2,49 m; è presente inoltre una copertura piana in materiale isolante assunta adiabatica. L'edificio è seminterrato e presenta un'altezza fuori terra di circa 0,4 m.

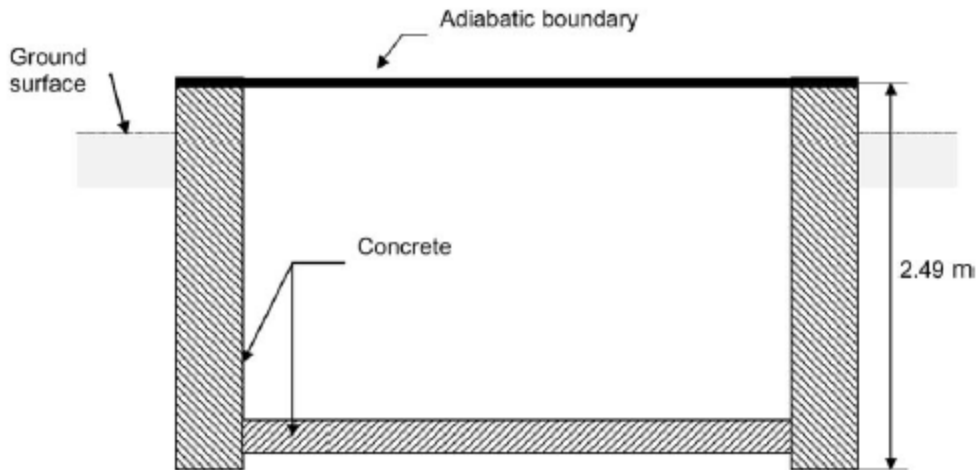


Figura 3.1 - Sezione dell'edificio strumentato, università del Minnesota, USA (Adjali, Davies, & Rees, 2004)

La temperatura interna è mantenuta costante e pari a 20°C ; le variazioni di temperatura sulla parete esterna e il calore scambiato tra edificio e terreno sono monitorati mediante un sistema intensivo di sonde interne ed esterne.

Si riporta in Figura 3.2 un confronto tra i risultati, in termini di flusso q [W] nei mesi invernali, calcolato con le formule empiriche sopra citate e i dati misurati.

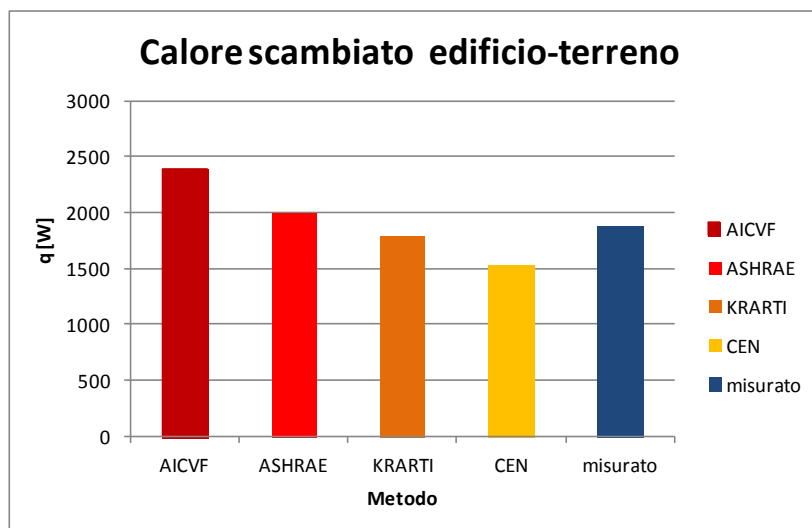


Figura 3.2 - Confronto dati misurati e formule empiriche (Adjali, Davies, & Rees, 2004)

Dall'istogramma è evidente come le formule empiriche possano sovrastimare o sottostimare l'effettivo flusso di calore scambiato, ma allo stesso tempo ne forniscano una buona stima dell'ordine di grandezza. Tali formule si adattano bene, come detto in precedenza, a una verifica speditiva del calore scambiato tra terreno e edificio.

Considerazioni finali

È importante comunque osservare che un modello numerico permette una rappresentazione più fedele alla realtà per geometrie diverse, consentendo non solo di determinare il flusso totale di calore scambiato tra edificio e terreno, ma anche la sua distribuzione spaziale.

È possibile inoltre assegnare proprietà dei materiali variabili in base alla posizione, e fare per esempio valutazioni sull'efficacia dell'isolamento dell'edificio, adottando provvedimenti nel caso vi sia la presenza di zone concentrate che favoriscono la dispersione termica.

Un modello numerico, anche semplificato come quello proposto da Thomas e Rees, permette inoltre di studiare fondazioni con sistemi di estrazione di calore integrati (energy foundations), che non possono essere descritte da formule empiriche a causa dei troppi parametri che ne governano il funzionamento. L'argomento sarà approfondito nella seconda parte di questo elaborato.

La simulazione numerica, indipendentemente dal modello utilizzato, è comunque consigliabile per impianti con potenza superiore a 50 kW (ridotta a 20kW se si opera con solo heating o solo cooling) perché le formule empiriche presentano un grado di incertezza troppo elevato che può rendere economicamente non accettabili gli errori commessi (H.Brandl,2006).

3.2 Casi strumentati

Negli anni '90 sono stati installati, presso vari centri di ricerca nel mondo, diversi edifici studio dotati di strumentazione per la misura del calore scambiato tra fondazioni e terreno circostante.

L'obiettivo di questi studi era valutare la dispersione termica di un edificio attraverso le fondazioni in mancanza d'isolamento delle stesse.

In letteratura sono descritti vari esperimenti realizzati presso varie università (Adjali, Davies, & Rees, 2004) e (Thomas & Rees, 2009):

- The foundation test facility (FTF module), realizzato alla University of Minnesota
- The Japanese house, presso la Tohoku University di Sendai
- The west building, presso la Cardiff School of Engineering

Sarà di seguito descritto l'ultimo dei casi sopra citati, sia dal punto di vista geometrico che della strumentazione utilizzata.

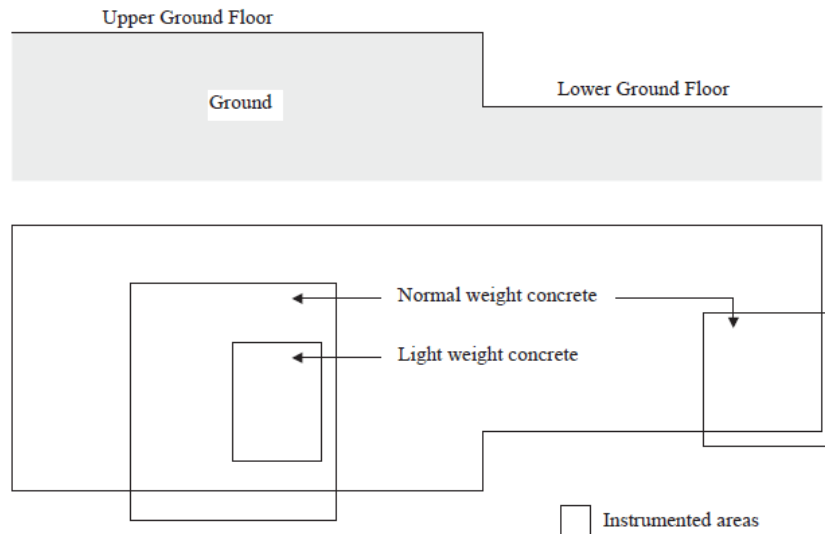


Figura 3.3 - The west building, planimetria e sezione (Adjali, Davies, & Rees, 2004)

Realizzato nel 1989, l'esperimento fu condotto per una durata di 18 mesi, durante i quali fu monitorata la performance termica delle fondazioni dell'edificio.

L'edificio è costruito su due livelli differenti, come evidente dalla sezione e dalla planimetria di Figura 3.3 e gli strumenti sono situati nelle tre aree indicate.

La fondazione è composta di uno strato di ghiaia spesso 60 cm, ricoperto da calcestruzzo di spessore 25 cm, il tutto poggiante su terreno argilloso.

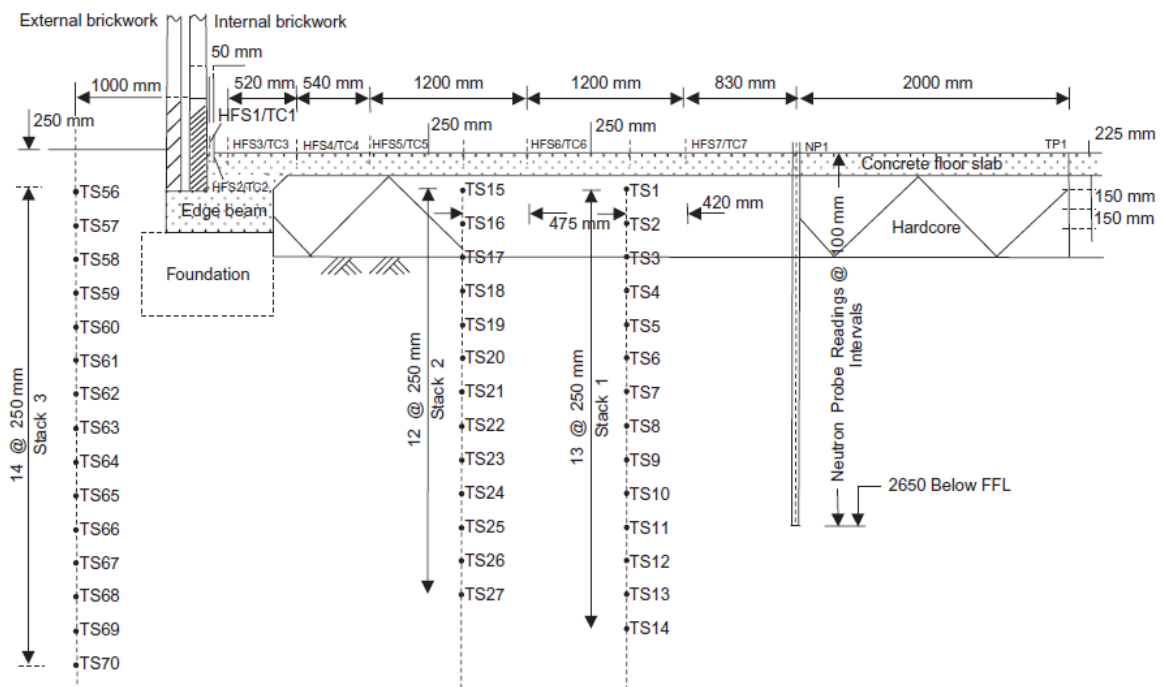


Figura 3.4 - Localizzazione strumenti (Thomas & Rees, 2009)

La strumentazione è stata installata direttamente sotto la fondazione e nel suolo circostante l'edificio, come rappresentato in Figura 3.4.

I risultati dell'esperimento non sono qui esposti, tuttavia meritano un cenno i diversi strumenti utilizzati.

I codici assegnati ai diversi strumenti sono:

- **TS (Temperature Sensor)**: misura la temperatura del terreno.
- **NP (Neutron Probe)**: emette, da una sonda dotata di emittente e ricevitore, neutroni ad alta energia che si propagano nel suolo; quando questi incontrano gli atomi d'idrogeno, disperdono la maggior parte dell'energia. Il ricevitore, misurando la quantità di neutroni a bassa energia è in grado di determinare la quantità di atomi d'idrogeno presenti e quindi ricavare l'umidità del suolo.
- **HFS (Heat Flux Sensor)**: strumento dotato di un trasduttore che genera un segnale elettrico proporzionale al calore applicato sulla superficie dello strumento; il flusso si ottiene dividendo per l'area il calore totale. Un esempio, utilizzabile per superfici regolari come muri e pavimenti, è riportato in Figura 3.5.



Figura 3.5 - Piastra per la misura del flusso di calore

- **TC (Thermocouples)**: strumenti costituiti da due metalli con diversa conducibilità elettrica che producono una differenza di voltaggio (Janssen, Carmeliet, & Hens, 2004) funzione della temperatura misurata.

4 ANALISI PRELIMINARI

4.1 Analisi su un elemento di volume rappresentativo (REV)

Per capire come la trasmissione del calore si manifesta all'interno del terreno e per l'individuazione degli elementi finiti più idonei per modellizzare numericamente questo fenomeno, si è deciso di svolgere delle semplici analisi su un elemento rappresentativo del materiale, di forma regolare e dimensione unitaria (REV), volte all'ottimizzazione di un successivo modello numerico più complesso.

Il REV presenta un dominio quadrato di lato 1 metro e sviluppo 2D planare, cioè simile a una lamina di spessore costante unitario nella quale è impedito il flusso di calore in direzione ortogonale alla faccia. Il dominio per ipotesi è costituito da terreno omogeneo avente le seguenti proprietà:

Proprietà equivalenti		
	Secco	Saturo
ρ [kg/m ³]	802	1301
K [W/(m °C)]	1.8	2.1
c [J/(kg °C)]	845	2130

Tabella 4 - Proprietà del terreno nell'analisi REV

Si è deciso di eseguire una semplice analisi di trasmissione del calore di durata pari a 35 giorni imponendo una temperatura costante sul bordo superiore del REV pari a 30° C e una temperatura iniziale $T_0=5^\circ\text{C}$ (Figura 4.1).

Per l'analisi sono stati utilizzati elementi quadrangolari lineari della classe Heat Transfer del tipo DC2D4 o, in alternativa, elementi quadratici a 8 nodi del tipo DC2D8 (capitolo 2.2.1).

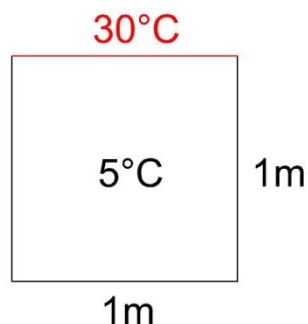


Figura 4.1 - Condizioni al contorno e iniziali sull'elemento REV

Si riportano di seguito (Figura 4.2) i risultati in termini di $T(t)$ nel centro del dominio, confrontando le soluzioni ottenute con elementi lineari e quadratici.

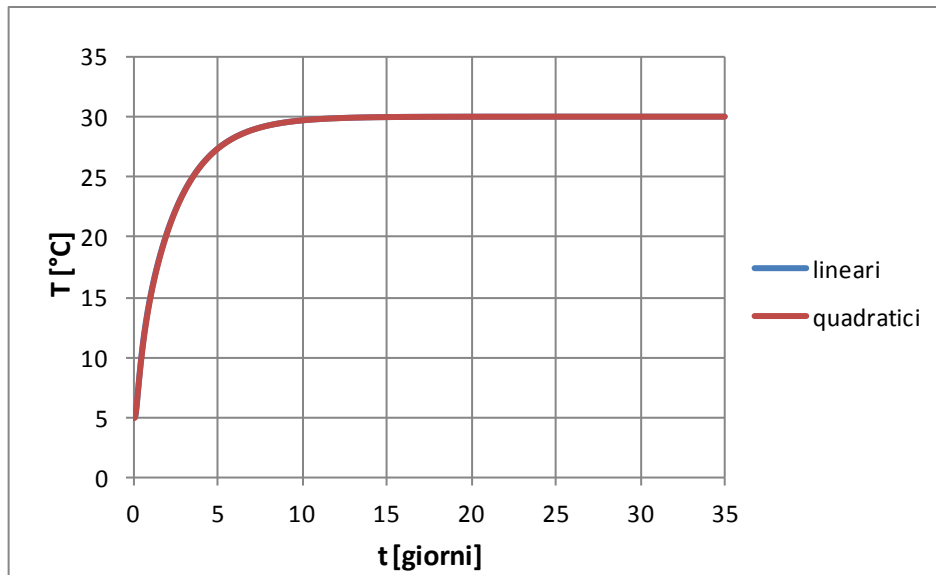


Figura 4.2 - Andamento temporale della temperatura nel centro del dominio

Si può notare come, a parità di discretizzazione adottata, le due soluzioni siano pressoché coincidenti; questo giustifica l'uso nelle successive analisi di elementi finiti di tipo DC2D4.

Resta tuttavia da precisare che l'uso di elementi finiti lineari richiede una mesh più fitta rispetto a quelli quadratici per poter descrivere con sufficiente precisione il fenomeno.

Un criterio per stabilire se una mesh di prova è sufficientemente fitta consiste nel confrontare il risultato ottenuto con quello di una mesh che ha elementi di dimensione minore, e verificare se la differenza tra le due soluzioni è accettabile (minore di una certa tolleranza).

Ovviamente tale criterio dipende dal problema oggetto di studio e dalla precisione richiesta, poiché all'aumentare del numero di elementi finiti l'onere computazionale cresce.

Una volta stabilito il tipo di elementi finiti da utilizzare nelle analisi, si procede allo studio del comportamento del terreno al variare delle condizioni al contorno; nel caso di seguito riportato s'impone sulla superficie superiore del REV una possibile variazione giornaliera della temperatura (in Figura 4.3, rappresentata dalla linea tratteggiata rossa).

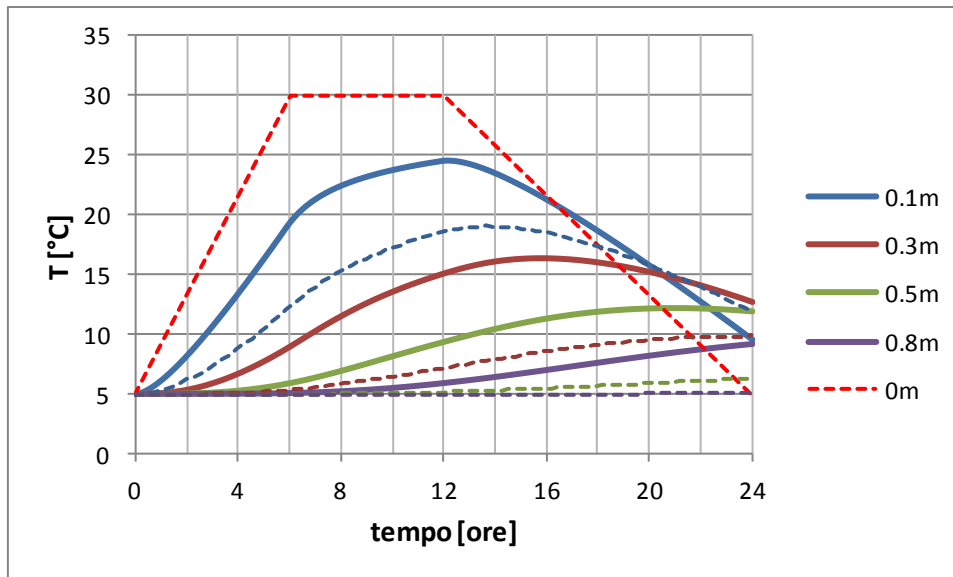


Figura 4.3 - Andamento temporale temperatura al variare della profondità (le curve tratteggiate riguardano il terreno saturo, quelle continue il terreno secco)

Il grafico di Figura 4.3 mostra gli andamenti temporali della temperatura a diverse profondità; le curve tratteggiate riguardano il terreno saturo, quelle continue il terreno secco.

All'aumentare della profondità si nota come la risposta del terreno sia ritardata nel tempo e smorzata; la causa di questo fenomeno è l'inerzia termica che rallenta la diffusione del calore, assorbito dalla massa di terreno presente.

Lo smorzamento e il ritardo sono maggiori nel terreno saturo, dove la presenza dell'acqua, che come noto ha una notevole inerzia termica, riduce la trasmissione del calore.

La conseguenza di questo fenomeno è che a un andamento stazionario della temperatura in superficie (tra 6 e 12 h) corrisponde un andamento transitorio in profondità.

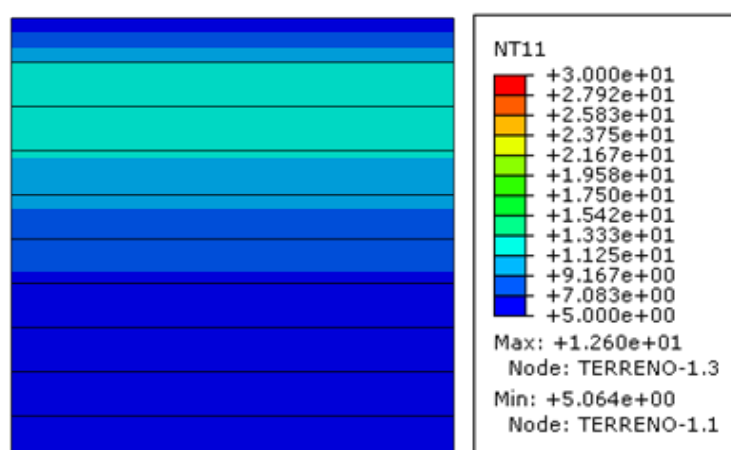


Figura 4.4 - Ritardo della risposta termica del terreno rispetto alla condizione di superficie

Nell'istante temporale $t=24$ ore si può inoltre notare (Figura 4.4) come in superficie e in profondità la temperatura sia prossima a 5°C , mentre a quote intermedie sia circa di 12°C .

4.2 Confronto soluzione analitica e soluzione numerica

Al fine di verificare l'accuratezza delle analisi, si confrontano i risultati numerici ottenuti con Abaqus con una soluzione analitica, nota per un semplice caso di trasmissione 2D del calore in un materiale omogeneo e isotropo.

La soluzione analitica è disponibile per un dominio rettangolare di larghezza $x=L$ e altezza $y=W$, sui bordi del quale sono imposte le condizioni al contorno, di temperatura costante, secondo lo schema di Figura 4.5 (in cui il simbolo θ indica la temperatura).

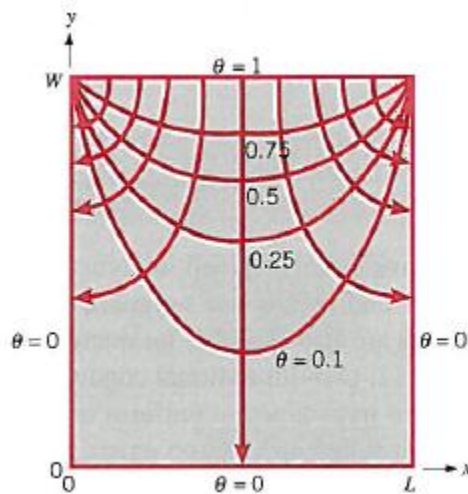


Figura 4.5 - Soluzione analitica: isoterme e linee di flusso (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine)

La distribuzione spaziale della temperatura T è descritta dalla seguente equazione.

$$T(x, y) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} + 1}{n} \sin \frac{n\pi x}{L} \frac{\sinh(n\pi y/L)}{\sinh(n\pi W/L)}$$

Si riportano in Figura 4.6, la geometria, le condizioni iniziali e le condizioni al contorno del modello utilizzato per il confronto con la soluzione analitica.

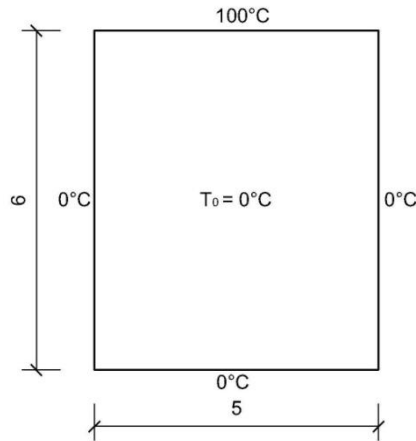


Figura 4.6 - Modello analizzato

Il modello in esame è costituito da argilla satura, tuttavia, essendo un'analisi di trasmissione del calore di tipo stazionario, la distribuzione spaziale della temperatura è indipendente dalle proprietà termiche del materiale considerato.

Per l'analisi la geometria viene discretizzata in elementi finiti della categoria **heat transfer** di tipo DC2D4.

Sono di seguito riportate (Figura 4.7) le isoterme, in regime stazionario, per 3 differenti discretizzazioni spaziali del modello, rispettivamente con elementi finiti di dimensioni 1, 0.75 e 0.5 m.

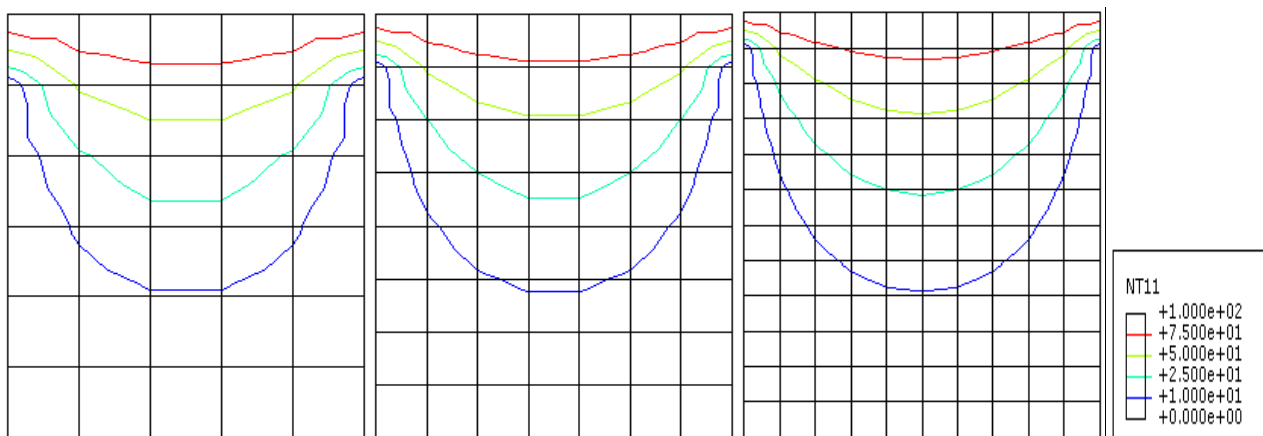


Figura 4.7 - Isotherme ottenute dalle analisi numeriche, al variare della mesh.

Da un'analisi preliminare dei risultati è evidente come, infittendo la mesh, l'andamento spaziale della temperatura riprodotto dal modello si avvicini alla soluzione analitica, come confermato dal confronto numerico delle temperature $T(x)$ a diverse profondità (Figura 4.8).

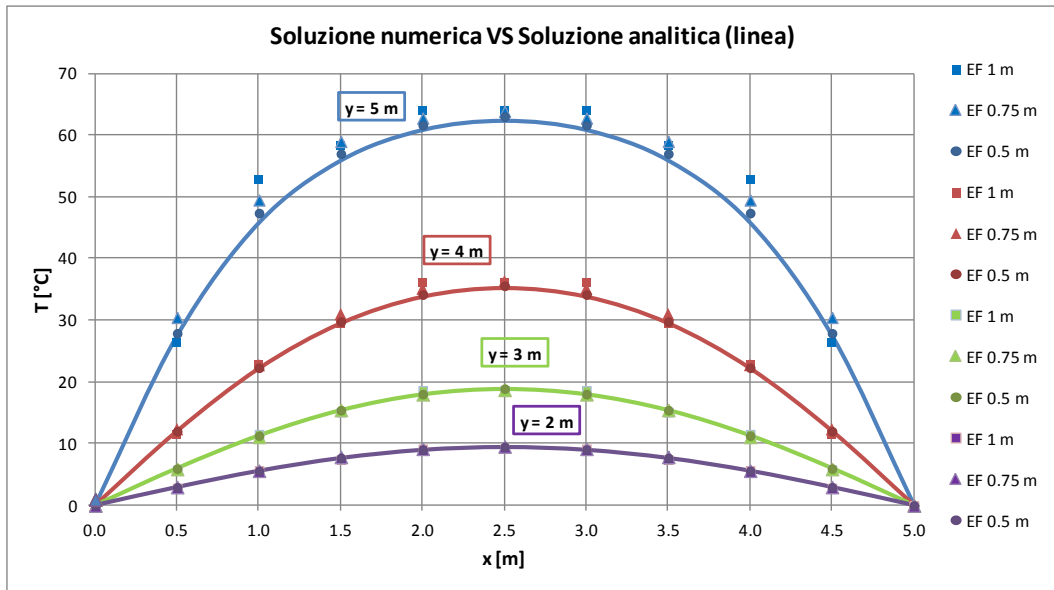


Figura 4.8 - Confronto soluzione analitica e risultati numerici

Errori %			
Dimensione EF [m]			
y [m]	0.5	0.75	1.0
2	0.7	2.7	3.3
3	1.2	1.1	4.5
4	1.6	5.5	7.2
5	3.7	11.1	15.5

Tabella 5 - Errori massimi dei risultati numerici rispetto alla soluzione analitica

$$Errore \% = \frac{T_{Numerica} - T_{Analitica}}{T_{Analitica}} \cdot 100$$

Analizzando gli errori percentuali si può notare come i risultati numerici siano tanto più vicini alla soluzione analitica all'aumentare dell'infittimento della mesh e della distanza dalla condizione al contorno di 100°C; al crescere della profondità diminuisce, infatti, il gradiente termico e la soluzione diventa sempre più indipendente dalla discretizzazione spaziale del dominio.

In particolare si nota come le mesh con elementi di dimensione 0,75 e 1 m forniscano risultati non accettabili (errore maggiore del 5%) per y=4÷5 m.

Alla luce di queste considerazioni, di fronte a modelli con geometrie complesse e in presenza di gradienti termici elevati, sarà quindi opportuno infittire in modo adeguato la mesh in modo da seguire al meglio l'evoluzione della temperatura nel dominio in analisi. Nel caso sopra esposto, per esempio, è necessario infittire la mesh nella parte superiore del dominio, specie in corrispondenza dei due angoli in alto.

5 EDIFICIO DI TRADATE

Nel presente capitolo è stato studiato il campo di temperatura che si crea nel terreno intorno a un edificio, al variare di alcuni parametri quali posizione della falda e presenza o meno di edifici limitrofi.

Per avere parametri realistici, in termini di geometria, materiali e condizioni al contorno, sarà preso in esame un edificio in fase di realizzazione, situato a Tradate (VA).

L'edificio è composto da 6 piani fuori terra adibiti a residenze, un piano terra ad uso commerciale e 3 piani interrati, dei quali il primo ad uso commerciale e i due più profondi adibiti ad autorimessa.

L'edificio è dotato di un impianto geotermico a bassa entalpia, della tipologia energy foundation, installato nelle paratie realizzate per sostenere lo scavo dei piani interrati.

5.1 Geometria

La sezione studiata è rappresentata di seguito:

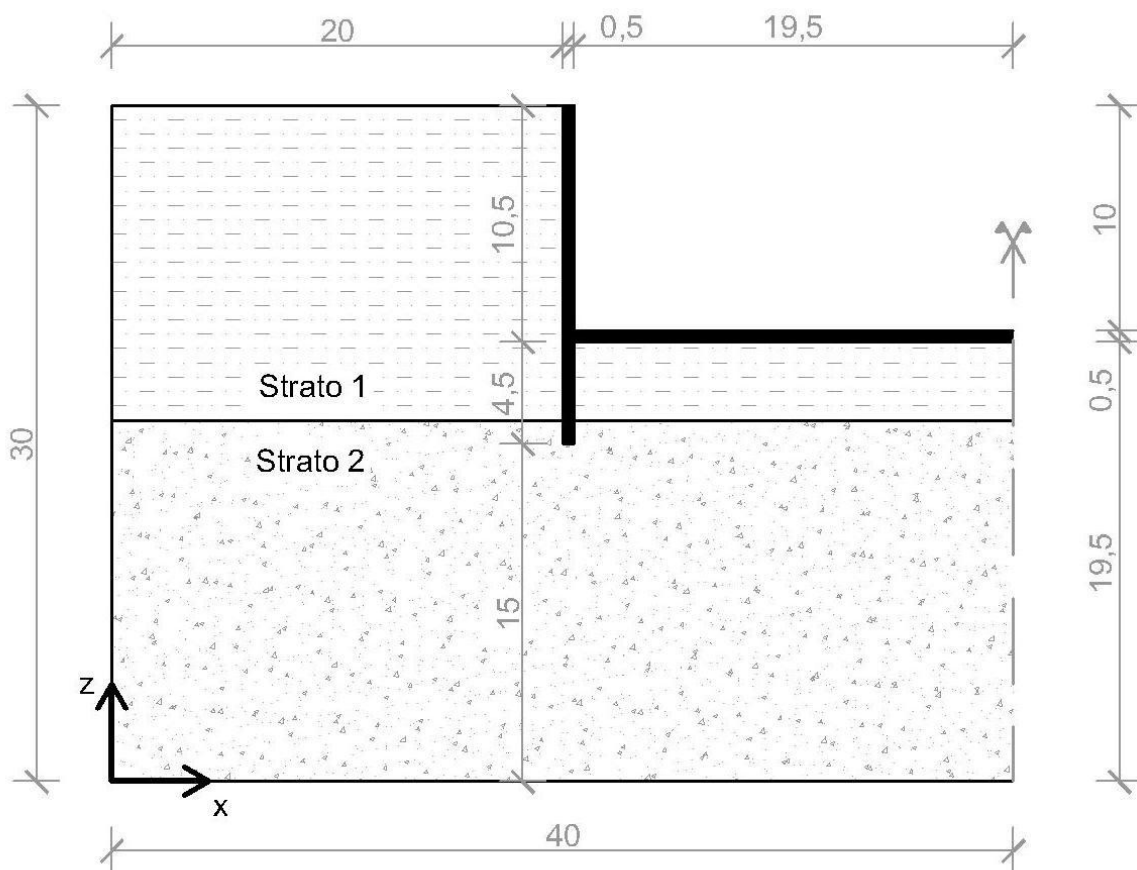


Figura 5.1 - Sezione studiata dell'edificio di Tradate

L'edificio ha una pianta irregolare, ma può essere semplificato ipotizzando di studiare una sola sezione rappresentativa. Di questa sezione si decide di analizzare solo la metà a

sinistra, rispetto a un asse di simmetria centrale, ottenendo la sezione rappresentata in Figura 5.1.

La paratia in calcestruzzo armato, alta 15 m e di spessore 0,50 m, è ancorata al terreno circostante attraverso alcuni ordini di tiranti in acciaio, la cui presenza è trascurata nel modello.

La platea di fondazione, in mancanza di dati più approfonditi, è considerata di spessore uniforme pari a 50 cm.

L'estensione del dominio di calcolo in profondità e a sinistra della paratia è stata ottenuta per tentativi, finché tali bordi fossero stati sufficientemente lontani da non influenzare la soluzione.

Di seguito, per convenzione, si utilizzerà il sistema di riferimento riportato in Figura 5.1, centrato nell'angolo in basso a sinistra del dominio e con valori di x e di z crescenti rispettivamente verso destra e verso l'alto.

5.2 Materiali

Terreno

Le caratteristiche del terreno sono state dedotte a partire dalla relazione geologica preliminare; le indicazioni fornite sono solo approssimative, essendo uno studio preliminare, per cui è necessario introdurre alcune ipotesi semplificative di seguito descritte.

Riassumendo, la relazione geologica evidenzia la presenza di materiale misto, con lenti ghiaioso - sabbiose (con presenza di ciottoli) immerse in un matrice argillosa - limosa specialmente in prossimità della superficie.

Alla profondità di 3-4 metri vi è uno strato ghiaioso - sabbioso che può originare, in periodi piovosi, una falda sospesa. La falda, al momento dei sondaggi (dicembre 2006), si trovava in un secondo acquifero a 9,70 m dal piano campagna, anche se è possibile che vi siano oscillazioni.

Sulla base dei risultati di prove penetrometriche statiche SPT, si è suddiviso il terreno in due strati:

- 1° strato, fino alla profondità di 14 m con numero di colpi $N < 15$, definito a facile escavabilità e avente una densità relativa più bassa ($D_r = 70\%$).
- 2° strato sottostante, più compatto con $N > 15$ e densità relativa maggiore ($D_r = 80\%$).

La densità relativa è stata ottenuta dal geologo autore della relazione attraverso correlazioni empiriche con il numero di colpi N .

Sono quindi definiti i seguenti parametri relativi ai tre costituenti del terreno:

	Solido	Acqua	Aria
ρ [kg/m ³]	2750	1000	1.25
k [W/(m °C)]	3.6	0.57	0.025
c [J/(kg °C)]	820	4186	1

Tabella 6 - Proprietà di solido, acqua e aria

I valori relativi ad acqua e aria e la conducibilità termica k e calore specifico c del solido sono stati ricavati dagli studi di Thomas e Rees del 2009. La densità del solido ρ , invece, è stata ipotizzata costante e pari a 2750 kg/m³.

Il grado di saturazione Sr è definito come:

$$Sr = \frac{\text{volume acqua}}{\text{volume vuoti}}$$

γ_{sat} [kN/m ³]	19
γ_s [kN/m ³]	27
γ_w [kN/m ³]	10

Tabella 7 - Pesi di terreno saturo, grani solidi e acqua

In Tabella 7 sono riportati i valori del peso di volume del secondo strato, completamente saturo ($Sr=1$) e del peso specifico dei grani solidi e dell'acqua, ottenuti dai dati di Tabella 6. Tali parametri sono stati utilizzati per calcolare le grandezze incognite n (porosità) ed e (indice dei vuoti).

La porosità n è:

$$n = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_s - \gamma_w} = 0,47$$

L'indice dei vuoti e è pari a:

$$e = \frac{n}{1 - n} = 0,89$$

La stessa operazione non è possibile per il primo strato perché insaturo e nella relazione geologica è fornito solo il peso di volume naturale del terreno ($\gamma_{nat}=17$ kN/m³) ma mancano i dati riguardanti il grado di saturazione; s'ipotizza quindi che l'indice dei vuoti del primo strato sia identico a quello del secondo.

È ora possibile stimare il grado di saturazione del primo strato a partire dalla definizione di γ_{nat} (trascurando il peso dell'aria):

$$\gamma_{nat} = \gamma_s(1 - n) + \gamma_w n Sr$$

da cui:

$$Sr = \frac{\gamma_{nat} - \gamma_s(1 - n)}{n\gamma_w} \cong 0,60$$

La densità equivalente ρ e la conducibilità termica k del terreno possono quindi essere calcolate come media pesata delle tre componenti, solido, acqua e aria, attraverso le espressioni:

$$\rho = (1 - n)\rho_s + n S_r \rho_w$$

$$k = (1 - n)k_s + n S_r k_w + n(1 - S_r)k_a$$

Il calore specifico, essendo definito sull'unità di massa, è mediato in base ai rapporti di massa di solido e acqua (trascurando il peso dell'aria):

$$c = \frac{m_s c_s + m_w c_w}{m_s + m_w}$$

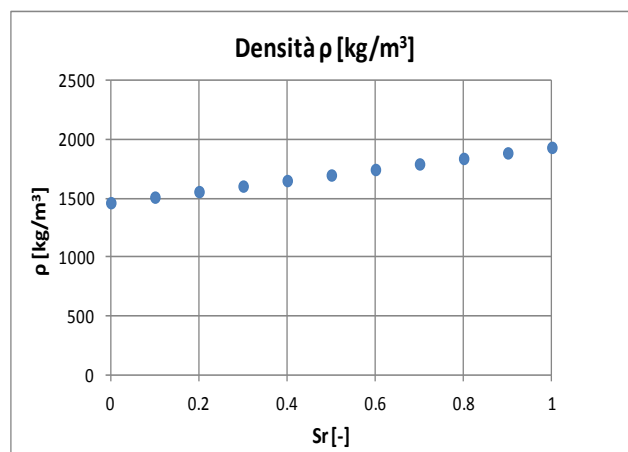
con m_s e m_w rispettivamente massa del solido e dell'acqua.

Si ottengono quindi le seguenti proprietà; quelle di terreno saturo sono identiche per entrambi gli strati, mentre quelle di terreno insaturo sono presenti solo nel 1° strato e saranno utilizzate per simulare le variazioni della falda (capitolo 5.6.2):

	Saturo	Insaturo
Sr	1	0.6
ρ [kg/m³]	1930	1740
k [W/(m °C)]	2.2	2.1
c [J/(kg °C)]	1642	1366

Tabella 8 - Proprietà del terreno saturo e insaturo

Si riporta in Figura 5.2 la variazione di ρ , k e c al variare del grado di saturazione nel terreno:



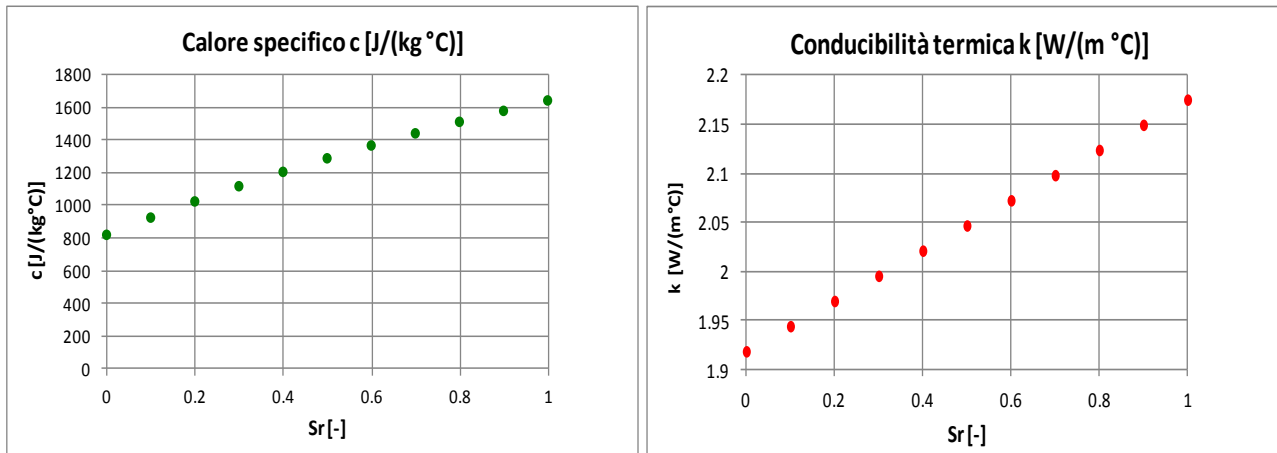


Figura 5.2 - Andamento di k , ρ , c con il grado di saturazione

I tre parametri, come evidenziato in figura, hanno un andamento monotono crescente con Sr .

Come mostrato dai risultati delle analisi del capitolo 4, un aumento del grado di saturazione provoca una crescita dell'inerzia termica.

Il materiale saturo quindi, rispetto al secco, richiede maggior tempo per adattarsi alle variazioni di temperatura, ma in condizioni a regime ha una k più grande e quindi trasmette più facilmente il calore.

Calcestruzzo armato (C.A.)

Per la paratia e la platea di fondazione in C.A. si assume un materiale omogeneo, avente le seguenti caratteristiche (mediate tra i valori di calcestruzzo e acciaio, ipotizzando una percentuale di acciaio dell'1,5% in volume, del 4,6% in massa):

	Acciaio	CLS	C.A.
ρ [kg/m ³]	7800	2400	2517
k [W/(m °C)]	80.2	1.4	2.60
c [J/(kg °C)]	447	880	901

Tabella 9 - Proprietà del C.A. della paratia (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine)

Una volta definito il tipo di analisi e la geometria del problema si passa alla costruzione del modello numerico vero e proprio, che consiste nel definire le condizioni al contorno e iniziali, nel discretizzare il dominio e nel scegliere la durata dell'analisi.

5.3 Condizioni al contorno

Non essendo disponibili dati misurati in sito, sono necessarie alcune ipotesi sulla scelta delle condizioni al contorno.

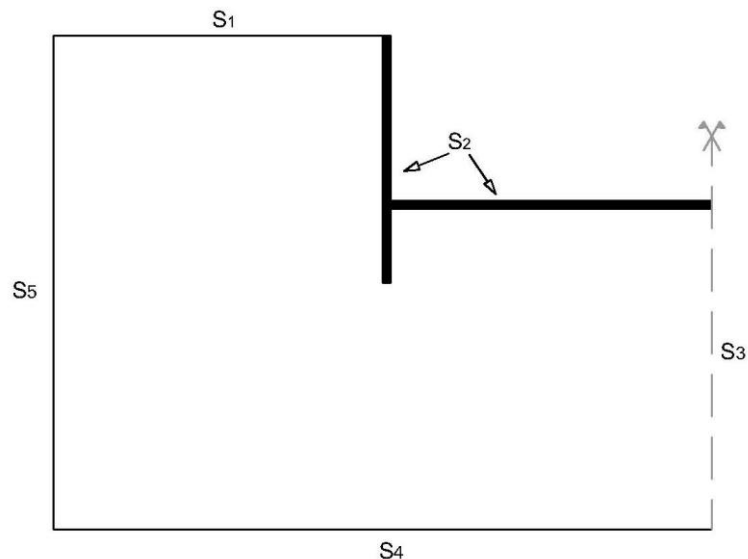


Figura 5.3 - Condizioni al contorno

- **S1 Piano campagna**

Sul piano campagna viene imposta come condizione al contorno un andamento annuale della temperatura.

Con riferimento ai dati registrati (ARPA Lombardia) negli ultimi 10 anni (dal 2001 al 2011) presso la stazione di misura di Somma Lombardo (VA), poiché prossima al sito studiato, è stata calcolata la media di temperatura per ogni mese.

L'andamento in Figura 5.4 è ottenuto mediando nei 10 anni le temperature medie mensili. Sul grafico sono riportati i sigma bounds ottenuti sommando o sottraendo alla media la deviazione standard.

$$dev = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

- dev: deviazione standard.
- \bar{x} : media campionaria.
- n: numero dei dati del campione analizzato.
- x: variabile del campione.

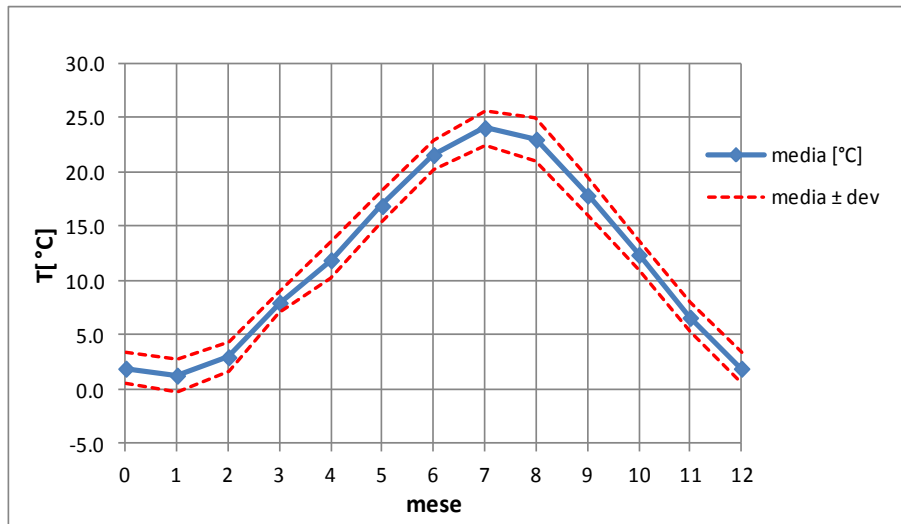


Figura 5.4 - Andamento medio annuo della temperatura in superficie

- **S2 Interno edificio**

Sulla parte interrata dell'edificio, adibita ad autorimessa, s'impone per ipotesi una temperatura costante pari a 18°C.

- **S3 Asse simmetria**

Sull'asse di simmetria s'impone una condizione di non flusso (adiabatica); il gradiente di temperatura è quindi parallelo all'asse.

- **S4 Base del dominio**

Sulla base del dominio, posto a -30 m dal piano campagna, si impone una temperatura costante pari a 15°C, valore medio per siti alla nostra latitudine (Brandl, 2006).

- **S5 Bordo sinistro**

È presente la condizione di non flusso, cioè di superficie adiabatica, assegnata di default dal codice di calcolo qualora non siano date condizioni specifiche di temperatura o flusso termico. S5 è quindi, come S3, un asse di simmetria.

Entrambi gli strati sono considerati completamente saturi.

5.4 Condizioni iniziali

Come condizione iniziale sulla temperatura, si assume il seguente andamento (Brandl, 2006):

- Strato 1: lineare tra 5°C sul piano campagna e 15 °C a 15 m di profondità.
- Strato 2: temperatura costante pari a 15°C.

5.5 Costruzione della mesh

La conoscenza delle condizioni al contorno e di quelle iniziali è fondamentale sia per la risoluzione numerica del problema sia per la costruzione della mesh, la quale andrà infittita dove si prevedono elevati gradienti di temperatura.

La mesh definitiva è stata ottenuta per tentativi al fine di ottimizzare il rapporto tra tempo di calcolo e precisione del modello numerico; l'utilizzo di mesh molto fitte aumenta sì la precisione dell'analisi, ma al contempo l'onere computazionale cresce.

Data una mesh di primo tentativo, non essendo disponibile una soluzione analitica per il modello in esame, si confrontano i risultati numerici lungo alcuni path del modello con quelli ottenuti con una mesh più fitta (in questo caso elementi finiti di dimensione 0,2 m). Se la soluzione, fatto salvo una tolleranza fissata, è identica, si può utilizzare la mesh meno fitta sapendo di convergere alla soluzione corretta, risparmiando tempo di calcolo.

Per la costruzione del modello si è quindi analizzato un periodo di tempo corrispondente a due anni, e si sono confrontati i risultati ottenuti alla fine del secondo anno, lungo i 5 path riportati in Figura 5.6.

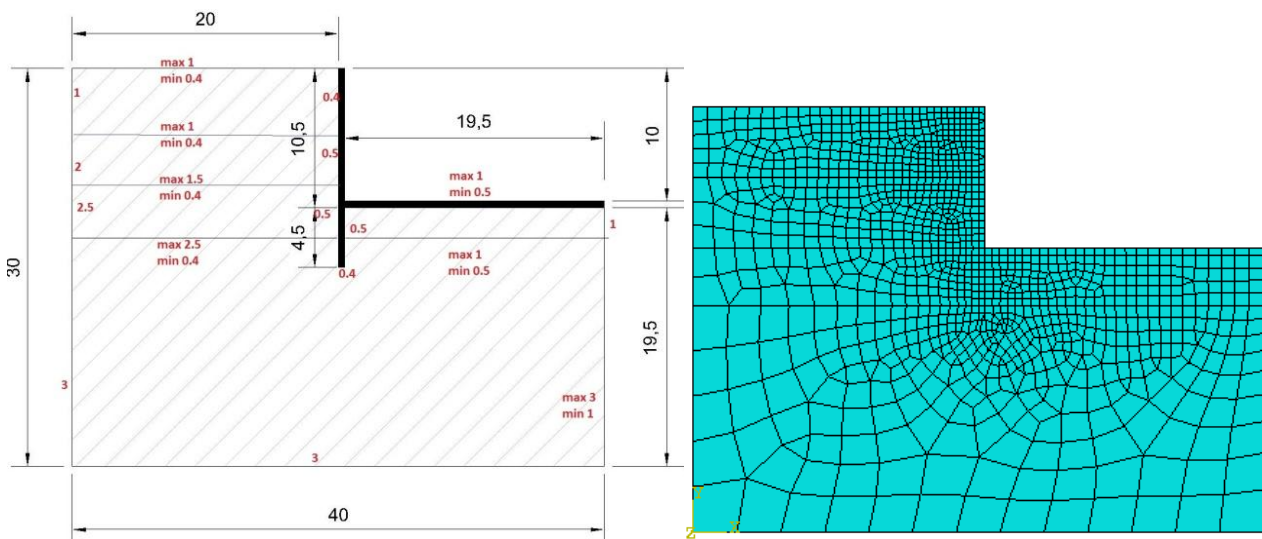


Figura 5.5 - Mesh definitiva utilizzata per le analisi

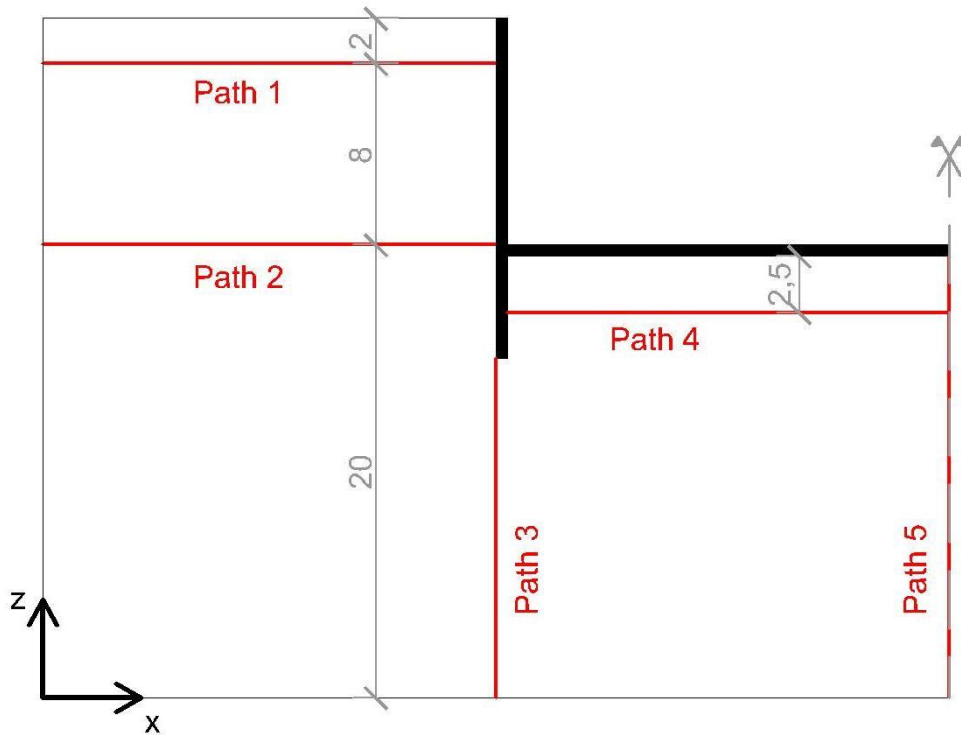
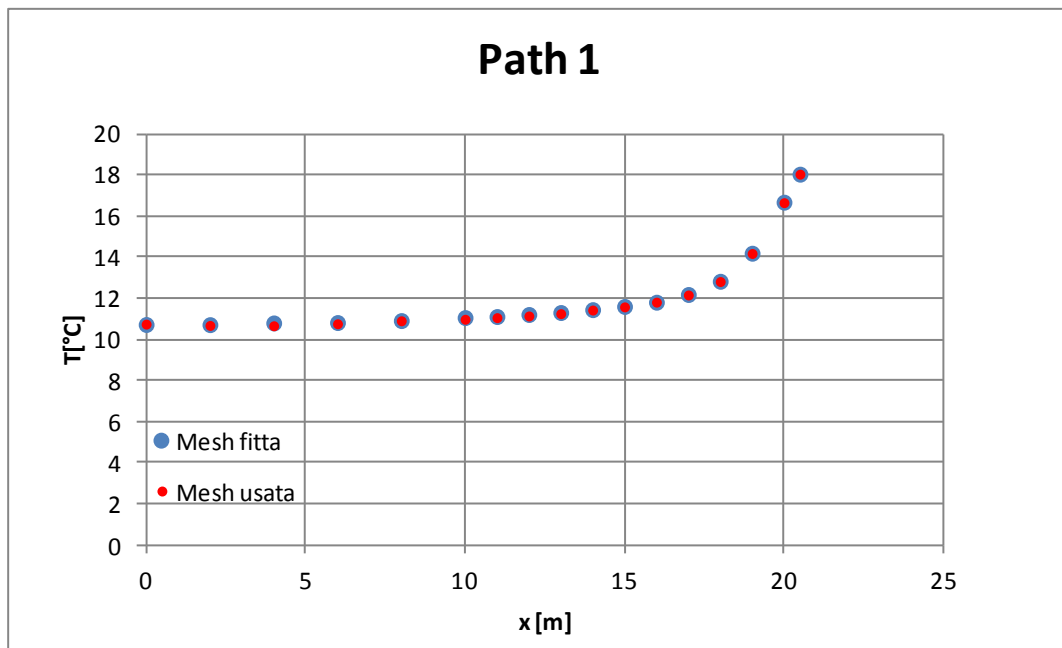


Figura 5.6 - Path per la calibrazione della mesh

La scelta di diversi path permette di testare la bontà del modello in più punti, ed eventualmente infittire la mesh ove necessario.

Si riporta di seguito il confronto dei risultati lungo i path analizzati alla fine del secondo anno di analisi.



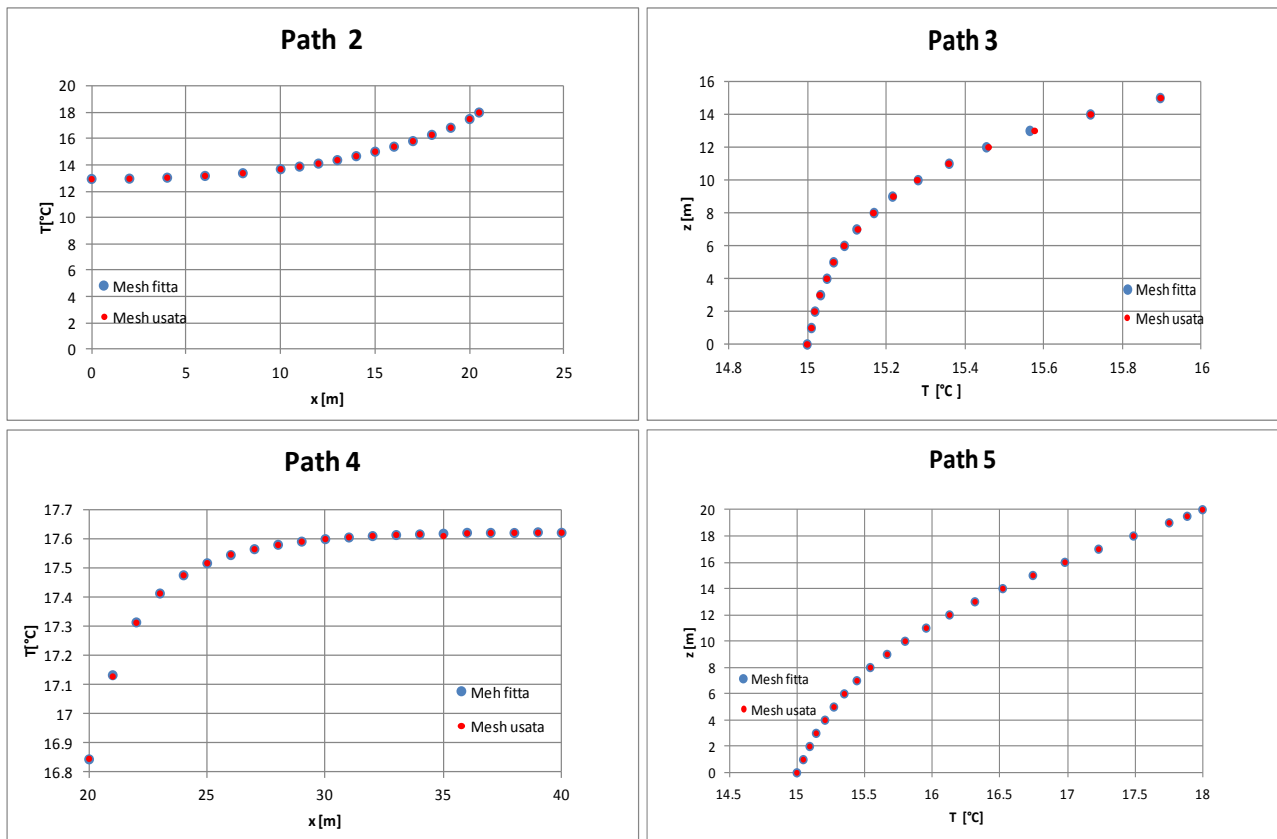


Figura 5.7 - Confronto delle temperature, lungo i path di calibrazione, ottenute con due diverse mesh

Dai grafici precedenti emerge che i risultati ottenuti lungo i diversi path, adottando le due mesh, sono pressoché coincidenti. Nella Tabella 10 è riportato l'errore massimo commesso, in valore assoluto, rispetto alla soluzione ottenuta con la mesh più fitta.

L'errore è definito:

$$errore \% = \left| \frac{T_{FITTA} - T_{USATA}}{T_{FITTA}} \right| \cdot 100$$

dove i pedici si riferiscono alla mesh.

Path	Errore %
1	1.26
2	0.11
3	0.08
4	0.05
5	0.01

Tabella 10 - Errori massimi percentuali temperatura rispetto all'utilizzo di un mesh più fitta

Per le normali applicazioni ingegneristiche questi valori sono nettamente trascurabili. La mesh così ottenuta è composta da 1152 elementi per un totale di 1197 nodi.

5.6 Risultati

5.6.1 Campo di temperatura nel terreno

Il periodo di tempo analizzato è pari a 10 anni, per consentire il raggiungimento delle condizioni di regime in ogni punto del dominio, anche a profondità elevate.

Per condizioni di regime in questo caso s'intende che, in ogni punto del dominio, la temperatura per ogni giorno di un anno sia uguale a quella dell'anno successivo nello stesso giorno; questa definizione è necessaria poiché una parte del dominio risente delle fluttuazioni stagionali.

Per descrivere il campo di temperatura all'interno del dominio, variabile nello spazio e nel tempo, è stato tracciato un reticolo (riportato in Figura 5.8), sul quale analizzare l'andamento della temperatura. Le linee (o path) hanno un codice identificativo:

- Lettera: v = verticale, o = orizzontale.
- Numero: coordinata x o z del path.

Per ogni path, si è riportato il profilo di temperatura nei 10 anni di analisi, a fine gennaio e a fine luglio (scelti come riferimento e rappresentativi di una condizione invernale ed estiva).

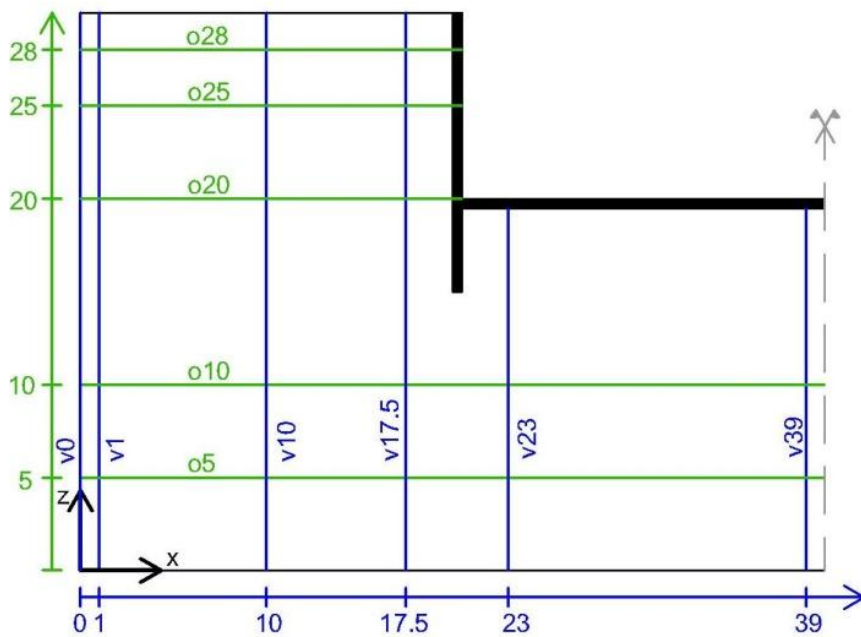


Figura 5.8 - Path orizzontali e verticali

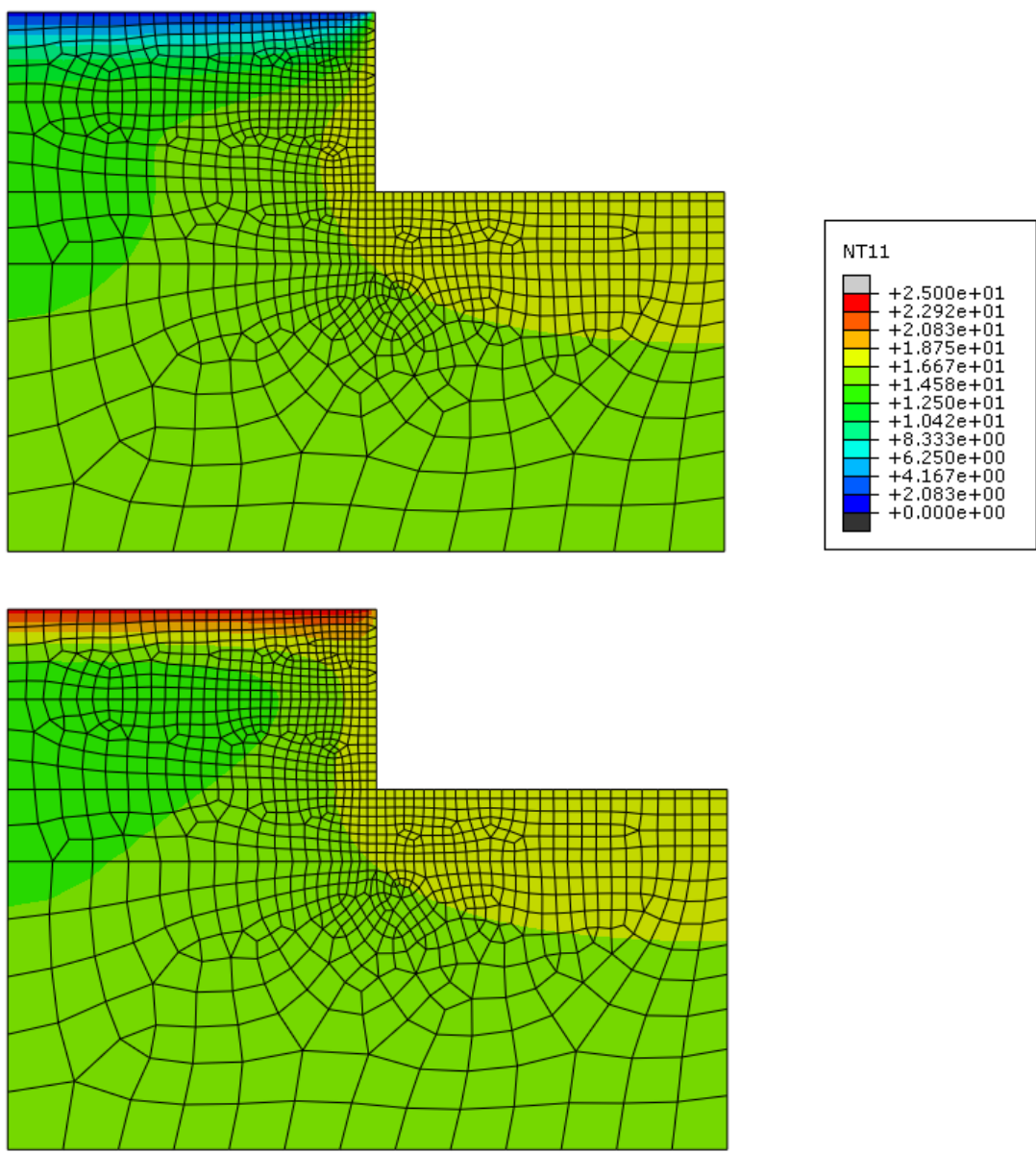


Figura 5.9 - Campo di temperatura a gennaio (sopra) e a luglio (sotto) nel 10° anno di analisi

Al fine di verificare la correttezza del modello si confrontano i risultati di temperatura lungo il path v0, con quelli di terreno indisturbato (senza edificio) a fine gennaio del 10° anno.

Nell'analisi il terreno è ipotizzato completamente saturo.

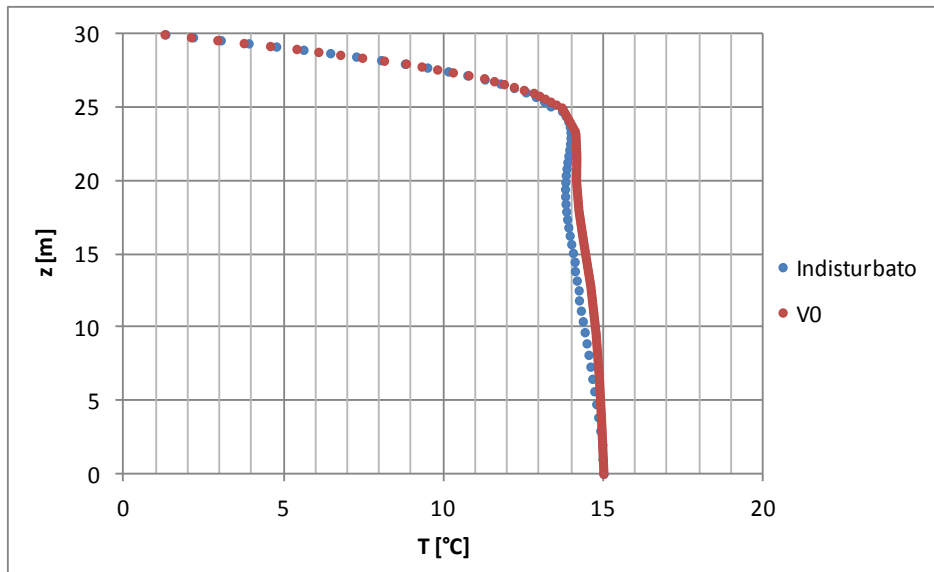


Figura 5.10 – Confronto del profilo di temperatura lungo z tra terreno tra il path $v0$ e il terreno indisturbato

I risultati di Figura 5.10 evidenziano come l'andamento di temperatura per i due casi sia all'incirca uguale; si può quindi ritenere che le dimensioni del dominio siano tali per cui il bordo $v0$ sia sufficientemente distante dall'edificio da non risentirne la presenza.

Sempre con riferimento al modello di terreno indisturbato, si riporta l'andamento $T(t)$ nel corso del 10° anno a diverse profondità rispetto al piano campagna.

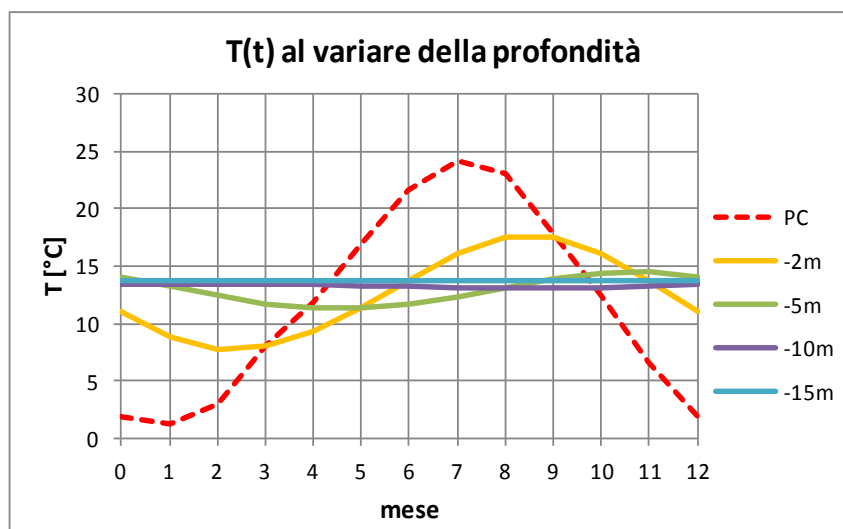


Figura 5.11 – Terreno in condizioni indisturbate: andamento della temperatura nel tempo al variare della profondità

Dall'analisi dei risultati si può vedere come l'oscillazione della temperatura nel tempo si smorzi con la profondità, fino a raggiungere valori pressoché costanti (circa 14°C) intorno a 15 m, in accordo con i dati di letteratura.

All'aumentare della profondità si nota come la risposta del terreno sia inoltre ritardata nel tempo; la causa di questo fenomeno è l'inerzia termica che rallenta la diffusione del calore, assorbito dalla massa di terreno presente, come già osservato nelle analisi preliminari (capitolo 4).

Nei risultati seguenti le curve riguardanti i primi anni sono fortemente influenzate dalle condizioni iniziali arbitrariamente scelte, per cui i commenti riguardano soprattutto le condizioni di regime.

Path orizzontali

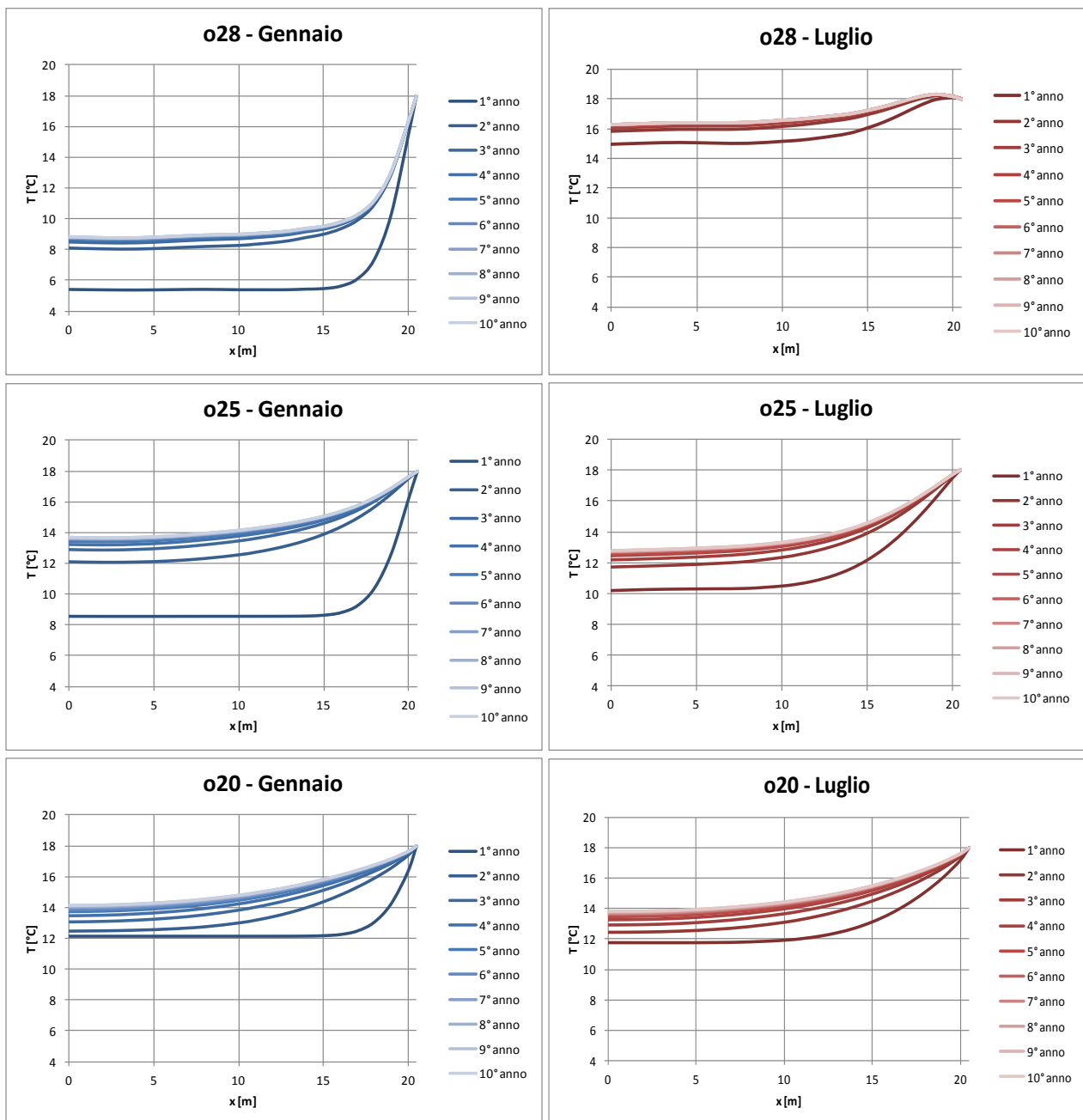


Figura 5.12 - Temperatura lungo i path orizzontali superficiali

Esaminando i grafici di Figura 5.12, nelle condizioni di regime (10°anno) e nella zona con x prossime a 0, si nota che nel path più superficiale (o28) si ha una forte influenza delle condizioni climatiche esterne, con escursione di 8 gradi tra la temperatura estiva e quella invernale a regime. Invece alla profondità di 5 metri (path o25) l'escursione termica è di circa 1°C e diventa trascurabile a 10 metri di profondità (path o20) dove la temperatura è costante durante tutto l'anno, pari a circa 14°C.

Si nota inoltre la presenza di una zona più fredda durante l'estate a 5 metri dal piano campagna, esaminata in seguito nell'analisi dei path verticali.

Nella zona vicina all'edificio (x prossime a 20,5 m) si nota l'influenza della condizione imposta sull'edificio stesso, di temperatura costante, pari a 18°C.

Nei path analizzati le condizioni di regime sono raggiunte in circa 4÷5 anni.

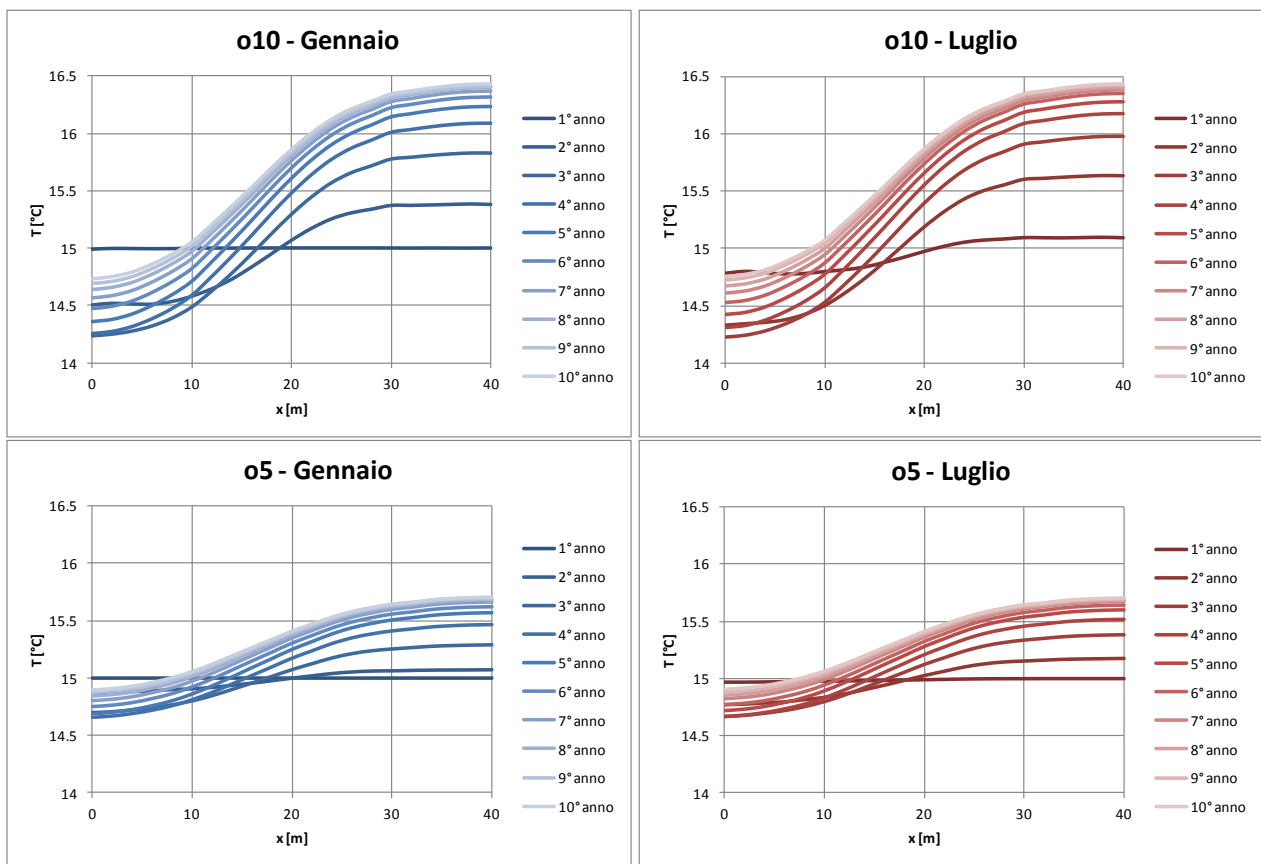


Figura 5.13 - Temperatura lungo i path orizzontali profondi

Nei path più profondi (Figura 5.13) si osserva una netta riduzione delle variazioni di temperatura tra le condizioni iniziali e la situazione a regime, che sono limitate a 1÷2°C. Si osserva inoltre che il campo di temperatura non dipende dalle condizioni climatiche esterne, cioè non varia tra luglio e gennaio per uno stesso path.

Nella zona sotto l'edificio o nelle immediate vicinanze (posta a $x > 10$ m) si osserva un aumento della temperatura a causa del calore proveniente dall'edificio stesso, che genera attorno a se una "fascia" a temperatura maggiore (Figura 5.9).

Path verticali

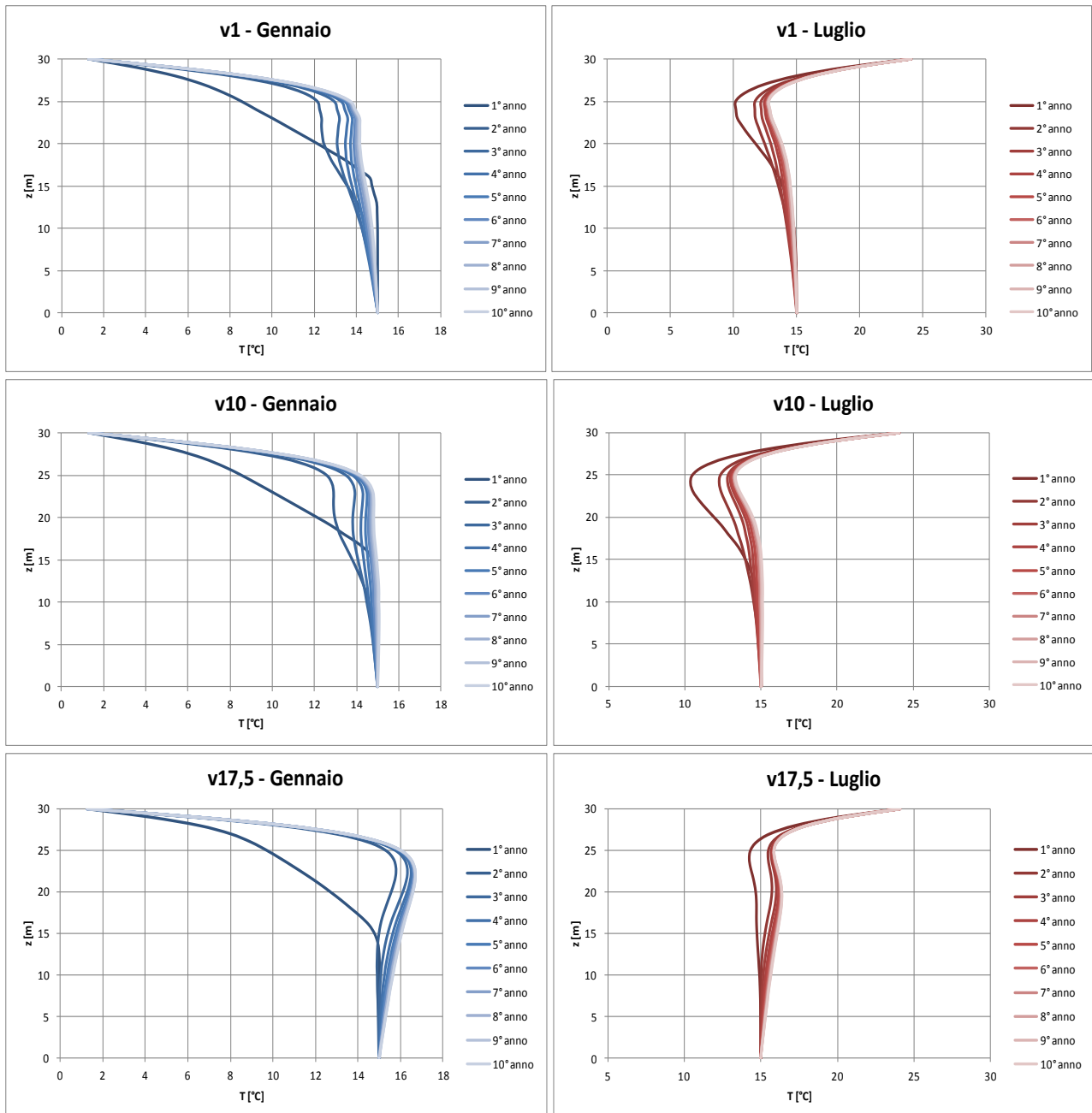


Figura 5.14 - Temperatura lungo i path verticali a sinistra della paratia

In Figura 5.14 si nota come avvicinandosi all'edificio, cioè procedendo dal path v1 al path v17,5 (Figura 5.8), la temperatura per $20\text{ m} < z < 25\text{ m}$ subisce l'influenza delle condizioni al contorno imposte sull'edificio stesso pari a 18°C .

Per valori di $z < 10$ m è forte l'influenza della condizione di temperatura costante (15°C) imposta sul fondo del dominio e scompare l'influenza delle fluttuazioni stagionali.

Durante l'estate si nota la formazione (in condizioni non influenzate dall'edificio, path v1) di una zona ($20\text{ m} < z < 25\text{ m}$) a temperatura minore. Essa è dovuta all'inerzia termica del terreno che ritarda e smorza la propagazione del calore dalla superficie verso la zona profonda, come evidenziato anche nelle analisi preliminari sul REV (capitolo 4).

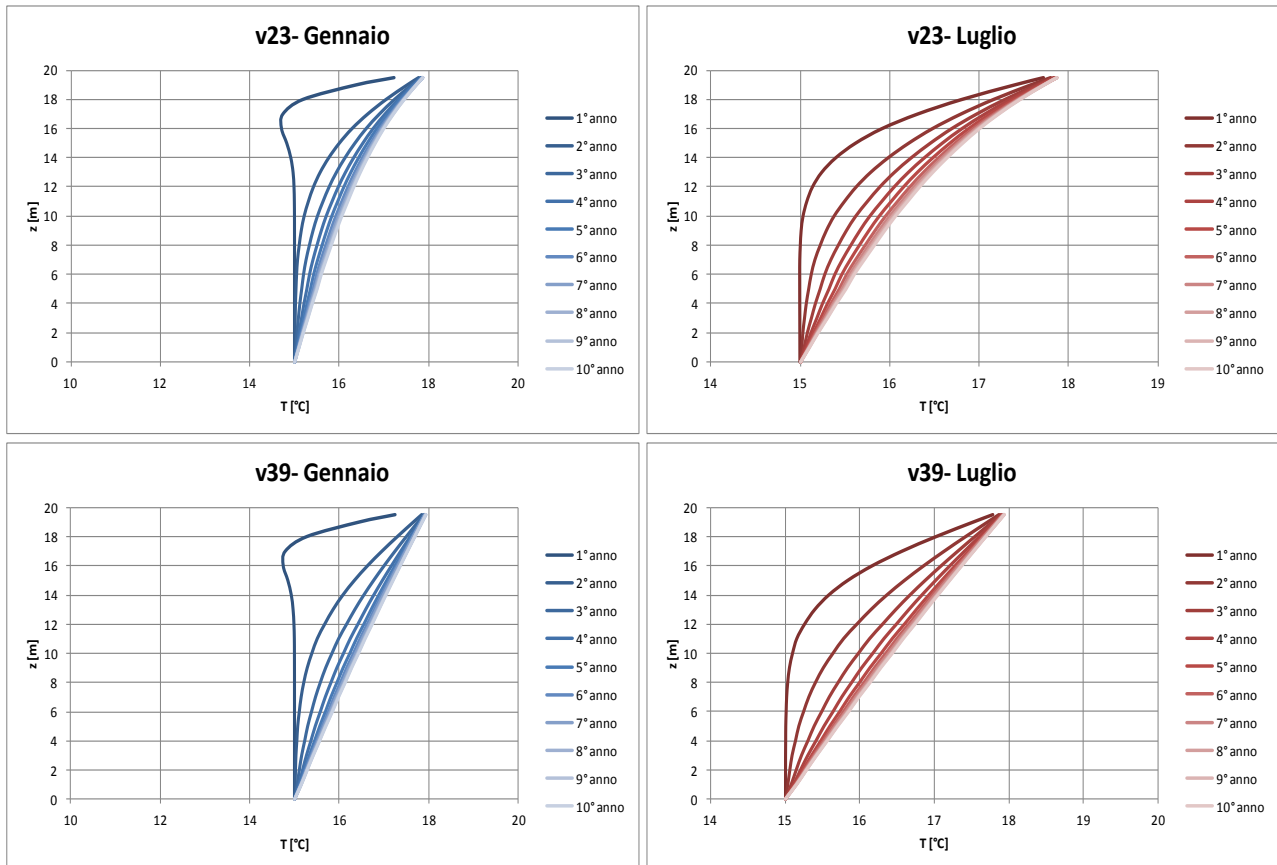


Figura 5.15 - Temperatura lungo i path verticali a destra della paratia

Sotto l'edificio (Figura 5.15) le fluttuazioni stagionali non hanno nessuna influenza e l'andamento della temperatura è governato dalle condizioni al contorno imposte a $z = 0$ m e sull'edificio. Questa considerazione si nota molto bene nel path v39, dove a regime si ha una distribuzione lineare della temperatura tra 18°C e 15°C .

Nel path v23 la distribuzione non è lineare in quanto influenzata dal campo di temperatura della regione sinistra del dominio (cfr Figura 5.9).

Le condizioni di regime, a causa dei minori gradienti termici, sono raggiunte in circa 6÷7 anni.

5.6.2 Variazione del livello di falda

Si analizza di seguito il campo di temperatura nel caso di terreno insaturo, prendendo in considerazione tre possibili abbassamenti della falda rispetto al piano campagna, secondo lo schema in Figura 5.16.

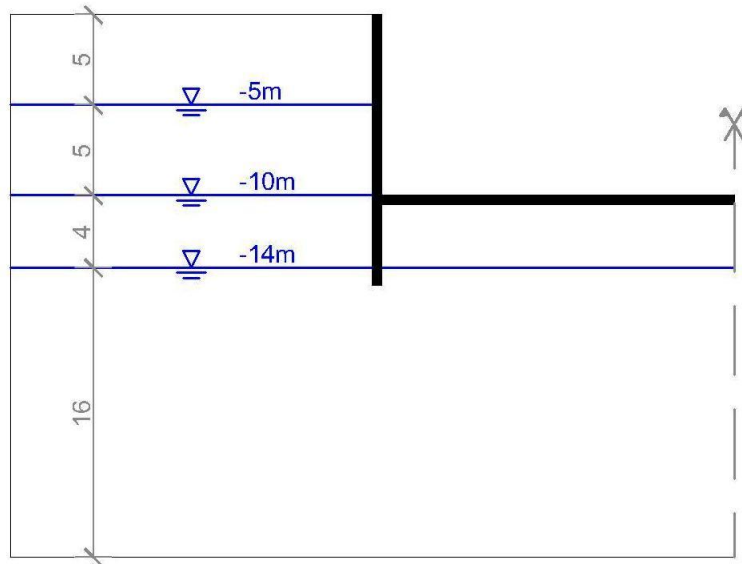


Figura 5.16 - Variazioni del livello di falda

I parametri del modello e i tempi di analisi sono gli stessi del caso di terreno completamente saturo, fatto salvo per la pozione di terreno sopra falda in cui si assume un grado di saturazione $S_r = 60\%$.

Le proprietà del terreno sono riportate in Tabella 11.

	Saturo	Insaturo
Sr	1	0.6
ρ [kg/m³]	1930	1740
k [W/(m °C)]	2.2	2.1
c [J/(kg °C)]	1642	1366

Tabella 11 - Proprietà terreno saturo (sotto falda) e insaturo (sopra falda)

Si riportano di seguito i risultati, in termini di temperatura $T(x)$, a luglio del 10° anno di analisi (condizioni a regime), lungo il path verticale v10 e lungo i path orizzontali o28 e o20, rispettivamente a -2 m e -10 m dal piano campagna.

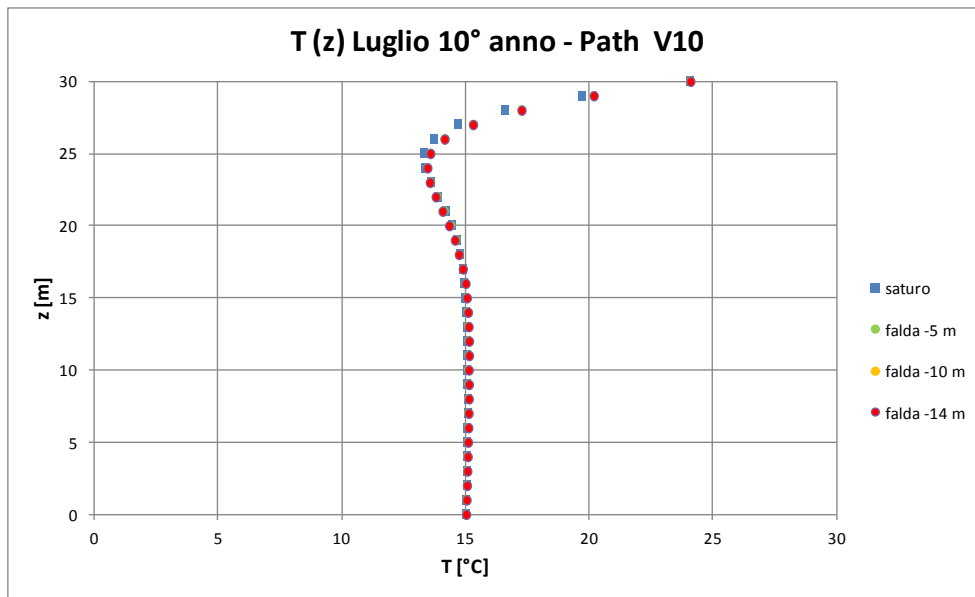


Figura 5.17 - Andamento della temperatura lungo il path v10 al variare del livello di falda

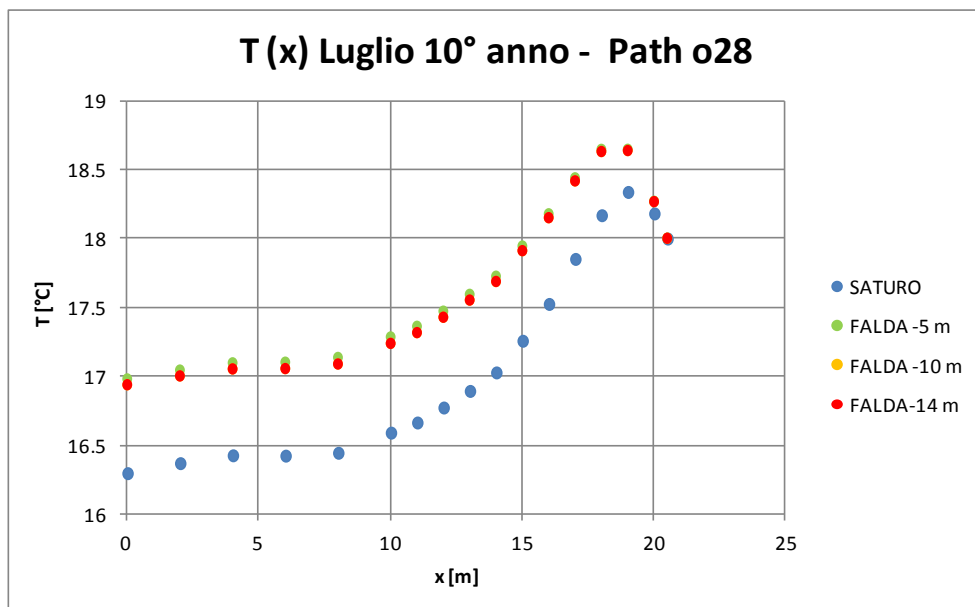


Figura 5.18 - Andamento della temperatura lungo il path o28 al variare del livello di falda

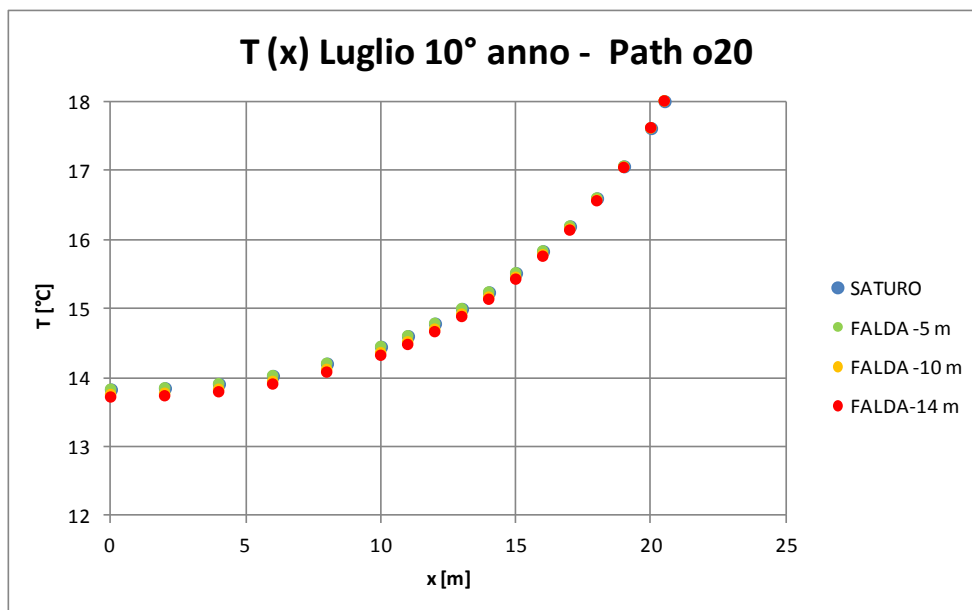


Figura 5.19 - Andamento della temperatura lungo il path o25 al variare del livello di falda

Esaminando il path v10 si nota come l'influenza dell'abbassamento del livello di falda sia evidente solamente nei primi 5 m di profondità dal piano campagna.

L'analisi dei risultati dei path o28 e o20 conferma che la variazione dell'altezza di falda (nel range di valori preso in considerazione) influenza l'andamento della temperatura nella sola porzione superficiale di terreno; infatti, la differenza è ben visibile nel path o28, mentre si riduce quasi a zero nel path o20. Tuttavia la differenza massima è circa pari a 1°C, quindi si può ritenere trascurabile.

La differenza tra le temperature, rispetto al caso di terreno saturo, è massima ai bordi del dominio ($x=0$) mentre si annulla in prossimità della paratia di fondazione ($x=20,5$), dove è imposta una temperatura di 18°C.

Tale differenza è imputabile alla variazione delle proprietà termiche del materiale; il terreno con $Sr = 60\%$ presenta, infatti, minori densità e calore specifico, con una diminuzione della conducibilità termica trascurabile rispetto al caso saturo.

Il risultato di questa variazione è una minor inerzia termica e quindi un aumento della velocità di risposta a una sollecitazione termica; a conferma di quanto detto si può notare come a fine luglio, a fronte di una temperatura esterna nell'ordine dei 25°C, il terreno insaturo si porti a una temperatura maggiore rispetto al caso saturo, in particolar modo vicino alla superficie (path o28).

È stato inoltre verificato che il campo di temperatura sotto l'edificio non risente in alcun modo della variazione del livello di falda.

5.6.3 Studio dell'effetto di eventuali edifici adiacenti

Se si prende in considerazione l'eventuale presenza di edifici nelle immediate vicinanze, bisogna tener conto dell'effetto che questi hanno sull'andamento della temperatura nel terreno.

Al fine di studiare questo effetto si è deciso di introdurre un edificio vicino a quello in esame, secondo la geometria di Figura 5.20.

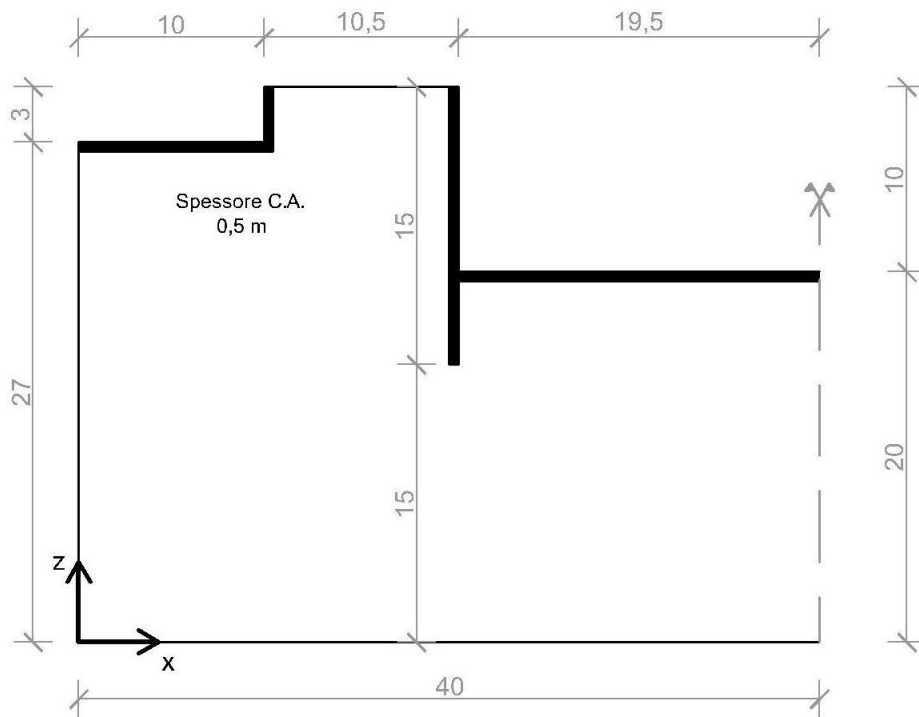


Figura 5.20 - Geometria del modello con 2 edifici

La presenza dell'edificio di sinistra riduce la porzione di piano campagna a contatto con l'atmosfera e presenta al contempo una condizione al contorno di temperatura pressoché costante lungo la superficie interna.

L'andamento della temperatura nel terreno sarà quindi influenzato non tanto dalle condizioni climatiche esterne, quanto dalle condizioni al contorno imposte sulla porzione seminterrata dei due edifici.

Per permettere il confronto con il caso in esame, su tutto il dominio sono imposte le stesse condizioni al contorno e iniziali, con una temperatura sulle pareti interne degli edifici pari a 18°C.

In Figura 5.21 e Figura 5.22 si riportano i campi di temperatura per i due casi:

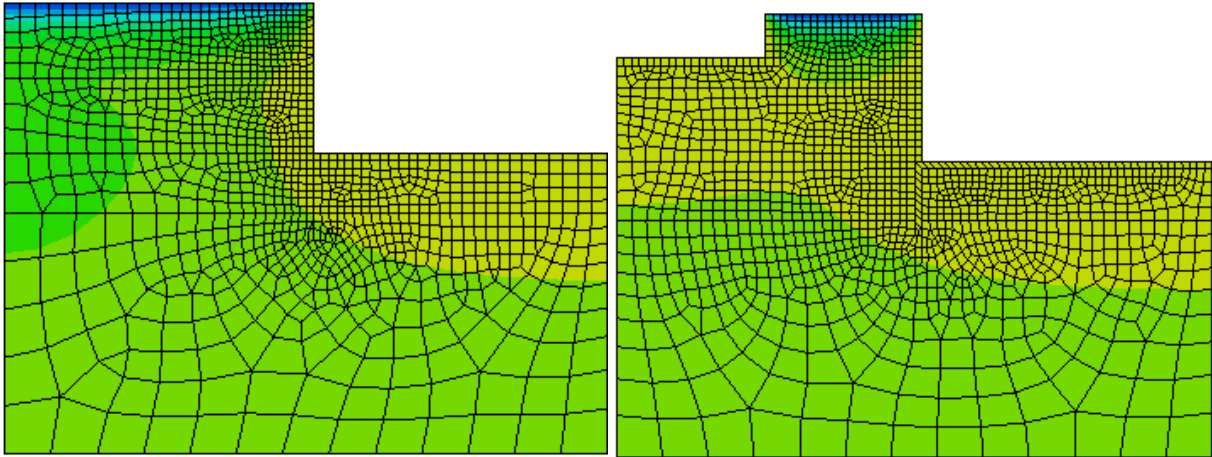


Figura 5.21 - Confronto tra assenza e presenza di un edificio limitrofo (inverno 10° anno)

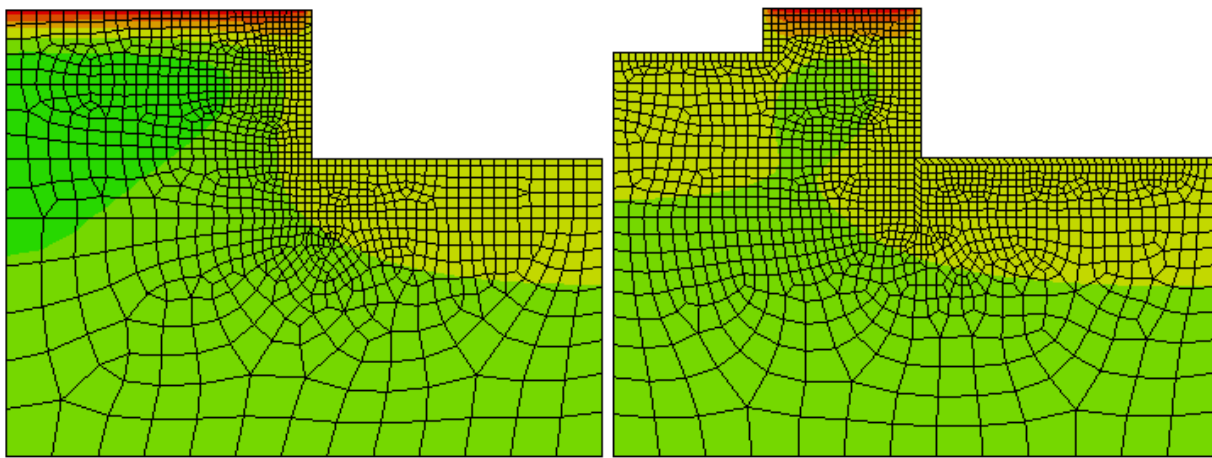
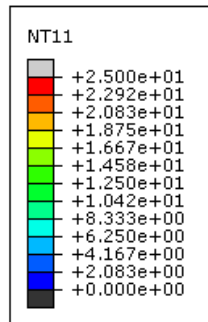


Figura 5.22 - Confronto tra presenza e assenza di un edificio limitrofo (estate 10° anno)



È possibile notare come la presenza dell'edificio di sinistra influenzi la temperatura del terreno, soprattutto per quanto concerne la parte più superficiale; sia le temperature invernali che quelle estive sono di fatto più alte rispetto al caso in cui sia presente il solo edificio di destra.

In inverno si nota molto bene la formazione di una fascia continua tra i due edifici di terreno con una temperatura maggiore, che "isola" gli strati più profondi dalle variazioni stagionali della temperatura.

Infatti, le fluttuazioni stagionali, a causa della presenza degli edifici, agiscono su una minore porzione di suolo e quindi la loro influenza è limitata ai primi 4÷5 metri di terreno, rispetto agli 8÷10 m delle condizioni indisturbate di aperta campagna.

Qualora si volesse installare un impianto del tipo “energy foundation”, che funga da impianto refrigerante d’estate e di riscaldamento d’inverno, bisognerebbe tenere conto che in ambito urbano la presenza di edifici vicini porterebbe dei benefici per quanto riguarda la fase invernale, ma degli svantaggi in estate essendo minore il gradiente di temperatura tra il fluido in uscita dall’impianto e terreno.

5.7 Conclusioni

Analizzando i risultati delle analisi presenti nel capitolo si può concludere quanto segue:

- Il campo di temperatura nel terreno è, in regime transitorio, funzione di proprietà quali densità, conducibilità termica e calore specifico.
Le fluttuazioni stagionali della temperatura esterna dell'aria, in caso di terreno in campo aperto senza la presenza di edifici, producono effetti nei primi 8÷10 metri di profondità e la risposta è sfasata nel tempo e smorzata procedendo verso il basso.
Oltre i 10 metri di profondità rispetto al piano campagna, invece, la temperatura è sempre costante, pari a circa 14÷15°C.
- La presenza di un edificio dotato di piani interrati altera il normale profilo di temperatura nel terreno, poiché all'interno della struttura la temperatura nel corso dell'anno è pressoché costante.
Esaminando il caso di Tradate si nota come, sotto la platea dell'edificio, la temperatura del terreno non risente delle oscillazioni stagionali; il terreno, trovandosi a 14÷15°C, subisce un lieve rialzo termico poiché risente della condizione di 18°C imposta sulla struttura.
Il processo continua finché nell'arco di circa 6÷7 anni si raggiungono le condizioni a regime.
Nella zona più superficiale, lateralmente alla porzione interrata della struttura, si nota invece una sovrapposizione tra gli effetti dovuti alle stagioni e il calore trasmesso dall'interno dell'edificio.
In generale la presenza della struttura influisce sul campo di temperatura fino a una distanza orizzontale di circa 10 metri; le condizioni a regime sono raggiunte più rapidamente nella fascia prossima alla superficie, in genere in 4÷5 anni.
- Passando dalle condizioni base di terreno completamente saturo a quelle indotte da una variazione del livello di falda, si è notato come il terreno nella zona insatura

abbia una diminuzione dell'inerzia termica. Essa è dovuta essenzialmente a una forte riduzione del calore specifico c , che prevale sulla modesta riduzione di conducibilità k ; ne consegue una risposta più rapida del terreno alle fluttuazioni stagionali della temperatura.

- La presenza di un tessuto urbano più fitto, tipico di un centro cittadino, rappresentata attraverso l'inserimento di un edificio limitrofo a quello in esame, altera il campo di temperatura presente nel terreno.

Il calore proveniente dagli edifici forma una fascia continua di temperatura più alta al di sotto della superficie, che "isola" gli strati più profondi dalle variazioni stagionali. Queste ultime, agendo su una superficie del piano campagna ridotta dalla presenza degli edifici, producono variazioni del campo di temperatura limitate alla fascia estesa a 3÷4 metri di profondità.

Le considerazioni fatte riguardo alla presenza di più edifici hanno tuttavia un carattere qualitativo, poiché dipendono dalla geometria del problema (distanza tra gli edifici limitrofi e numero di piani interrati).

Parte 2

In questa seconda parte dell'elaborato sono stati analizzati gli scambiatori di calore integrati nelle opere di fondazione di una struttura (energy foundation).

Dopo una breve sintesi dello stato dell'arte degli impianti a bassa entalpia, è stato studiato il problema dello scambio termico su un pannello test, per poi approfondire lo studio sull'impianto di Tradate.

6 SCAMBIATORI DI CALORE INTEGRATI NELLE OPERE DI FONDAZIONE - STATO DELL'ARTE

Come già specificato nel capitolo 1.1, esistono due "tipologie" di energia geotermica, ad alta e bassa entalpia.

Le soluzioni ad alta entalpia presentano rendimenti di esercizio maggiori, poiché la temperatura a profondità elevate non subisce le fluttuazioni stagionali dovute alle condizioni atmosferiche e mantiene valori costanti più elevati che in prossimità della superficie.

Lo svantaggio principale è il maggiore costo iniziale dell'impianto, specie nello scavo di pozzi profondi, e nei maggiori costi di costruzione ed esercizio delle apparecchiature per il movimento del fluido termovettore (pompe).

Esistono diverse tipologie di soluzioni a bassa entalpia (Brandl, 2006), ma dagli anni '80 sono state sviluppate prevalentemente le cosiddette **energy foundations**; le tecniche precedenti erano basate sulla costruzione di sistemi di serpentine posti in trincee o in letti piani scavati appositamente nelle vicinanze dell'edificio o dell'opera interessata (Figura 6.1).

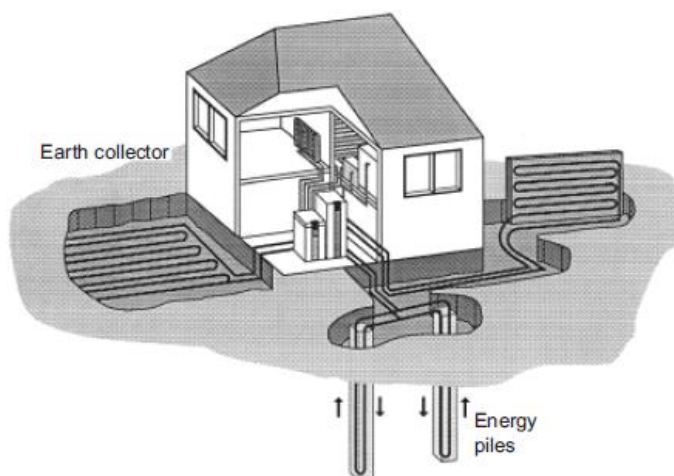


Figura 6.1 - Esempi d'impianti a bassa entalpia, con serpentine disposte in trincee, pannelli o in pali realizzati appositamente (Brandl, 2006)

Infatti, nelle energy foundations le serpentine sono inglobate direttamente nella struttura dell'edificio, portando i seguenti vantaggi:

- Non sono necessarie opere aggiuntive rispetto a quelle di una struttura senza il sistema di estrazione del calore.
- Sono sfruttate le ottime proprietà termiche del calcestruzzo di fondazione (Brandl, 2006).

Esempi di energy foundations sono: pali, muri a diaframma, piastre di fondazione; la prima soluzione è spesso la più adottata perché presente in molte strutture e, come si vedrà in seguito, energeticamente più efficiente.

L'impianto, come brevemente descritto nel capitolo 1 (Figura 1.5), può essere utilizzato per prelevare calore dal terreno (riscaldamento invernale, *heating*) oppure per cedere calore al suolo (rinfrescamento estivo, *cooling*), sia singolarmente sia alternando i due effetti nelle diverse stagioni.

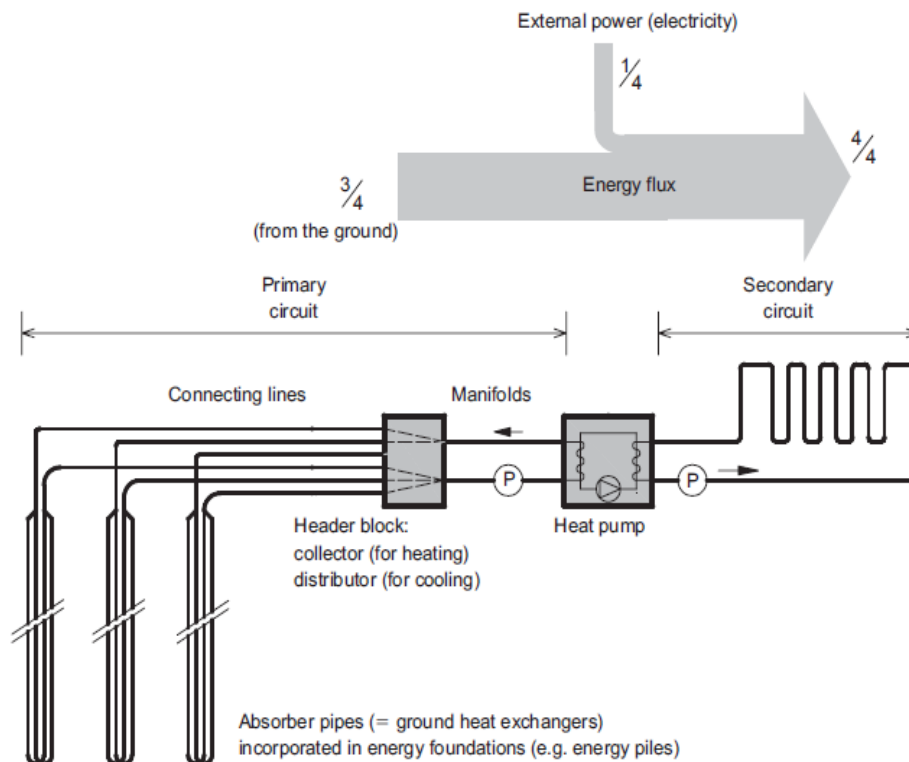


Figura 6.2 - Schema dei due circuiti e dei flussi di calore (Brandl, 2006)

Di seguito è riportata una descrizione dei circuiti dell'impianto e del loro funzionamento nel periodo invernale. Nel periodo estivo il processo si inverte.

L'impianto (Figura 6.2) è costituito da due circuiti, primario e secondario, connessi tramite una pompa di calore (Heat pump, indicata col simbolo HP). Il circuito primario convoglia il calore assorbito dalle diverse linee dei tubi scambiatori, posti nelle fondazioni,

alla pompa di calore; dato l'elevato numero di linee presenti, è necessario inserire un collettore, così da avere un unico ingresso alla pompa di calore.

Il circuito secondario è posto nell'edificio e consente la diffusione del calore nei diversi ambienti.

La movimentazione del fluido è svolta da pompe idrauliche (generalmente pompe centrifughe, indicate col simbolo P) inserite nei due circuiti.

6.1 Elementi del circuito

Di seguito si riporta una descrizione dei principali elementi del circuito.

La **pompa di calore** (HP) è sostanzialmente una macchina frigorifera che trasferisce energia termica da un serbatoio a temperatura più bassa a uno a temperatura più alta, utilizzando energia elettrica (raramente energia termica).

Concettualmente è simile a un frigorifero di uso domestico, ma in questo caso l'obiettivo non è raffreddare il serbatoio freddo (terreno) ma è riscaldare quello caldo (edificio).

È costituita da un circuito nel quale è presente il fluido refrigerante, una sostanza che, durante gli scambi con i serbatoi di calore, deve avere una transizione di fase (evaporazione o condensazione).

Secondo il livello di temperatura che deve raggiungere la macchina, cambia il fluido refrigerante. Tra i fluidi più utilizzati vi sono l'ammoniaca (NH_3) e i clorofluorocarburi (CFC), questi ultimi oggi sostituiti dai clorofluoroidrocarburi (HCFC) e dai fluoroidrocarburi (HFC) che sono meno dannosi per l'ozono (Inzoli & Dassù, 2003b).

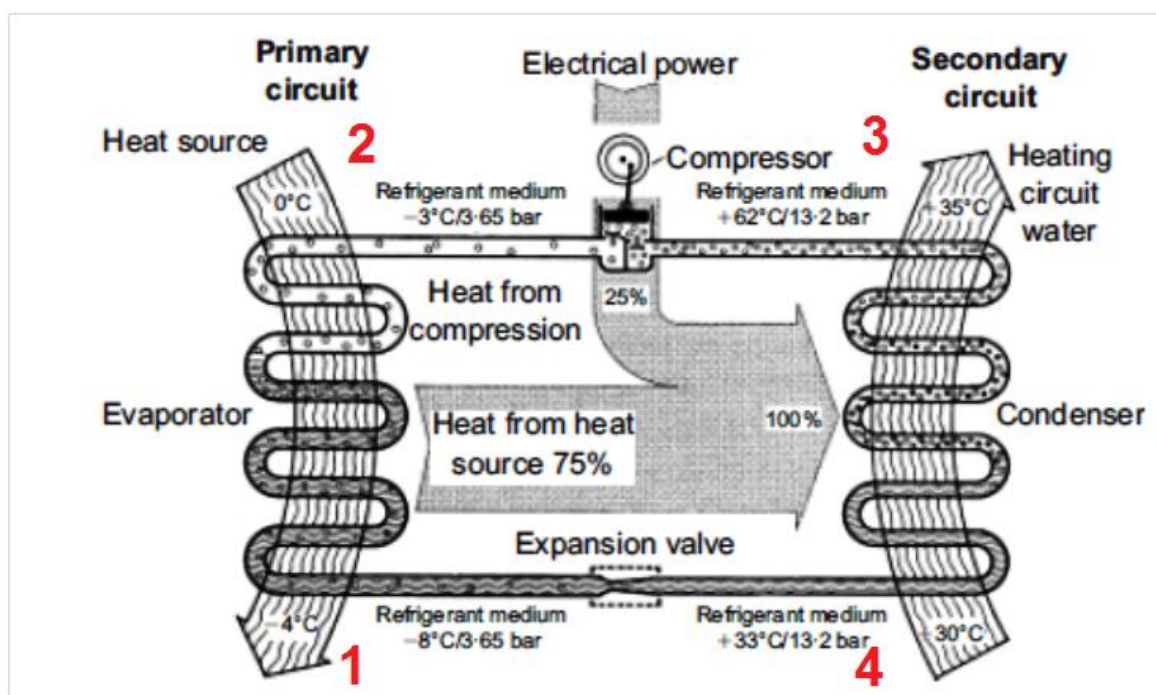


Figura 6.3 - Schema della pompa di calore e dei flussi termici (Brandl, 2006)

Nel circuito sono disposti un compressore, due scambiatori di calore (evaporatore e condensatore) e una valvola di espansione (Figura 6.3).

Il fluido refrigerante entra nell'evaporatore (punto 1) a bassa pressione e temperatura (allo stato liquido) e in esso assorbe calore dall'ambiente circostante (in questo caso dal circuito primario). All'uscita nel punto 2 si trova in fase gassosa (vapore).

Fornendo energia al sistema attraverso un compressore, si porta il vapore a pressione più alta e di conseguenza, essendo un gas, a temperatura più alta.

Nel punto 3 il vapore caldo entra nel condensatore e cede parte del proprio calore al fluido del circuito secondario; la temperatura raggiunta nel punto 3 deve essere maggiore di quella del fluido nel circuito secondario, altrimenti non è possibile lo scambio.

All'uscita del condensatore (punto 4) il fluido è fatto passare attraverso una valvola di espansione, un semplice restringimento nel circuito seguito da un allargamento di sezione che, provocando una diminuzione di pressione, riporta il fluido allo stato iniziale (punto 1).

Il rendimento della pompa di calore è espresso dal COP (Coefficient Of Performance):

$$COP = \frac{E_C[kWh]}{E_{HP}[kWh]}$$

Dove:

- E_C : energia fornita dalla pompa di calore alla sorgente calda.
- E_{HP} : energia (elettrica) necessaria al funzionamento della pompa di calore.

come rappresentato nello schema di Figura 6.4. Le pompe di calore di uso comune hanno COP all'incirca pari a 4, cioè il 25% dell'energia è fornita dall'esterno (corrente elettrica) e il 75% è estratta dal terreno.

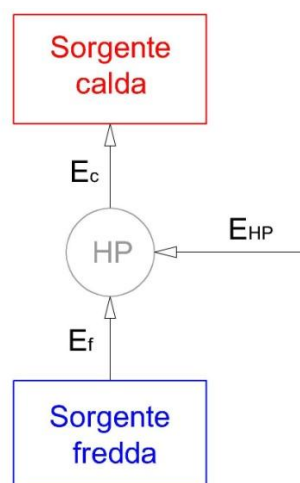


Figura 6.4 - Schema dei flussi di calore nella HP

Per valutare l'efficienza dell'intero impianto si utilizza l'indicatore SPF (Seasonal Performance Factor) definito come:

$$SPF = \frac{E_{utilizzabile}[kWh]}{E_{spesa}[kWh]}$$

L'energia spesa non comprende solo la pompa di calore ma anche le pompe idrauliche o dispositivi di controllo necessari per il funzionamento dell'impianto. Normalmente $SPF = 3,8 \div 4,3$.

I **tubi** utilizzati per trasportare il fluido termovettore sono realizzati in polietilene ad alta densità, con diametro variabile tra i 20 e i 25 mm; sono in genere fissati alle barre d'armatura e annegati nel calcestruzzo durante il getto. Rari sono i casi di elementi prefabbricati, specie per i pali, poiché sarebbe elevato il rischio di rottura durante l'infissione.

Infatti, la procedura di posa in opera richiede una buona attenzione per evitare rotture; i tubi sono riempiti di acqua e mantenuti alla pressione di 8 bar durante l'intera operazione di getto, per individuare subito eventuali danni o difetti e per evitarne il collasso sotto la spinta idrostatica del calcestruzzo fluido.

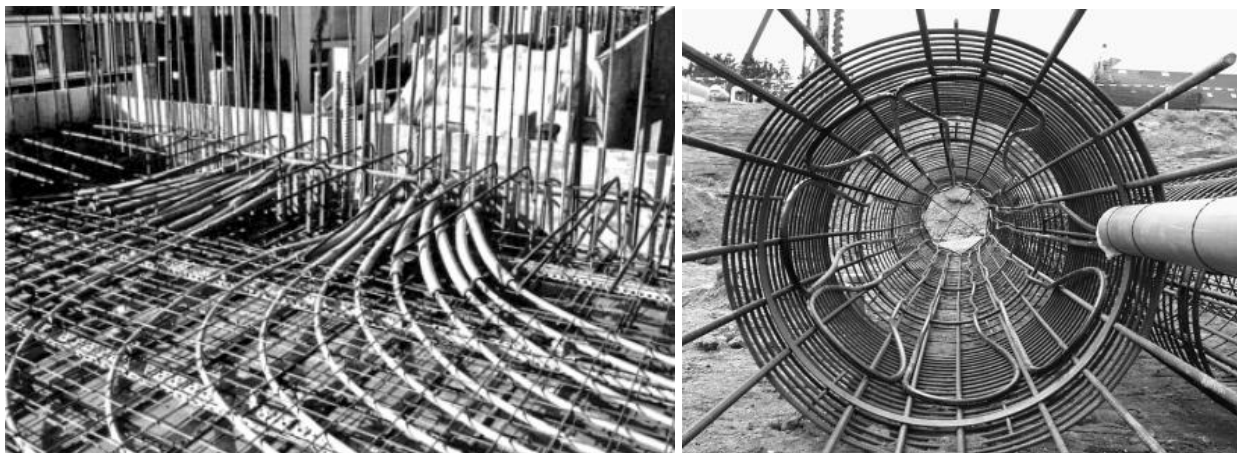


Figura 6.5 - Tubi e armature prima del getto del calcestruzzo (Brandl, 2006)

Il **fluido termovettore** impiegato solitamente è acqua miscelata con un antigelo (spesso il glycol). Quest'ultimo riduce l'efficienza dello scambio termico (Brandl, 2006), ma evita problemi di congelamento se, a causa di un uso scorretto, la temperatura dovesse scendere sotto 0°C.

6.2 Geometria delle fondazioni

La **forma** delle energy foundations ha un notevole impatto sull'efficienza di assorbimento del calore dal terreno. Uno studio svolto da Adam & Markiewicz nel 2002 ha esaminato tre configurazioni ideali, nelle quali varia la geometria della superficie di scambio termico:

- Semispazio.
- Foro cilindrico circondato da uno spazio infinito.
- Foro sferico circondato da uno spazio infinito.

L'analisi è stata svolta in ipotesi di sola conduzione termica. Le equazioni differenziali di trasmissione del calore, rispettivamente per i tre casi, sono (θ indica la temperatura):

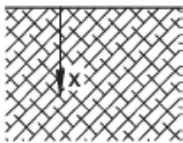
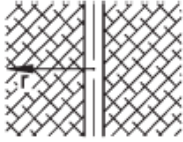
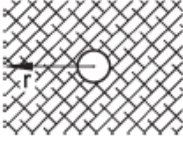
Case	Sketch	Differential equation
1: Semi-infinite body		$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \theta(x, t) = \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial t} \theta(x, t)$
2: Infinite body with cylindrical gap		$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \theta(r, t) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \theta(r, t) = \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial t} \theta(r, t)$
3: Infinite body with spherical gap		$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \theta(r, t) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \theta(r, t) = \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial t} \theta(r, t)$

Figura 6.6 - Diverse geometrie di energy foundation (Adam & Markiewicz, 2002)

La soluzione in termini di calore specifico scambiato, ottenuta per via numerica, è la seguente:

Caso	Specific heat exchange [kWh/m ²]
1	72.37
2	287.04
3	984.81

Tabella 12 - Calore specifico scambiato (Adam & Markiewicz, 2002)

La terza conformazione, di forma sferica, è quella più efficiente, avendo il massimo valore di energia scambiata per m² di superficie, ma spesso non è realizzabile; molto più comune è la seconda tipologia, assimilabile a un palo o a un tunnel scavati nel terreno.

Da qui la motivazione, sopra accennata, del perché i pali siano alcuni tra gli elementi più utilizzati come scambiatori; a parità d'area esposta hanno uno scambio termico 4 volte maggiore rispetto a un elemento con contatto superficiale (come una classica fondazione a platea).

Resta comunque da ribadire che l'impianto d'estrazione del calore è adattato alla geometria della struttura dell'opera e non viceversa; quindi in molti casi si hanno scambiatori piani, come paratie o setti.

6.3 Raccomandazioni per la pratica

Per ottimizzare le prestazioni e l'efficacia dell'opera è consigliato conoscere, in fase di progettazione, le seguenti proprietà del suolo (Brandl, 2006):

- Idrogeologiche (posizione e variazioni del livello di falda).
- Geologiche e geotecniche (materiale, porosità, contenuto d'acqua, indice dei vuoti, permeabilità idraulica, ecc).
- Geotermiche (conducibilità termica, capacità termica, temperatura ecc).
- Chimiche e mineralogiche (solo per progetti più complessi).

Inoltre dovrebbero essere noti i seguenti parametri:

- Dettagli strutturali dell'edificio (geometria e tipologia delle fondazioni, proprietà del calcestruzzo, ecc).
- Condizioni climatiche dell'ambiente.
- Fisica dell'edificio (spessore dei materiali isolanti, tipo di serramenti, ponti termici, temperature richieste ecc).

Lo studio di questi parametri permette di stabilire se è fattibile o meno la costruzione dell'impianto, nella tipologia richiesta (*heating*, *cooling* o entrambi).

Nel caso di solo *heating* o solo *cooling*, terreni con permeabilità elevata e grandi variazioni del livello della falda sono ottimali, poiché il processo di estrazione o immissione di calore nella falda è monodirezionale, cioè tende ad accumularsi nel tempo. Un frequente movimento dell'acqua contenuta nel suolo può quindi re-immettere il calore estratto (*heating*) o asportare quello in eccesso (*cooling*).

Invece nel caso opposto si ha un parziale riequilibrio tra il calore sottratto al suolo in inverno e quello re-immesso d'estate per mezzo dell'impianto stesso; in questo caso sono preferibili terreni a bassa permeabilità e con limitate variazioni del livello di falda.

6.4 Problematiche

Sono stati esaminati (Brandl, 2006) i possibili effetti delle variazioni di temperatura sul suolo attraverso analisi sperimentali su casi reali, giungendo alle seguenti conclusioni:

- Nel caso in cui le temperature nel terreno siano portate a valori eccessivamente bassi o alti, si possono avere degli effetti negativi.

Per T basse:

- Aumenta la viscosità dell'acqua di falda e diminuisce la conducibilità idraulica.
- Aumenta il pH e si riduce la solubilità del calcio.
- Aumenta la solubilità della CO₂.
- Proliferano i batteri patogeni.

Per T alte:

- Riduzione dell'ossigeno disciolto nell'acqua, con problemi se questa è usata per scopi potabili.

Tali effetti comunque sono trascurabili se la temperatura T nel terreno rimane superiore a +2°C.

- Se $T < 0^{\circ}\text{C}$ i cicli di congelamento e disgelo possono causare effetti sulla capacità portante del terreno, provocando rigonfiamenti in superficie e rischio di rottura delle opere di sostegno. Questa situazione, da evitare, è dovuta alla formazione di lenti di ghiaccio nel terreno; si avrebbe, infatti, un aumento della conducibilità termica k e diminuzione della capacità termica C , che riduce l'efficienza dell'impianto e tende ad accelerare ancor più il processo di formazione delle lenti di ghiaccio.

6.5 Esempio di applicazione su tipologia differente dall'edificio

Esistono molti esempi diversi di applicazione delle energy foundations e ogni caso ha la propria peculiarità e un differente uso dell'energia; per esempio nelle stazioni della metropolitana è richiesto principalmente il raffreddamento e la soluzione geotermica è ottima perché evita la costruzione di torri di raffreddamento (antiestetische) e l'utilizzo di gas combustibile (non consentito per ragioni di sicurezza).

Vi sono inoltre esempi di utilizzo per piste da pattinaggio su ghiaccio, per la climatizzazione dei musei e per il riscaldamento di piscine o saune.

Alcuni esempi d'impianti energy foundations sono descritti da Brandl e riguardano principalmente opere realizzate in Austria.

In particolare si riporta di seguito una breve descrizione del **Lainzer Tunnel** realizzato a Vienna per unire le linee ferroviarie ovest e sud, e potenziare così i collegamenti con l'Europa occidentale.

Il tunnel è stato interamente attrezzato con scambiatori termici per sfruttare il calore presente nel suolo, utilizzato per il raffrescamento e il riscaldamento delle stazioni, di

edifici residenziali e uffici, di una scuola e per la protezione delle banchine e dei sovrappassi dal ghiaccio invernale.

Tralasciando i dettagli tecnici, si possono evidenziare le due differenti tecnologie di costruzione del tunnel adottate:

- I. *Cut and cover*: consiste nella realizzazione di grossi pali di sostegno laterali, rivestiti poi da una finitura in lastre prefabbricate di C.A. ancorate tramite spinotti ai pali; la copertura e la base sono in calcestruzzo armato. Questo metodo è adatto principalmente per terreni sciolti (Figura 6.7 e Figura 6.9).

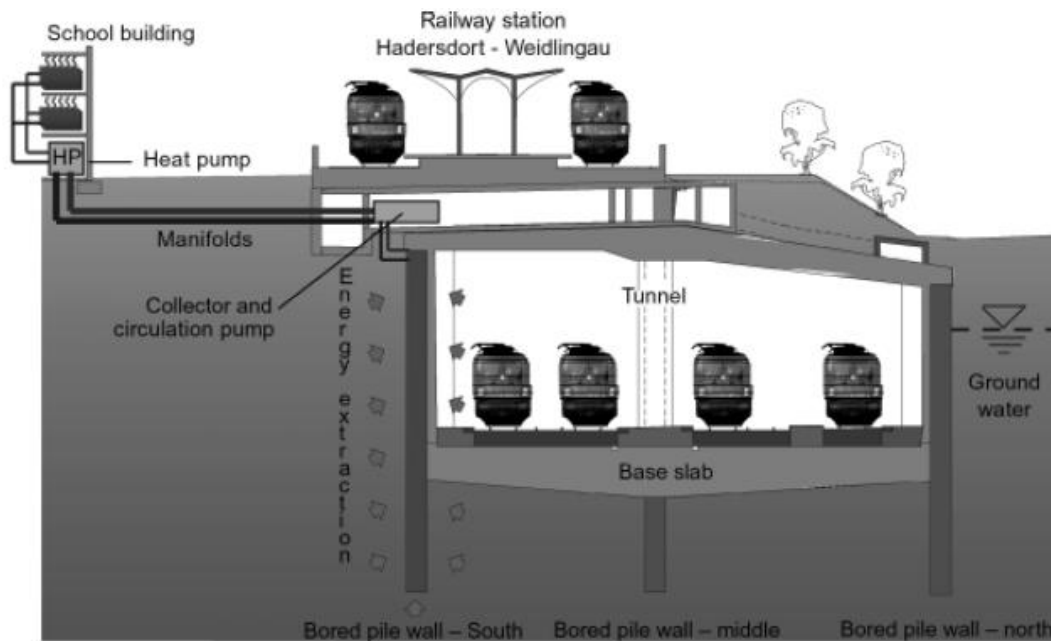


Figura 6.7 - Sezione del Lainzer Tunnel realizzata con il metodo cut and cover (Brandl, 2006)

- II. *New Austrian Tunnelling Method (NATM)*: consiste inizialmente nella realizzazione di ancoraggi nella roccia e di un rivestimento di calcestruzzo spruzzato, rifinito poi con una seconda copertura in calcestruzzo armato (Figura 6.8 e Figura 6.10).

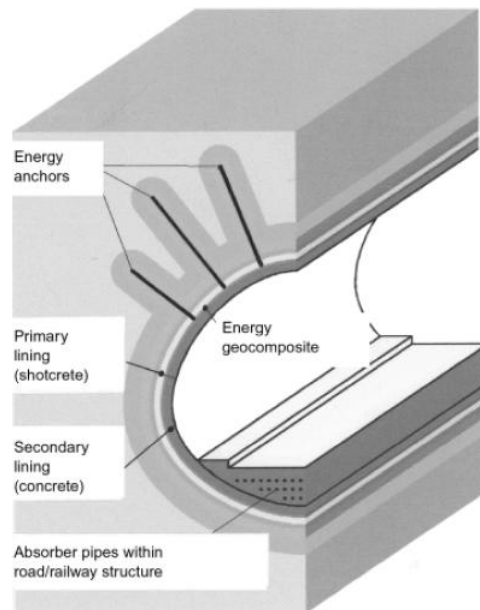


Figura 6.8 - Tratto del Lainzer Tunnel realizzato con il New Austrian Tunnelling Method (NATM) (Brandl, 2006)

Nel primo metodo la tecnologia utilizzata è quella classica, con l'inserimento dei tubi scambiatori direttamente nei pali, precisamente in uno ogni tre per sfruttarne al massimo la capacità assorbente.

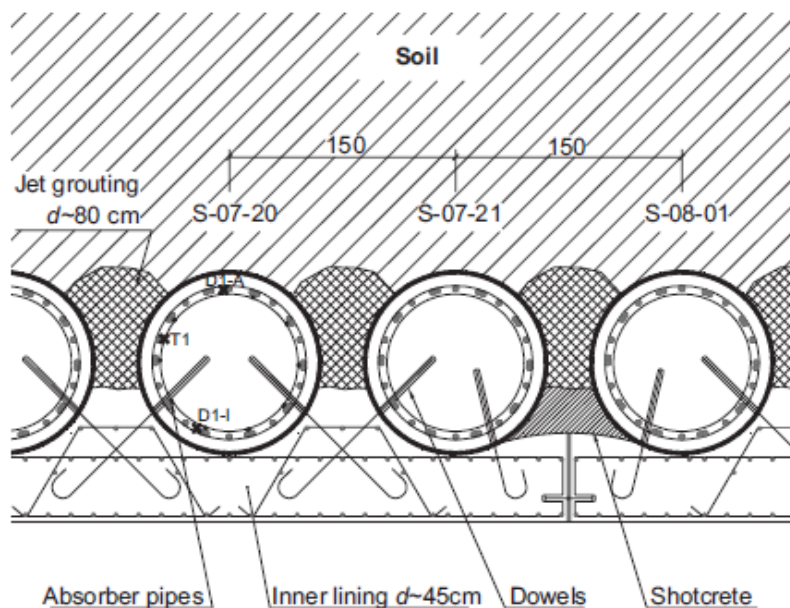


Figura 6.9 - Sezione del rivestimento per il metodo cut and cover (Brandl, 2006)

È necessaria una certa cura nella posa in opera del rivestimento per evitare che l'inserimento degli spinotti di ancoraggio danneggi i tubi presenti nel palo; una buona norma consiste nel "nascondere" il tubo dietro una doppia barra di armatura (Figura 6.9).



Figura 6.10 - Membrana in geocomposito con tubi assorbenti (NTAM) (Brandl, 2006)

Nel tratto realizzato con tecnologia NATM, invece, gli scambiatori sono diversi e posti direttamente negli ancoraggi (chiodi) e in una membrana in geocomposito avvolta sulla superficie interna del tunnel a contatto con la roccia (Figura 6.10).

In questo caso però l'efficienza è ridotta e la procedura di costruzione è notevolmente complessa per la difficile organizzazione delle sequenze successive di posa. Queste tecnologie sono innovative e ancora in corso di sperimentazione e ottimizzazione.

Si riportano di seguito, a titolo d'esempio e al solo scopo di fornire un ordine di grandezza, i dati tecnici riguardanti la sola stazione di **Hadrdsdorf-Weidlingau**, dove l'energia è utilizzata anche per il riscaldamento di una scuola vicina.

Annual heating output [Mwh]	214
Energy piles	59 piles
Mean length [m]	17.1
Heating capacity [kW]	150
Required antifreeze passage m³/h	51.6
Absorber pipes	HDPE
	d ₀ =25 mm
	d ₁ =20 mm
Absorber circuits	80 units
Absorber pipes in piles, total length [m]	9709
Connecting lines, total length [m]	13754

Figura 6.11 - Dati tecnici della stazione di Hadrdsdorf-Weidlingau (Brandl, 2006)

Sono stati realizzati anche impianti con potenze ed energie in gioco molto maggiori di quelle dell'esempio sopra riportato, che ovviamente richiedono dimensioni maggiori dell'impianto di assorbimento.

Ad esempio un grande hotel realizzato in Austria ha una pompa di calore di potenza 400 kW e la quantità di energia estratta dal suolo è di 1,6 GWh per inverno, pari alla richiesta di 160 moderne abitazioni monofamiliari (Brandl, 2006)

7 STUDIO DI UN PANNELLO TEST

Come accennato nel capitolo 5, nell'impianto di Tradate le serpentine sono disposte all'interno della paratia, che è suddivisa in pannelli (descritti nel dettaglio in seguito, nel capitolo 8.1).

In questo capitolo si vuole esaminare un pannello campione, di dimensioni ridotte, al fine di individuare la disposizione delle serpentine che garantisca il miglior rendimento e quali sono i parametri che influenzano lo scambio termico terreno-impianto.

Lo studio è fatto su un dominio di piccole dimensioni per diminuire l'onere computazionale delle analisi.

Inoltre sarà analizzata l'influenza della velocità V del fluido sul funzionamento dell'impianto.

La seguente espressione permette di determinare il flusso di calore q [W] scambiato tra un fluido e la parete del tratto di tubo nel quale scorre, in questo caso tra le sezioni d'ingresso e d'uscita della serpentina:

$$q = \dot{m}c(T_{in} - T_{out})$$

Dove:

- \dot{m} : portata massica di fluido nella serpentina [kg/s]
- c : calore specifico del fluido [J/(kg °C)]
- T_{in} : temperatura del fluido in ingresso alla serpentina [°C]
- T_{out} : temperatura del fluido in uscita dalla serpentina [°C]

Per massimizzare il calore scambiato tra impianto e terreno è quindi necessario trovare la combinazione ottimale tra \dot{m} e $(T_{in} - T_{out})$, al variare della lunghezza della serpentina, della sua disposizione e della velocità di scorrimento del fluido nella stessa.

Dovendo confrontare soluzioni diverse, si è scelto di esaminare un dominio semplificato e imporre identiche condizioni al contorno e iniziali (descritte nel capitolo 7.3).

7.1 Geometria

Lo studio è svolto su un parallelepipedo costituito da due zone, la paratia in calcestruzzo armato (precisamente la metà esterna) e il terreno.

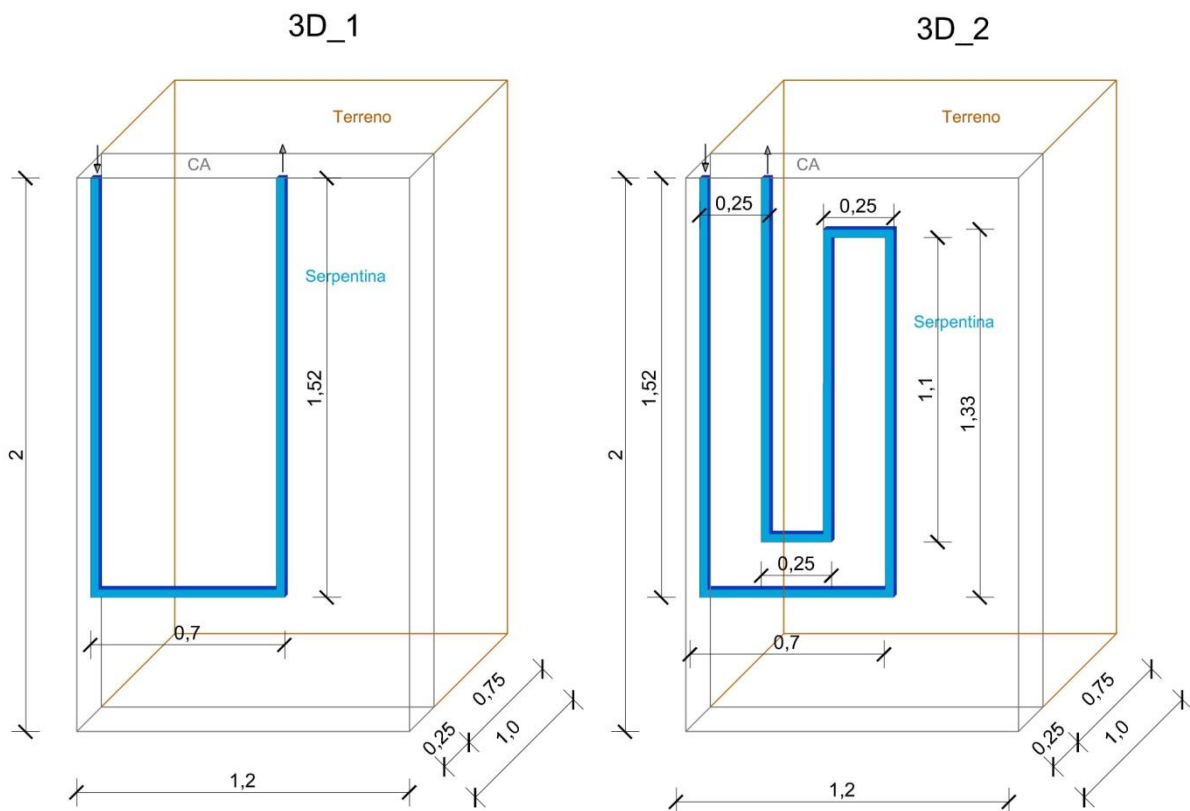
La serpentina, posta all'interno della paratia, presenta una sezione quadrata di lato 3 cm ed è studiata in 7 diverse disposizioni geometriche, chiamate con numero progressivo da 3D_1 a 3D_7.

Nelle configurazioni 1÷5 la serpentina si sviluppa in un piano verticale a metà dello spessore della paratia, mentre nei casi 6 e 7 ha uno sviluppo tridimensionale.

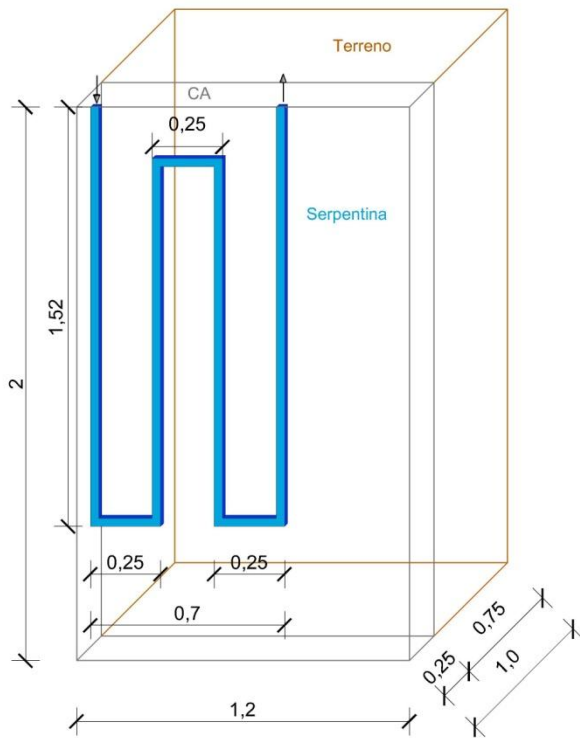
Si riportano di seguito (Figura 7.1) le geometrie dei modelli e la tabella con le proprietà dei materiali. Questi ultimi hanno le stesse caratteristiche già esaminate nel capitolo 5.2.

	ρ [kg/m ³]	k [W/(m°C)]	c [J/(kg°C)]
Terreno	1930	2.2	1642
C.A.	2500	2.6	880
Fluido termovettore	1000	0.57	4186

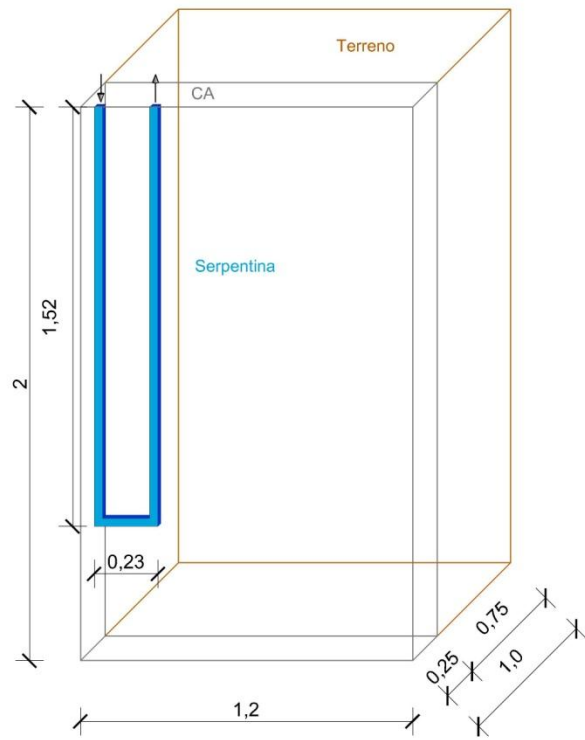
Tabella 13 – Parametri dei materiali nei 7 modelli



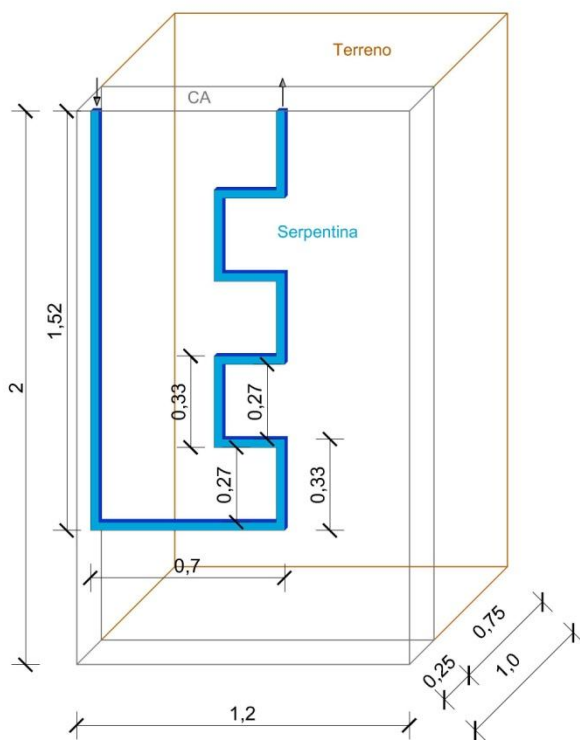
3D_3



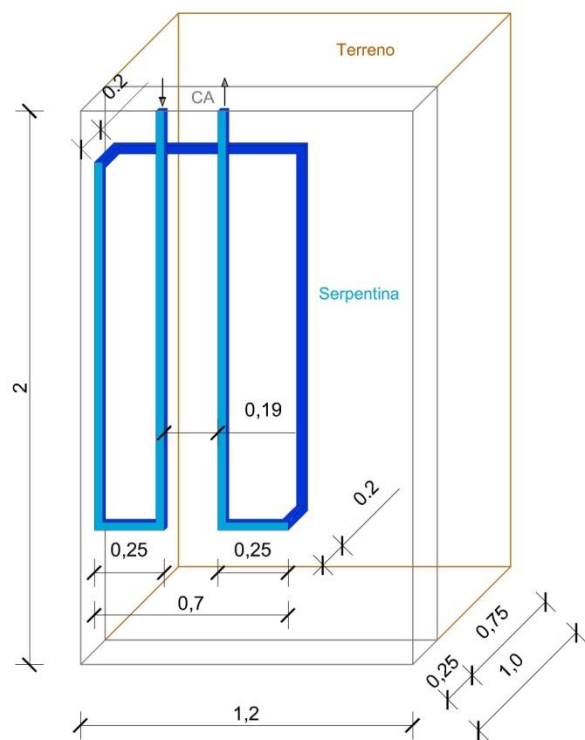
3D_4



3D_5



3D_6



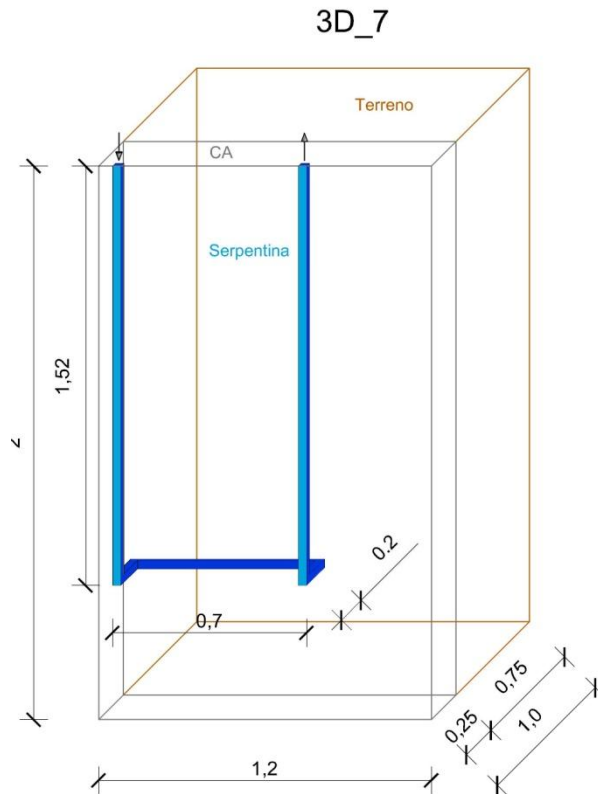


Figura 7.1 - Modelli analizzati

7.2 Influenza della velocità del fluido sulla trasmissione del calore

Il primo parametro da considerare nello studio del modello è la velocità V del fluido termovettore; essa gioca un ruolo fondamentale sia negli aspetti prettamente idraulici sia nella trasmissione del calore, che sono strettamente legati tra loro.

Procedendo con ordine, si esamineranno ora gli aspetti idraulici e a seguire quelli di trasmissione del calore, evidenziandone lo stretto legame per il caso in esame (flusso in un tubo).

7.2.1 Aspetti idraulici

Perdite di carico

Come noto dall'idraulica, un fluido in movimento in un tubo è soggetto a forze che ne ostacolano il moto, che determinano una perdita di carico.

Le perdite di carico possono essere divise in due categorie: perdite distribuite e concentrate.

Perdite di carico concentrate

Le perdite di carico concentrate si localizzano nelle discontinuità presenti nel tubo (curve, variazioni di sezione, ecc) che generano un disturbo alla corrente, la quale perde le caratteristiche di moto uniforme; tali perdite sono proporzionali all'energia cinetica del fluido secondo la seguente espressione (Citrini & Nosedà, 1987):

$$\Delta H_{conc} = \sum_i n_i \alpha_i \frac{V^2}{2g}$$

Dove

- n_i : numero di discontinuità geometriche dello stesso tipo i .
- α_i : coefficiente di perdita di carico, funzione del tipo di discontinuità.

Il valore di α per curve ad angolo retto è pari a 0,5.

In questo elaborato sono trascurate le perdite d'imbocco e di sbocco, poiché non si analizza il tratto d'impianto che funge da raccordo tra la pompa di calore e il pannello.

Perdite di carico distribuite

Le perdite di carico distribuite sono dovute agli attriti interni al fluido, funzione della viscosità, e agli attriti tra fluido e parete interna del tubo, funzione della scabrezza ε del condotto.

L'importanza di ciascuna delle due tipologie di dissipazione è legata al valore del numero adimensionale di Reynolds. Esso indica la prevalenza dei contributi di attrito interni al fluido, rispetto a quelli dovuti alla scabrezza del tubo.

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

- V [m/s]: velocità del fluido.
- D [m]: diametro idraulico del tubo. Per tubi circolari è uguale al diametro fisico.
- ν [m²/s]: viscosità cinematica, per l'acqua pari a 10⁻⁶ m²/s.

Valori del numero di Reynolds minori di 2300 indicano un **moto laminare**, nel quale prevalgono gli effetti viscosi e il fluido si muove in filetti paralleli all'asse del tubo.

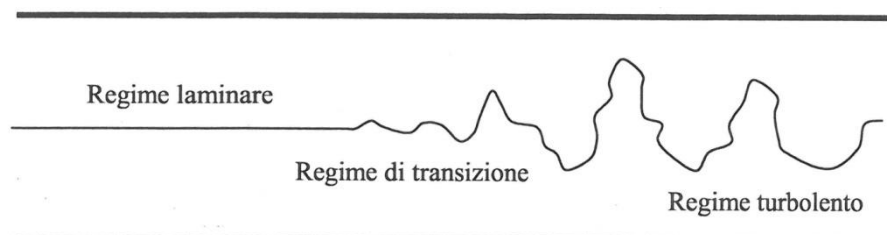


Figura 7.2 - Rappresentazione qualitativa dei regimi di moto (Inzoli & Dassù, 2003a)

Invece valori di Re maggiori indicano la presenza di **moto turbolento**, nel quale le particelle di fluido si muovono in modo disordinato, non più parallelamente all'asse del tubo; i due campi sono separati da una zona di transizione.

L'abaco di Moody (Figura 7.3) riporta i campi descritti; noto il valore di Re e della scabrezza relativa ε/D , è possibile ricavare il valore del coefficiente di perdita di carico λ .

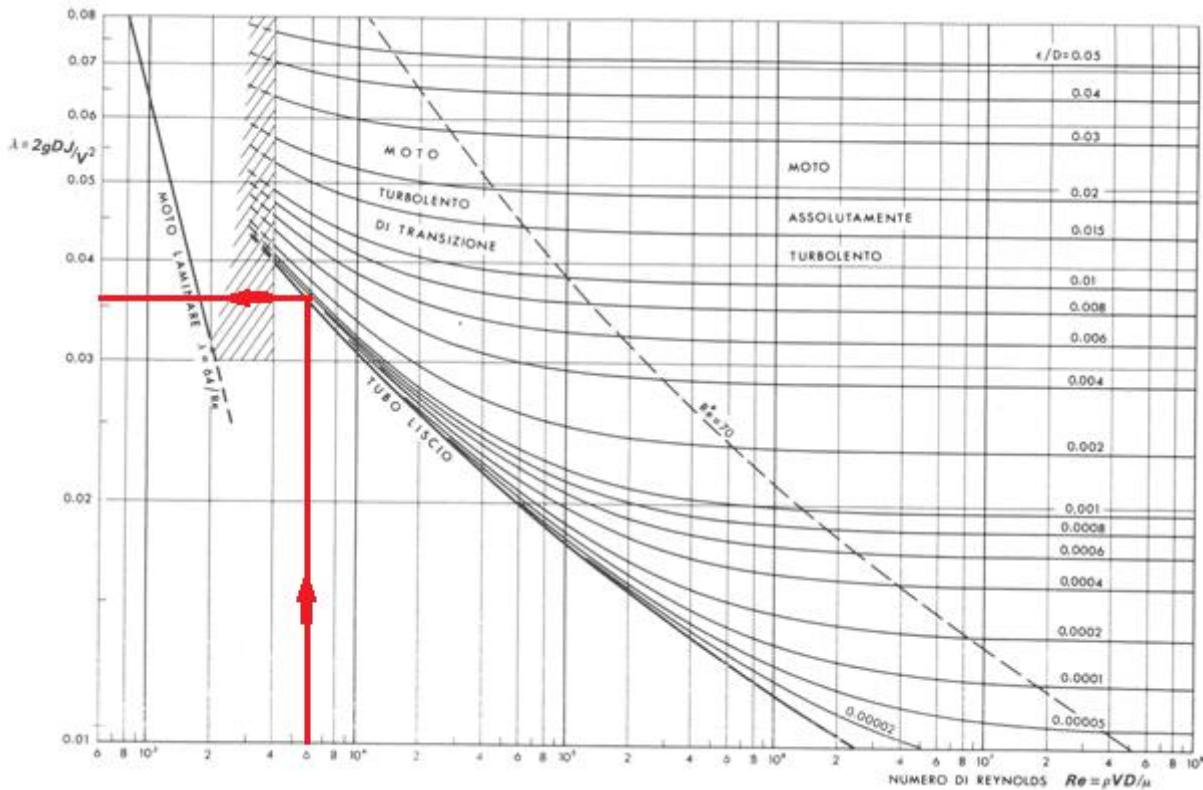


Figura 7.3 - Abaco di Moody (Citrini & Nosedà, 1987)

Il coefficiente λ permette, infatti, di ottenere il valore della cadente piezometrica J :

$$J = \lambda \frac{V^2}{2gD}$$

da cui il valore della perdita di carico distribuita:

$$\Delta H_{distr} = JL$$

Un'alternativa all'uso grafico dell'abaco di Moody, per il calcolo di λ , è l'utilizzo delle equazioni che ne descrivono le curve; in base al valore del numero di Re e della scabrezza relativa ε/D si ha:

- $\lambda = 64 \cdot Re^{-1}$ - Moto laminare ($Re < 2300$)
- $\lambda = 0,316Re^{-0,25}$ - Tubo liscio ($Re > 2300; \frac{\varepsilon}{D} < 0,00002$)
- $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,71 D} \right)$ - Moto turbolento ($Re > 2300; \frac{\varepsilon}{D} > 0,00002$)

Perdita di carico totale

La perdita di carico totale si ottiene sommando i contributi dovuti alle perdite concentrate e a quelle distribuite.

$$\Delta H_{tot} = \Delta H_{distr} + \Delta H_{conc}$$

Maggiore è la perdita di carico, tanto più sarà, a parità di portata, la potenza del sistema di pompaggio da installare.

Per impianti di riscaldamento e di estrazione del calore, sono indicati dei valori massimi consigliati di perdita di carico totale per metro di tubo dH_{amm} basati sull'esperienza costruttiva (Buratti).

$$dH_{amm} = 150 \frac{Pa}{m}$$

La perdita massima (in metri di colonna d'acqua) su un tratto di tubazione di lunghezza L è pari a:

$$\Delta H_{amm} = \frac{dH_{amm} \cdot L}{10000}$$

Il codice di calcolo richiede in ingresso la portata m_a espressa in $kg/(m^2 \cdot s)$; essa è legata alla velocità V dalla seguente relazione:

$$V = \frac{m_a}{\rho}$$

La portata in massa \dot{m} , espressa in kg/s , dipende dall'area A della sezione del tubo ed è pari a:

$$\dot{m} = m_a \cdot A$$

Ad esempio, una velocità pari a 5 mm/s in una sezione di area

$$A = 0.03^2 m^2 = 9 \cdot 10^{-4} m^2$$

Corrisponde a:

$$m_a = V \cdot \rho = 5 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$
$$\dot{m} = m_a \cdot A = 4,5 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

7.2.2 Aspetti termodinamici

Di seguito si riporta una descrizione dei processi termodinamici breve e limitata al caso in esame, cioè al movimento del fluido in un condotto. Inoltre non sarà analizzata la zona prossima all'ingresso del tubo, per cui potrà essere trascurata la descrizione dello strato limite termico e fluidodinamico, parlando direttamente di condizioni di moto pienamente sviluppato, come riportate in Figura 7.4.

La trasmissione del calore è fortemente accoppiata alle condizioni idrauliche che si instaurano nel tubo; infatti, il comportamento è diverso se il regime di moto è laminare oppure turbolento.

Sono definiti i seguenti numeri adimensionali:

Numero di Nusselt

$$Nu = \frac{h D}{k}$$

Indica il rapporto tra il flusso di calore scambiato per convezione e quello scambiato per conduzione in uno strato fluido. Nu è sempre maggiore di 1.

D è una grandezza caratteristica del condotto, in generale pari al diametro idraulico.

Numero di Prandtl

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{k}$$

Esprime il rapporto tra la diffusività cinematica e quella termica.

Il simbolo μ rappresenta la viscosità dinamica, per l'acqua pari a 10^{-3} kg/(m s).

Moto laminare

Sono adottate le seguenti ipotesi:

- 1) Si esclude la zona d'ingresso del tubo (indicata in Figura 7.4) nella quale non si hanno condizioni di moto pienamente sviluppato.
- 2) Il fluido ha proprietà costanti ed è incomprimibile.
- 3) Si ha moto laminare.
- 4) Il tubo è di sezione circolare.
- 5) Il flusso termico q_s'' sulla parete del tubo è costante lungo l'asse del tubo stesso.

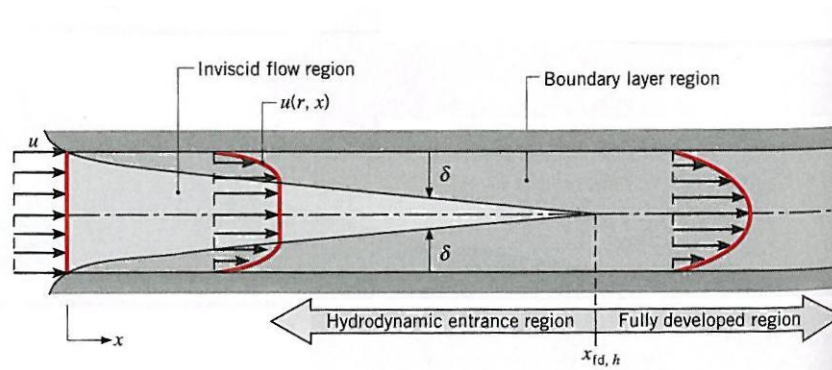


Figura 7.4 - Campi di velocità nella zona d'ingresso del tubo, fino a moto completamente sviluppato (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine)

Essendo il moto laminare, il fluido si muove in filetti paralleli alla parete, per cui è lecito supporre che in direzione ortogonale ad essa si abbia un trasferimento di calore per conduzione termica.

Partendo dall'equazione semplificata

$$q = \dot{m}c(T_{in} - T_{out})$$

È possibile dimostrare (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine) che la differenza tra la temperatura del fluido T_f e quella della parete T_s vale:

$$T_f - T_s = -\frac{11 q_s'' D}{48 k}$$

Si può ricavare, dalla legge di Newton, il valore del coefficiente di convezione h e da esso il numero di Nusselt:

$$h = \frac{48 k}{11 D}$$

$$Nu = \frac{h D}{k} = 4.36$$

Il numero di Nusselt è costante nel caso di moto laminare e per flusso termico q_s'' costante lungo l'asse.

In caso di sezione non circolare il valore di Nu cambia; per sezione quadrata, con moto laminare completamente sviluppato, si ha $Nu=3,61$.

Moto turbolento

Nel caso di moto turbolento l'analisi teorica è particolarmente difficile per cui si preferisce ricorrere a relazioni empiriche, basate esclusivamente su dati sperimentali.

Ad esempio può essere utilizzata la relazione di Dittus-Boelter (Inzoli & Dassù, 2003a):

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^n$$

con $n=0.4$ se $T_s < T_f$ e $n=0.3$ se $T_s > T_f$.

Confrontando i profili di temperatura, nel caso di $T_f > T_s$, (Figura 7.5) lungo una sezione di tubo si nota come nel caso di moto turbolento aumenti il gradiente termico in prossimità

della parete interna del tubo e di conseguenza il calore trasferito all'esterno per conduzione.

Ciò spiega come mai in regime di moto turbolento la quantità di calore scambiata con il terreno sia maggiore rispetto al moto laminare.

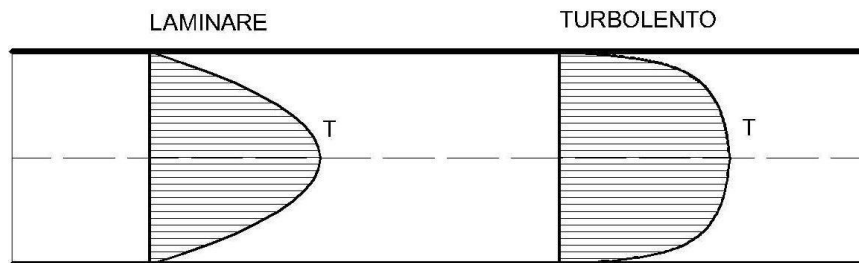


Figura 7.5 - Profilo di temperatura sulla sezione del tubo al variare del regime di moto

7.3 Condizioni al contorno e iniziali

7.3.1 Temperatura

Si è scelto di imporre una temperatura costante, pari a 15°C, sulla base del dominio e sulla faccia di terreno posteriore, più distante dal tubo. Questa ipotesi tende, date le esigue dimensioni della geometria, a sovrastimare le capacità estrattive del singolo pannello che nella realtà esercita la sua influenza fino a una distanza maggiore, determinando una riduzione del gradiente termico e quindi del calore scambiato.

Tuttavia non interessano in questo caso i valori assoluti del calore scambiato, ma quelli relativi per confrontare le diverse soluzioni per i 7 modelli.

La temperatura del fluido in ingresso nel circuito è governata dalla pompa di calore; per ipotesi si è scelto di studiare il caso estivo, fissando una temperatura costante di 30°C.

7.3.2 Velocità del fluido

Nei 7 modelli esaminati sono state fissate quattro diverse velocità del fluido, rispettivamente pari a 0.005, 0.01, 0.02 e 0.1 m/s (Tabella 14).

I tubi in polipropilene sono considerati "tecnicamente lisci", poiché presentano una scabrezza assoluta ϵ assai ridotta (inferiore a 0.02 mm), da cui deriva un rapporto $\epsilon/D=0.0008$.

V [m/s]	Re [-]	Moto	λ [-]	J [-]	Pr [-]	Nu [-]	h [W/m ² °C]
0.005	150	Laminare	0.427	1.8E-05		3.61	68.6
0.01	300	Laminare	0.213	3.6E-05	7.34	3.61	68.6
0.02	600	Laminare	0.107	7.2E-05		3.61	68.6
0.1	3000	Turbolento	0.049	8.4E-04		30.89	586.9

Tabella 14 - Parametri idraulici e termici al variare della velocità del fluido

Modello	3D_1	3D_2	3D_3	3D_4	3D_5	3D_6	3D_7
L [m]	3.67	6.32	6.27	3.2	4.57	7.05	4.01
n	2	6	6	2	10	8	4
ΔH_{amm} [mm]	55.1	94.8	94.1	48.0	68.6	105.8	60.2

Tabella 15 - Lunghezza della serpentina, numero di curve e perdita di carico ammissibile

Si riportano in Figura 7.6 le perdite di carico per i sette modelli analizzati, al variare della velocità. L'altezza totale della barra corrisponde alla perdita complessiva, divisa nei due colori per evidenziare i contributi relativi di perdite concentrate e distribuite.

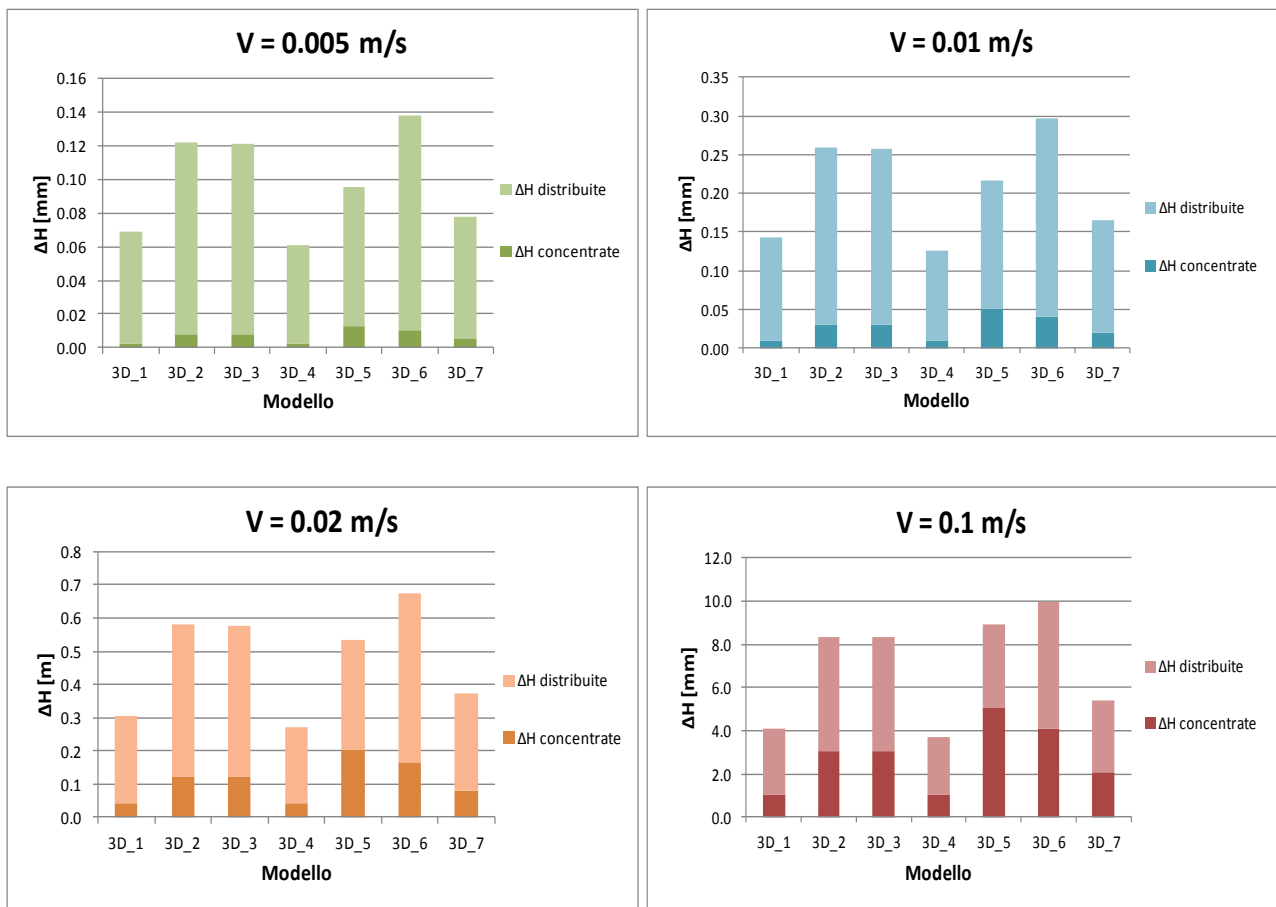


Figura 7.6 - Perdite di carico per i diversi modelli al variare della velocità

Il limite sulle perdite di carico ammissibili è rispettato in tutti i casi (cfr Tabella 15).

Le perdite di carico totali, nel caso di moto turbolento, sono maggiori di un ordine di grandezza rispetto al moto laminare.

Tuttavia il comportamento è diverso per le perdite concentrate e distribuite: le prime aumentano, poiché proporzionali a V^2 , mentre quelle distribuite diminuiscono perché dipendono da V^2 e λ , ma la diminuzione di quest'ultima prevale sull'aumento di V .

Le perdite concentrate sono massime nel modello 3D_5, poiché è quello con più curve, mentre quelle distribuite sono maggiori per i modelli 2, 3 e 6 perché sono quelli con la serpentina più lunga (Tabella 15).

7.4 Costruzione della mesh

Per la risoluzione numerica dei vari modelli di pannello si è deciso di utilizzare una mesh costituita da elementi finiti della classe **heat transfer** su tutto il dominio: tetraedrici del tipo DC3D4 su terreno e paratia, esaedrici di tipo DCC3D8 lungo la serpentina, che permettono di riprodurre il movimento del fluido nel tubo.

La costruzione geometrica della mesh prevede un infittimento della discretizzazione in funzione della dimensione del dominio e dei gradienti termici attesi.

Lungo il tubo sono stati utilizzati elementi di dimensione caratteristica pari a 3 cm, come la sezione della serpentina, mentre nella restante parte del dominio elementi finiti di grandezza variabile tra 5 e 25 cm.

Si riporta in Figura 7.7, a titolo d'esempio, la mesh utilizzata per la risoluzione del modello 3D_3.

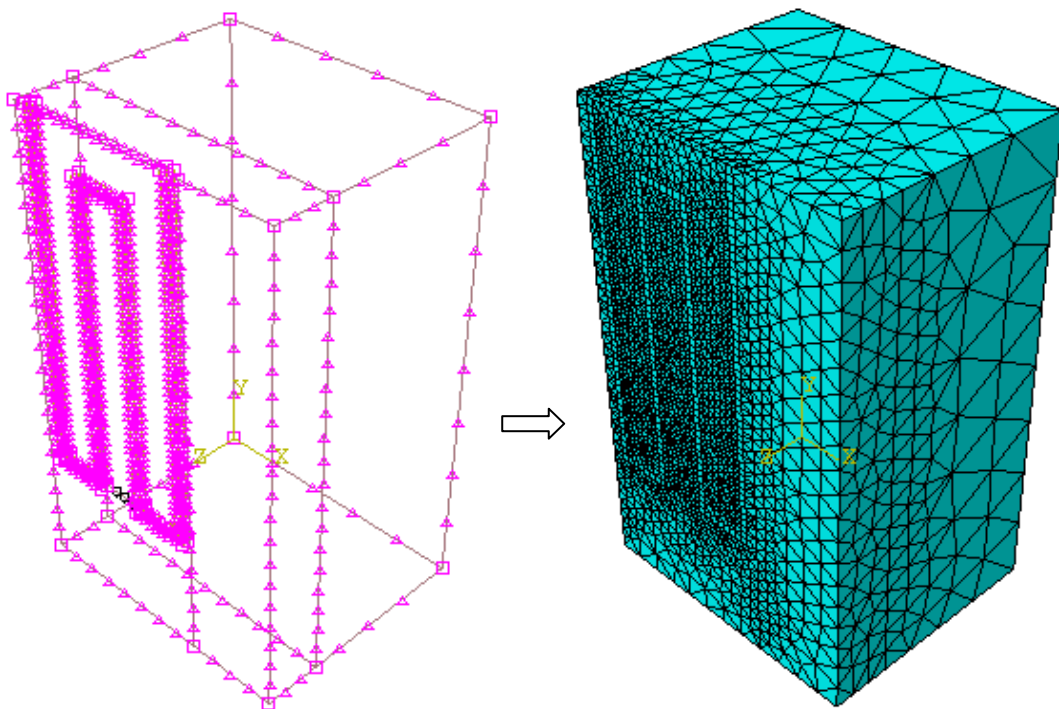


Figura 7.7 - Mesh del modello 3D_3

7.5 Analisi

L'analisi è svolta in condizione di **regime stazionario**, cioè quella nel quale è raggiunto l'equilibrio e il campo di temperatura non varia nel tempo; il tempo necessario per raggiungere tali condizioni non è noto priori, ed è cercato per tentativi.

In particolare si è visto che dopo 10^7 secondi (circa 4 mesi) il campo di temperatura ottenuto è identico a quello con tempo 10^8 secondi, da cui si deduce che la situazione di regime in 10^7 secondi è sicuramente raggiunta.

7.6 Risultati

7.6.1 Considerazioni sulla geometria delle serpentine

Si riportano di seguito i risultati in termini di temperatura del fluido in uscita dalla serpentina T_{out} e flusso di calore q , per i 7 casi esaminati al variare della velocità del fluido.

	Modello	L [m]	T in [°C]	V fluido [m/s]											
				0.005			0.01			0.02			0.1		
			T out [°C]	ΔT [°C]	q [W]	T out [°C]	ΔT [°C]	q [W]	T out [°C]	ΔT [°C]	q [W]	T out [°C]	ΔT [°C]	q [W]	
	3D_1	3.67	30	26.9	3.2	59.3	28.3	1.7	62.3	29.7	0.4	26.4	29.96	0.04	16.7
	3D_2	6.32	30	26.6	3.4	63.5	28.2	1.8	66.0	29.5	0.5	35.8	29.97	0.03	10.8
	3D_3	6.27	30	26.8	3.2	60.8	28.3	1.7	62.9	29.7	0.3	23.5	29.98	0.02	6.1
	3D_4	3.2	30	27.8	2.2	41.4	28.9	1.1	42.7	29.9	0.1	9.4	29.99	0.01	2.0
	3D_5	4.57	30	25.0	5.1	95.1	26.8	3.2	119.5	28.7	1.3	97.3	29.85	0.15	56.4
	3D_6	7.05	30	26.6	3.4	63.3	28.3	1.7	64.9	29.0	1.0	77.8	29.85	0.15	55.0
	3D_7	4.01	30	25.6	4.4	82.1	27.4	2.6	97.2	29.3	0.7	50.1	29.91	0.09	33.5

Tabella 16 - Temperatura di uscita e flusso di calore q per i 7 modelli

I risultati evidenziano come il modello 3D_5 rappresenti, a parità di velocità del fluido, la soluzione migliore dal punto di vista del flusso di calore estraibile; la distanza tra sezione di ingresso e uscita della serpentina e la particolare geometria della stessa nel pannello, permettono di sfruttare al meglio il gradiente termico fluido-terreno, con lunghezza della serpentina non eccessiva.

Il modello 3D_4 rappresenta, di fatto, la soluzione peggiore tra quelle esaminate; la vicinanza del tubo di risalita del fluido a quello di discesa fa sì che il fenomeno di conduzione termica tra i due tubi influenzi maggiormente la soluzione rispetto agli altri modelli esaminati.

Si riportano di seguito, in Figura 7.8, i contour plot raffiguranti il campo di temperatura dei modelli 3D_4 e 3D_5 nel caso di velocità del fluido $v=0,005$ m/s, al fine di

evidenziarne le differenze, in termini di forma del campo e differenza di temperatura in uscita del fluido.

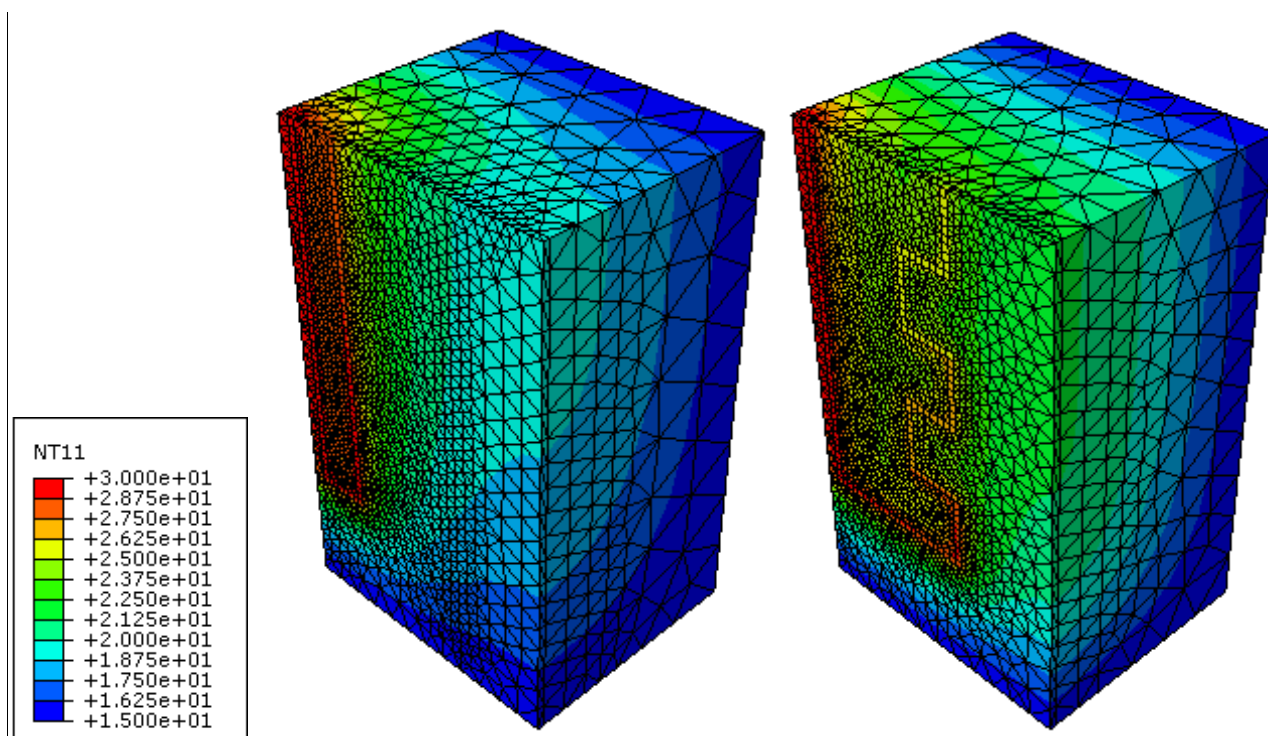


Figura 7.8 - Confronto campo di temperatura nei modelli 3D_4 e 3D_5

Si può quindi affermare che, se possibile, è meglio massimizzare la distanza tra l'ingresso e l'uscita del circuito; infatti, se questi sono molto vicini, il forte gradiente di temperatura tende ad annullare l'effetto di raffreddamento (estate) o riscaldamento (inverno) che il fluido ha subito nella restante parte del percorso.

Tuttavia in queste analisi non sono stati considerati alcuni aspetti prettamente costruttivi; per esempio, a seconda del tipo di tubo impiegato, vi sono dei limiti sulla curvatura che esso può subire senza danneggiarsi. Inoltre la semplicità della geometria permette una realizzazione più rapida in cantiere e riduce la possibilità di errori d'installazione.

Considerando questi aspetti, quindi, la soluzione 3D_5 può non essere in concreto realizzabile.

7.6.2 Relazioni tra flusso di calore, temperatura di uscita dalla serpentina e velocità del fluido

Come evidenziato nel grafico di Figura 7.9, non esiste una chiara correlazione tra la lunghezza della serpentina e il flusso termico q , a parità di dimensioni del dominio. L'efficienza dell'impianto quindi dipende dalla disposizione geometrica della serpentina e non dalla lunghezza della stessa.

Ovviamente dimensioni crescenti del pannello permettono un maggiore scambio di energia, come evidenziato confrontando l'ordine di grandezza dei risultati del pannello test con quelli dell'impianto di Tradate (capitolo 8).

Infatti, il modello 3D_5, che come detto è il migliore tra quelli esaminati, ha una lunghezza della serpentina inferiore a modelli meno efficienti (n° 2, 3, 6).

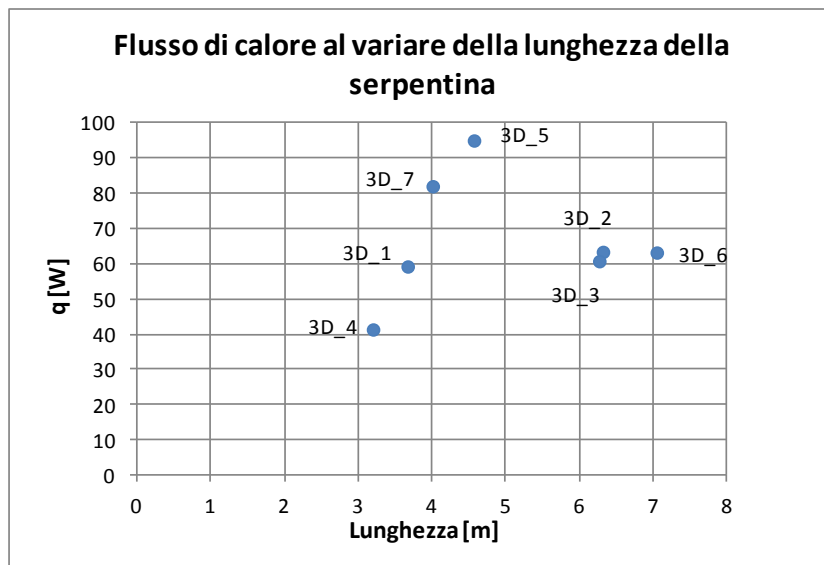


Figura 7.9 - Relazione tra lunghezza della serpentina e q scambiata nei 7 modelli analizzati, con $V=5\text{mm/s}$.

Analizzando ora, per tutti i modelli esaminati, il flusso di calore q in funzione della velocità del fluido, si evidenzia come proprio quest'ultima giochi un ruolo fondamentale nel rendimento dell'impianto.

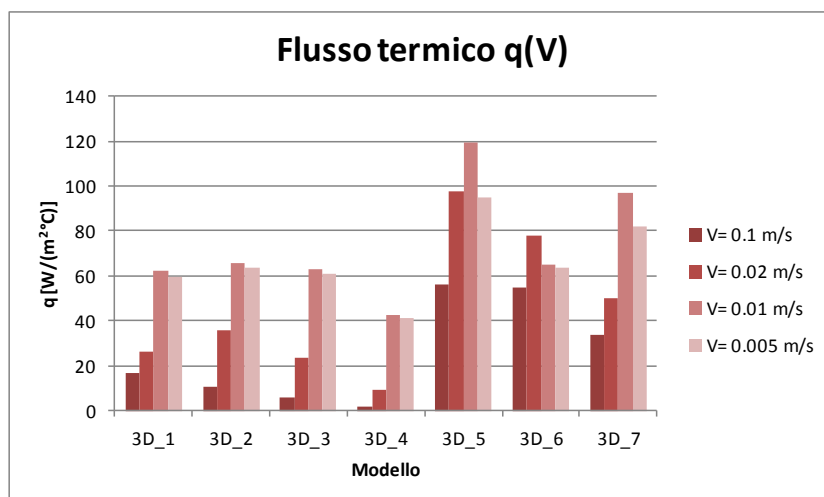


Figura 7.10 - Risultati $q(V)$ per i 7 modelli

I risultati di Figura 7.10 evidenziano come l'andamento di q (V) non sia monotono, ma presenti un picco, visibile in modo migliore nella figura di destra relativa al solo modello 3D_7.

Esaminando l'espressione

$$q = \dot{m}c(T_{in} - T_{out})$$

a parità di sezione del tubo, una maggiore velocità di circolazione del fluido comporta una maggior portata in massa ma al contempo una diminuzione del ΔT , poiché diminuisce il tempo di permanenza del fluido nella serpentina. È spiegata quindi la presenza del punto di massimo.

Dai grafici di Figura 7.11 si osserva come la temperatura in uscita sia una funzione monotona crescente con la velocità del fluido. Infatti, come è intuitivo osservare, meno tempo il fluido resta nel circuito minore sarà la variazione dei temperatura tra ingresso e uscita.

Di conseguenza la differenza di temperatura ΔT tende a ridursi all'aumentare di V.

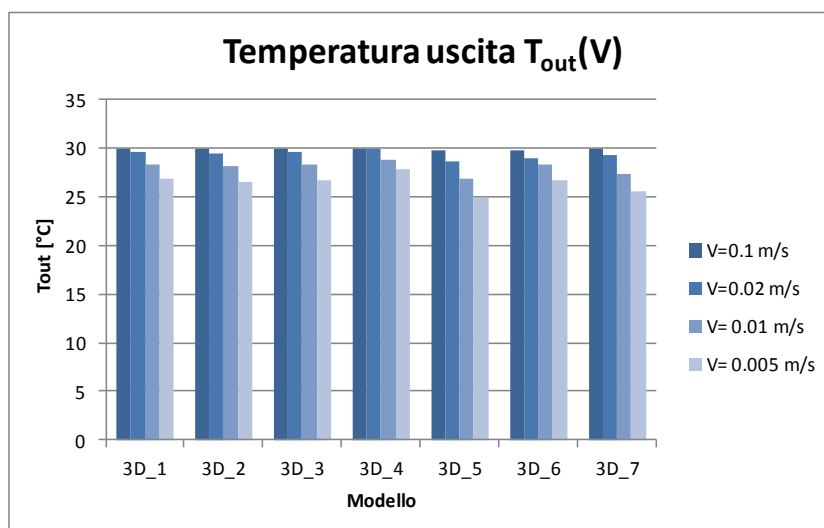


Figura 7.11 - Risultati $T_{out}(V)$ per i 7 modelli

In fase di progettazione e realizzazione di un impianto geotermico a bassa entalpia è quindi necessario tenere conto di come le variabili ΔT e \dot{m} interagiscono tra loro.

7.6.3 Andamento della temperatura lungo l'asse della serpentina

Dato il problema in analisi e data l'equazione:

$$q = \dot{m}c(T_{in} - T_{out})$$

si può dimostrare che per un fluido in movimento in un tubo, sulla cui parete si ha un flusso di calore costante lungo l'asse, l'andamento della temperatura del fluido lungo l'asse è lineare (Incropera, De Witt, Bergman, & Lavine).

Tale considerazione è basata sull'ipotesi che, nel tratto di tubo in esame, siano presenti condizioni di moto completamente sviluppato, come definite nel sottocapitolo 7.2.2.

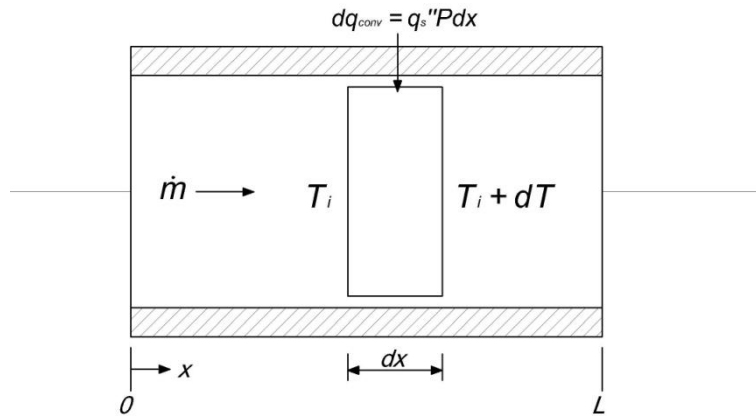


Figura 7.12 - Volume di controllo per lo studio del flusso interno in un tubo

Esaminando il volume di controllo riportato in Figura 7.12, è possibile scrivere la seguente espressione:

$$dq = \dot{m}c((T_i + dT) - T_i)$$

Da cui:

$$dq = \dot{m}c dT$$

Se si esprime il termine dq [W] in funzione del flusso per unità di superficie q_s'' [W/m²], si ottiene:

$$q_s'' P dx = \dot{m}c dT$$

dove il termine P rappresenta il perimetro del tubo, pari in questo caso a 0,12 m.

Riscrivendo l'espressione precedente, si ottiene l'equazione differenziale che descrive l'andamento della temperatura lungo l'asse del tubo.

$$dT = \frac{q_s'' P}{\dot{m}c} dx$$

L'equazione differenziale, integrata da 0 a x , fornisce:

$$T(x) = T_i + \frac{q_s'' P}{\dot{m}c} x$$

dove T_i è la temperatura nel punto di ingresso del fluido.

Nei sette casi studiati tale andamento è sempre rispettato; si riportano a titolo d'esempio, per il modello 3D_1, i calcoli svolti e i risultati del modello numerico ottenuti, con velocità pari a 0,01 m/s (corrispondente a $\dot{m} = 9 \cdot 10^{-3}$ kg/s).

È stato esaminato il primo tratto di serpentina, di lunghezza pari a 1,4 m.

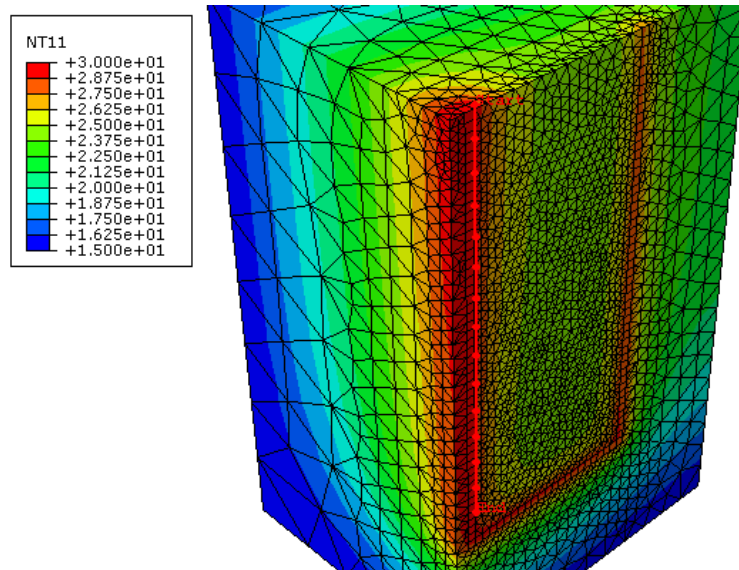


Figura 7.13 - Path verticale per il calcolo di q_s'' .

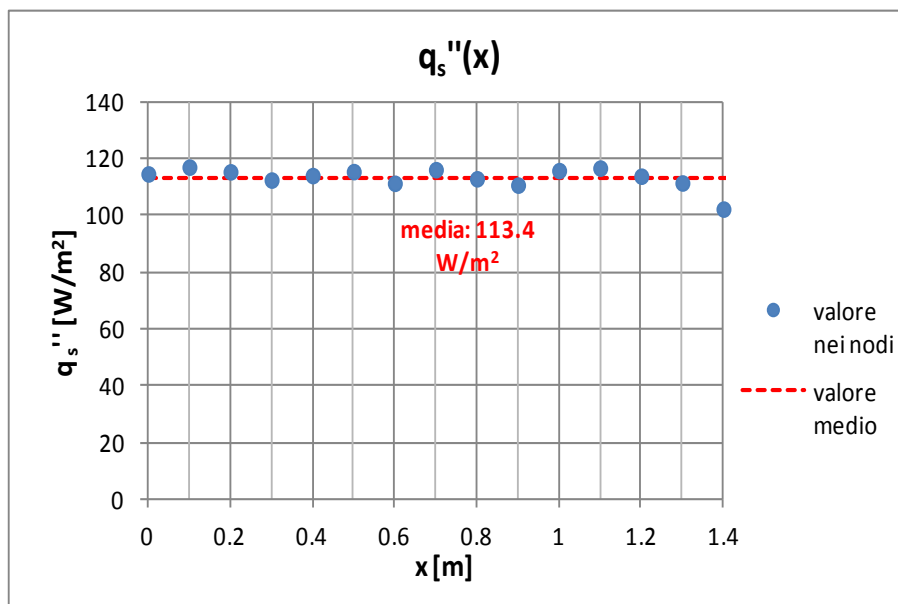


Figura 7.14 - Risultato numerico dell'andamento di q_s'' lungo la parete del tubo.

L'andamento della temperatura del fluido lungo l'asse del tratto di serpentina considerato è:

$$T(x) = T_i + \frac{q_s'' P}{\dot{m} c} L_z = 30^\circ\text{C} - \frac{113.4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0.12 \text{ m}}{9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} \cdot x = 30 - 0.361 x$$

L'equazione è quasi uguale, con una differenza trascurabile, a quella riportata nel grafico di Figura 7.15 che rappresenta l'interpolante dei risultati numerici.

Pr $x=1,4$ m la formula restituisce una temperatura di 29.49°C , in accordo con i risultati numerici ottenuti.

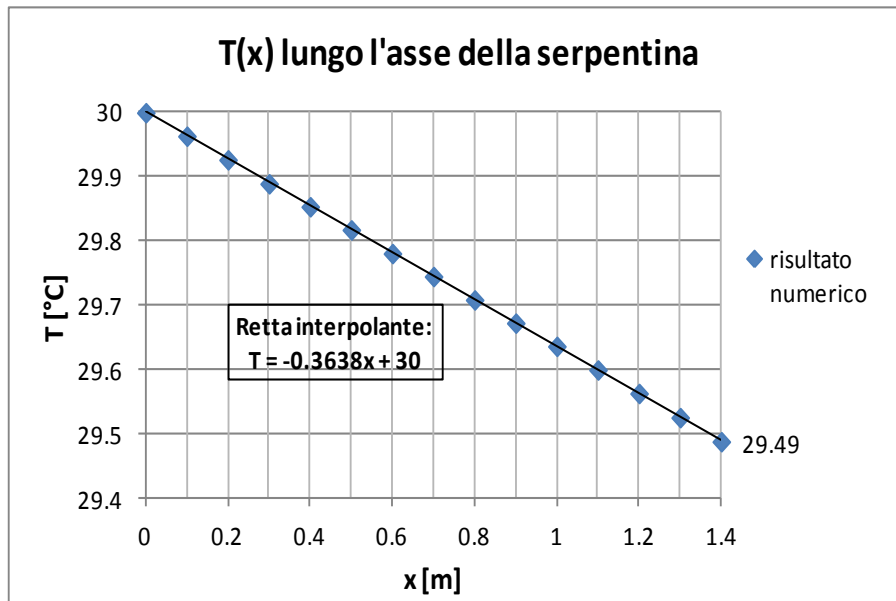


Figura 7.15 - Risultato numerico di $T(x)$ lungo l'asse della serpentina.

7.7 Conclusioni

Nello studio del pannello test si possono trarre le seguenti conclusioni:

- L'efficienza della serpentina non dipende dalla lunghezza della stessa, ma dalla geometria con la quale è disposta nella paratia.
 Non esiste una regola fissa e univoca per tutti i casi, tuttavia è possibile individuare nella distanza tra i tubi d'ingresso e uscita un parametro d'influenza; occorre dunque evitare di mettere i tubi d'ingresso e d'uscita molto vicini tra loro, poiché l'elevato gradiente di temperatura tende a vanificare l'effetto di raffreddamento (estate) o riscaldamento (inverno) che il fluido ha subito nel resto del percorso.
 Non sono stati qui considerati, però, altri aspetti di natura prettamente costruttiva (ad esempio qual è la massima curvatura cui è possibile sottoporre i tubi) che vincolano la scelta della geometria.
- Il flusso di calore scambiato è legato alla portata in massa \dot{m} e alla differenza di temperatura tra ingresso e uscita ΔT , che dipende dalla velocità di movimento del fluido V . Aumentando \dot{m} si riduce ΔT ; **nei casi esaminati** esiste un punto nel quale q è massimo.

- Il coefficiente convettivo h cresce considerevolmente nel passaggio da moto laminare a turbolento (vedi
- Tabella 14), segno che la turbolenza aumenta la quantità di calore scambiato, poiché aumenta il gradiente termico in prossimità della parete (Figura 7.5).
- Nei casi esaminati, l'andamento della temperatura lungo l'asse della paratia è lineare, poiché è costante il flusso di calore sulle pareti del tubo.

8 IMPIANTO DI TRADATE

Si procede ora allo studio dell'impianto di estrazione del calore realizzato nell'edificio di Tradate, descritto nel capitolo 5. Lo studio è limitato al solo circuito primario, come definito nel capitolo 6, cioè non si andranno ad analizzare la pompa di calore e il circuito secondario disposto all'interno dell'edificio.

Questo rende necessarie alcune ipotesi sulle condizioni al contorno, di seguito descritte, che potrebbero essere omesse nel caso in cui si possa studiare anche l'interazione tra i tre circuiti.

Le analisi di seguito svolte, descritte dettagliatamente nel capitolo 8.3, mirano a raggiungere i seguenti obiettivi:

- Riprodurre il funzionamento dell'impianto in tre condizioni:

- 1) Funzionamento MEDIO ANNUO.
- 2) Analisi ESTATE.
- 3) Analisi INVERNO.

Le analisi 2 e 3, descritte in seguito, mirano a riprodurre il funzionamento dell'impianto in una stagione in cui è sottoposto a un carico più gravoso rispetto alle condizioni medie.

- Per le analisi 2 e 3, cercare quale deve essere la velocità ottimale del fluido nel circuito per avere la massima efficienza dell'impianto.
- Studiare la variazione nel campo di temperatura nel terreno indotta dall'impianto rispetto alla situazione descritta nel capitolo 5.

8.1 Geometria

La serpentina nella quale scorre il fluido è disposta all'interno della paratia riportata in Figura 8.1.

La paratia ha la funzione di sostegno dello scavo ed è stata realizzata attraverso la tecnica dei diaframmi affiancati. In cantiere si procede allo scavo di un diaframma di spessore 50 cm, profondità 15 m e larghezza 2,4 m, che è riempito di fango bentonitico necessario per sostenerne le pareti nella fase iniziale.

In seguito, s'immerge la gabbia di armatura prefabbricata, alla quale sono fissati i tubi della serpentina e si procede al getto del calcestruzzo partendo dalla base dello scavo.

Quest'operazione porta alla graduale fuoriuscita del fango bentonitico, che è raccolto per un successivo riutilizzo. Come evidenziato nel capitolo 6, il tubo dell'impianto deve essere mantenuto in pressione per evitarne lo schiacciamento a causa della pressione esterna del calcestruzzo non ancora solidificato.

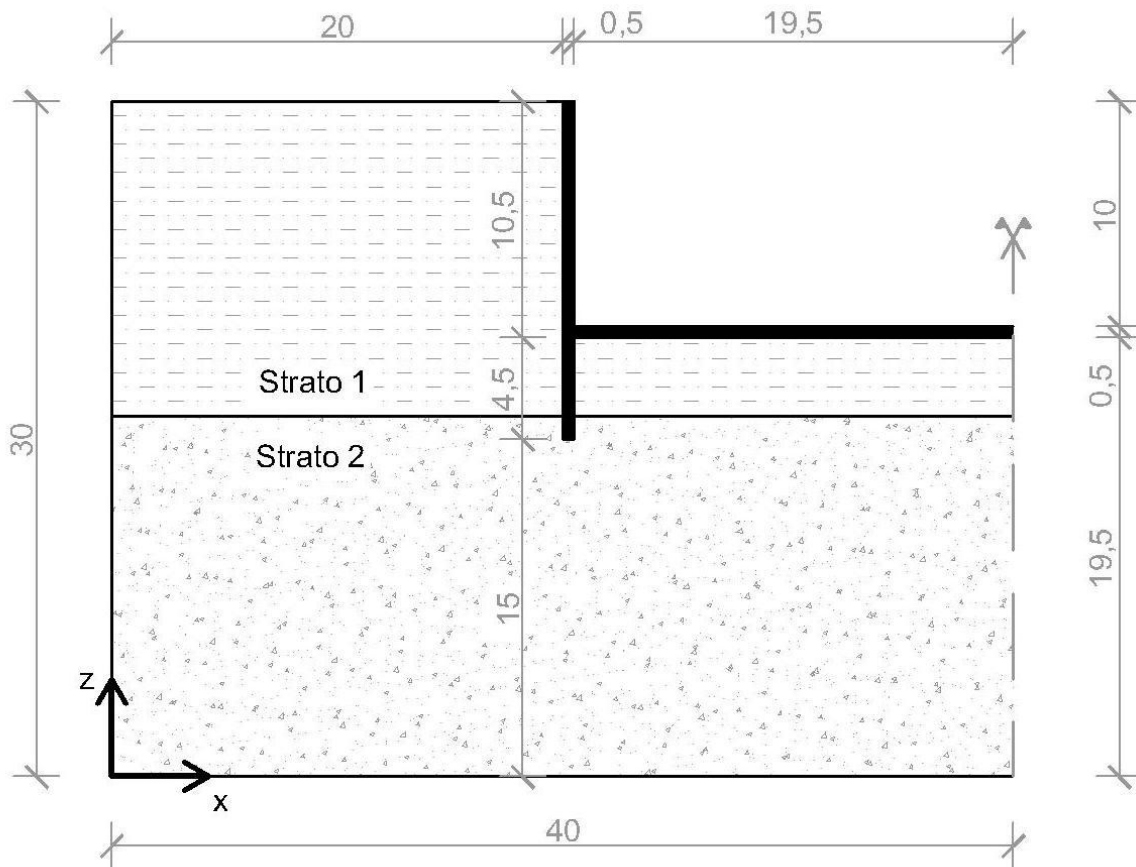


Figura 8.1 - Geometria della sezione studiata dell'edificio di Tradate

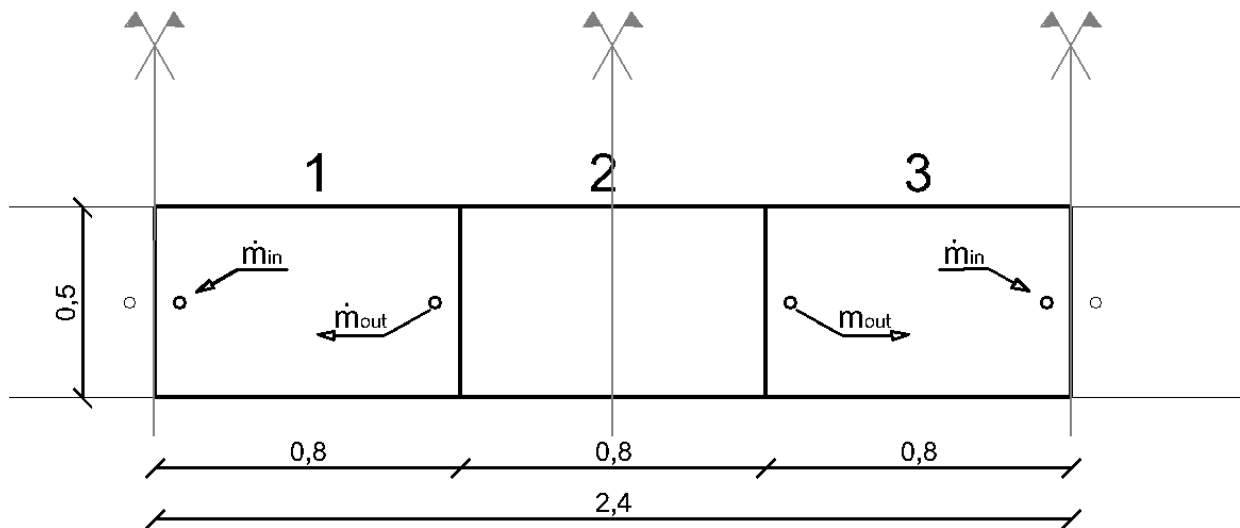


Figura 8.2 - Sezione orizzontale di un pannello

La paratia è costituita da una serie di pannelli affiancati, realizzati in successione, di larghezza pari a 2,4 m ciascuno.

Il singolo pannello (Figura 8.2) può essere concettualmente suddiviso in tre parti. Le zone 1 e 3 sono quelle nelle quali la serpentina è presente, mentre la zona centrale è mantenuta libera per consentire le operazioni di getto del calcestruzzo.

Infatti, per evitare la segregazione delle diverse granulometrie, il calcestruzzo deve essere gettato a partire dal fondo dello scavo attraverso un tubo che è calato nella zona centrale e la presenza dell'impianto può costituire intralcio o si possono verificare danni alla serpentina.

La disposizione delle serpentine all'interno del pannello è stata ipotizzata, per semplicità, con forma a U, di lunghezza $L=30$ m, riportata in Figura 8.3.

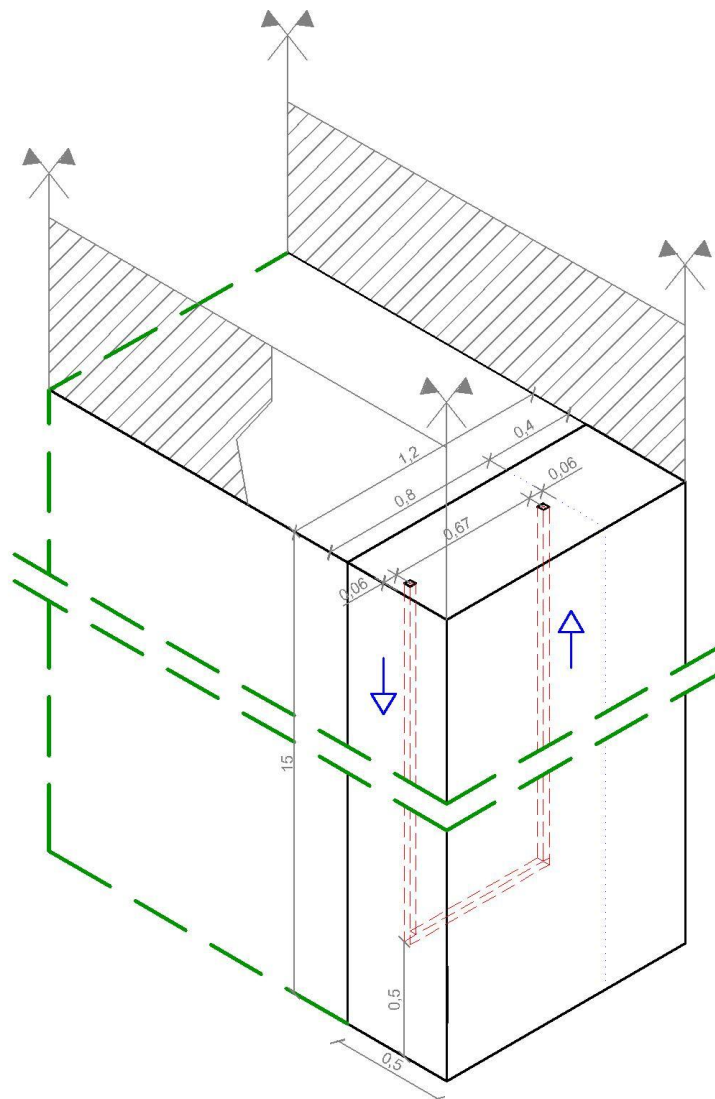


Figura 8.3 - Assonometria della paratia, con indicati i piani di simmetria del problema

Questa geometria presenta i seguenti vantaggi:

- 1) È semplice da modellizzare a elementi finiti rispetto a geometrie più articolate, che richiederebbero una mesh molto più complessa.

- 2) Massimizza la distanza tra l'ingresso e l'uscita, che è uno dei requisiti, analizzati nel capitolo 7.6.1, che consente di migliorare l'efficienza dell'impianto.

La serpentina non raggiunge il punto più basso della paratia, ma è mantenuta a 0,5 m dal fondo dello scavo; questo accorgimento evita problemi dovuti a piccole imprecisioni nella realizzazione della parte inferiore della paratia.

Un'ulteriore ipotesi consiste nel considerare assi di simmetria quelli indicati nella Figura 8.2; questo significa ipotizzare che:

- Il pannello sia perfettamente simmetrico e quindi se ne possa studiare solo metà.
- I pannelli accanto a quello considerato siano identici ad esso.

Questa disposizione presenta il vantaggio che i tubi d'ingresso di due pannelli limitrofi sono vicini tra loro e distanti dai rispettivi tubi in uscita, evitando i problemi di riduzione dell'efficienza descritti nel capitolo 7.6.1.

Si vengono così a creare, lungo la parete dell'edificio, zone alternate a diversa temperatura, come analizzato di seguito.

Il modello numerico è quindi di forma tridimensionale e riproduce la stessa geometria adottata nel modello bidimensionale studiato nel capitolo 5, descrivendo nella terza dimensione una metà del pannello.

8.2 Materiali

I materiali utilizzati nel modello hanno le stesse proprietà descritte nel capitolo 5.2 (riassunte nella Tabella 17); in particolare il terreno, per tutte le analisi seguenti, è ipotizzato completamente saturo.

Le proprietà del fluido termovettore che circola nell'impianto sono assimilabili all'acqua, trascurando l'influenza di additivi speciali antigelo.

	Terreno	C.A.	Fluido
ρ [kg/m ³]	1930	2500	1000
K [W/(m °C)]	2.2	2.6	0.57
c [J/(kg °C)]	1642	880	4186

Tabella 17 – Parametri materiali modello 3D

Nell'analisi è trascurata la presenza della parete del tubo, costituita da materiale polimerico, avente spessore di circa 2,5 mm.

8.3 Condizioni al contorno e iniziali

Vi sono condizioni iniziali e al contorno che variano in funzione delle tre analisi svolte, denominate "Funzionamento MEDIO ANNUO", "Analisi ESTATE" e "Analisi INVERNO".

Le condizioni che non dipendono dall'analisi svolta, di seguito descritte, sono le stesse adottate nel modello bidimensionale, così da poter confrontare alcuni risultati.

- Superficie interna dell'edificio: temperatura costante, pari a 18°C, per tutto l'anno.
- Base del dominio: temperatura costante di 15°C.
- Piani di simmetria: flusso di calore nullo in direzione ortogonale al piano stesso.
- Superficie esterna (piano campagna): andamento della temperatura stagionale come descritto nel capitolo 5.3.

Imponendo queste condizioni si è quindi calcolato il campo di temperatura intorno all'edificio a **impianto spento** (cioè ammettendo la presenza del fluido nel tubo ma senza che vi sia circolazione).

Svolgendo l'analisi per 6 anni, il campo di temperatura (a parte il fatto di essere 3D), è identico la soluzione ottenuta attraverso il modello bidimensionale, essendo del tutto trascurabile l'effetto della presenza dei tubi.

Il campo di temperatura così ottenuto riproduce le condizioni che, a regime, s'instaurano attorno all'edificio; esso è stato adottato come condizione iniziale per le tre analisi di seguito descritte, per evitare che lo scambio termico con la serpentina sia influenzato da condizioni iniziali arbitrarie e poco realistiche.

Questo accorgimento consente di ridurre della durata delle analisi con impianto in funzione, più onerose dal punto di vista computazionale, che non devono essere prolungate per più anni al fine di ottenere una distribuzione di temperatura a regime nel terreno.

8.3.1 Funzionamento MEDIO ANNUO

Nelle analisi con **impianto in funzione**, la condizione di flusso nel tubo è riprodotta adottando le seguenti ipotesi:

- Velocità costante lungo l'asse della tubazione.
- Distribuzione uniforme della velocità e della temperatura nella sezione del tubo.
- Sono trascurati gli effetti di turbolenza e disturbo del moto in prossimità delle curve.

Queste ipotesi sono necessarie poiché la scala di studio del problema è molto maggiore delle dimensioni del tubo che, come descritto nel successivo capitolo 8.4, è discretizzato con un solo elemento finito per tutta la sezione trasversale.

La condizione al contorno imposta in questo caso è la **temperatura in ingresso** nel circuito. Questo parametro è stato qui semplificato, in assenza di dati di sito, ipotizzando l'andamento in Figura 8.4:

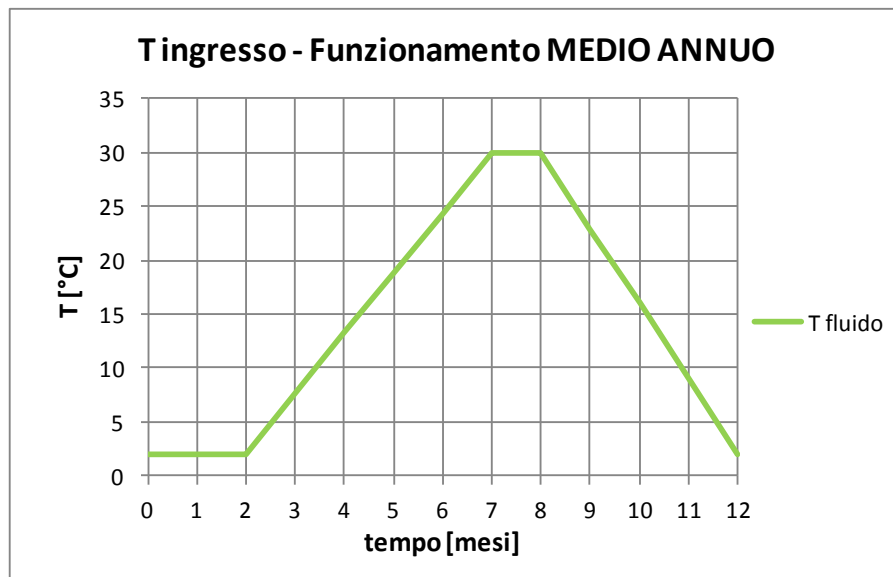


Figura 8.4 – Andamento temperatura in ingresso, funzionamento MEDIO ANNUO

La temperatura minima è stata mantenuta a $+2^{\circ}\text{C}$, superiore a 0°C , per evitare il problema della formazione di lenti di ghiaccio, come indicato da Brandl.

La temperatura massima è stata imposta pari a 30°C , valore maggiore rispetto alla temperatura interna dell'edificio e a quella dell'ambiente esterno.

In realtà la temperatura in ingresso dipende dall'interazione tra i tre circuiti presenti: circuito primario nella paratia, ciclo frigorifero nella pompa di calore e circuito secondario di distribuzione nell'edificio.

Ogni circuito, in funzione della portata in esso circolante, delle condizioni al contorno cui è sottoposto, delle caratteristiche del proprio fluido termovettore, della geometria del circuito stesso e degli scambiatori di calore, influenza gli altri circuiti e ne è influenzato.

Questo significa che, per uno studio rigoroso, si dovrebbero avere molti più dati in ingresso e studiare il sistema nel suo complesso. Come già detto, questi argomenti esulano dagli obiettivi di questo elaborato.

La **velocità** di scorrimento del fluido termovettore è stata fatta variare tra 5 mm/s e 1 m/s .

8.3.2 Analisi INVERNO

L'analisi mira a riprodurre il funzionamento dell'impianto in una stagione invernale particolarmente rigida; per fare ciò si è deciso di estendere al mese di marzo la condizione $T_{in}=2^{\circ}\text{C}$, anziché seguire l'andamento medio della temperatura (tratteggiato).

L'andamento della temperatura all'ingresso del tubo è quindi riprodotto in Figura 8.5:

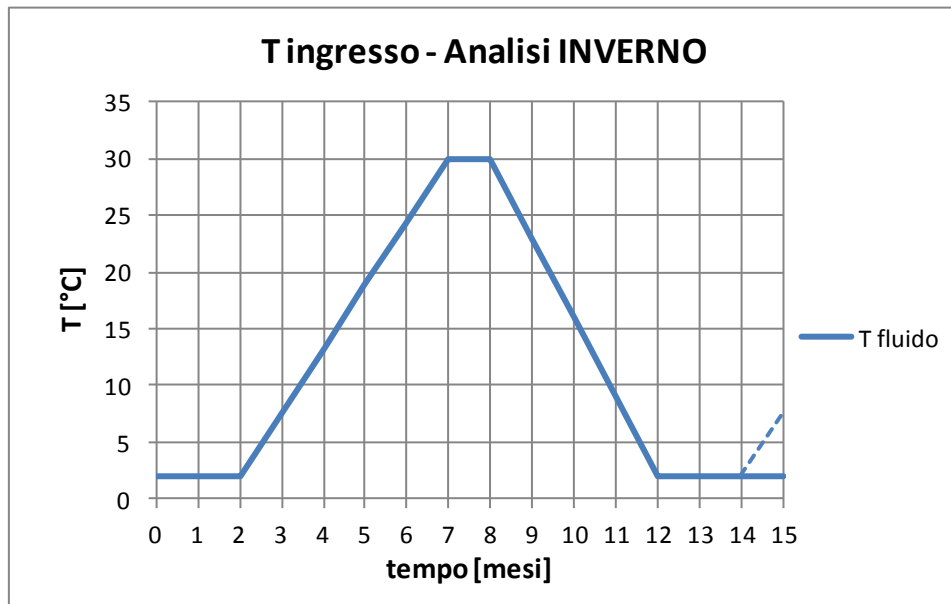


Figura 8.5 - Andamento temperatura in ingresso, analisi INVERNO

Il diagramma può essere diviso in 2 parti:

- Primi 12 mesi
- 3 mesi di test invernale

I primi 12 mesi di analisi sono esattamente identici alle condizioni di funzionamento medio annuo e sono necessari per creare condizioni iniziali di temperatura al 12° mese con l'impianto in funzione.

Infatti, il campo di temperatura a regime a impianto spento (condizione posta a $t=0$ nel grafico) subisce un cambiamento dovuto all'accensione dello stesso.

I 3 mesi invernali successivi (gennaio-marzo, dal mese n°12 al n°15) corrispondono alla sollecitazione test dell'impianto in condizioni più gravose rispetto alla media, con la differenza visibile nel mese di marzo.

8.3.3 Analisi ESTATE

L'analisi estiva è analoga a quella invernale, con la differenza che in questo caso si è estesa la temperatura massima in ingresso ($T_{in}=30^{\circ}\text{C}$, presente solo in agosto) anche ai mesi di giugno e luglio (Figura 8.6).

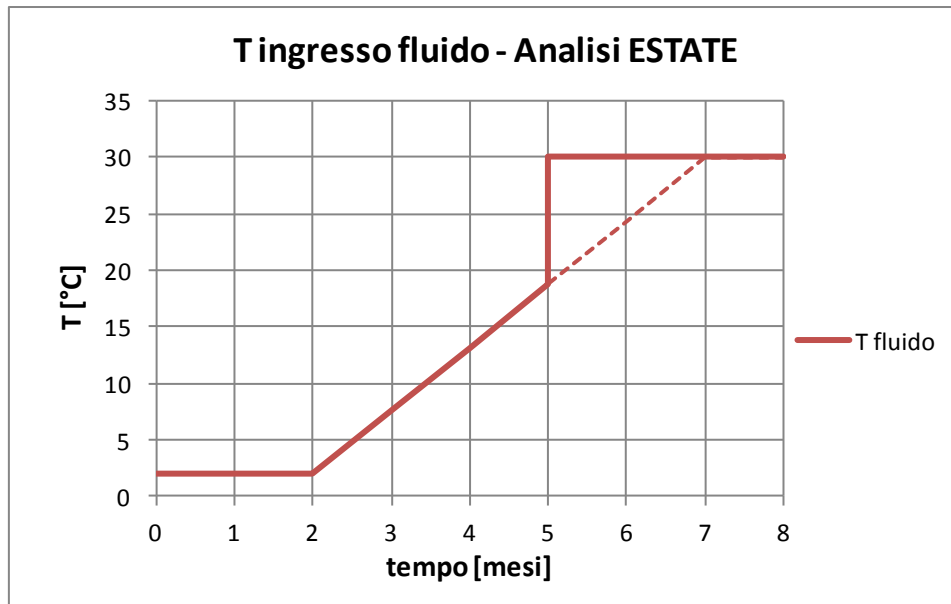


Figura 8.6 - Andamento temperatura in ingresso, analisi ESTATE

In questo caso i primi 5 mesi sono esattamente identici a quelli del funzionamento MEDIO ANNUO, e i 3 mesi di test sono quelli estivi (giugno-agosto, dal mese n°5 al n°8) nei quali si nota l'aumento della temperatura rispetto alla situazione media.

Operativamente

Esaminando per esempio il caso invernale, non è stata svolta un'analisi di durata 15 mesi, ma sono stati analizzati i 3 mesi dal 12 al 15 imponendo come condizioni iniziali quelle del 12° mese ottenute dall'analisi funzionamento MEDIO ANNUO. Infatti i due metodi, per come sono state definite le analisi, sono perfettamente identici.

Questo permette di ridurre di molto il tempo di calcolo, poiché è sufficiente una sola analisi "Funzionamento MEDIO ANNUO" per avere le condizioni d'inizio stagione per entrambe le analisi successive (ESTATE e INVERNO).

8.4 Costruzione della mesh

La costruzione della mesh nel modello tridimensionale ha dovuto tenere in considerazione il fatto che il dominio presenta dimensioni molto grandi, dell'ordine delle decine di metri, rispetto all'elemento scambiatore; infatti, il tubo è schematizzato con una sezione quadrata (per semplicità) di 3 cm di lato.

Questo implica la necessità di un infittimento della mesh in corrispondenza della paratia, che però non sia eccessivo per limitare la durata delle analisi.

La ricerca del compromesso, che garantisse una soluzione accurata (con errore accettabile ingegneristicamente, inferiore al 5%) e una durata non eccessiva dell'analisi, ha portato per tentativi alla mesh rappresentata in Figura 8.7.

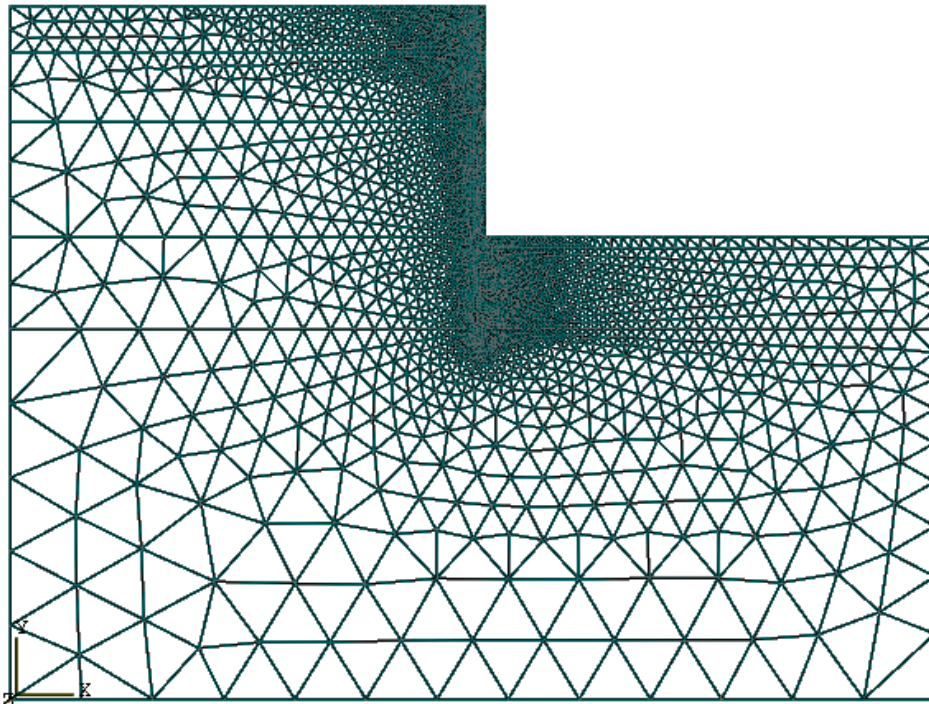


Figura 8.7 - vista nel piano xy della mesh

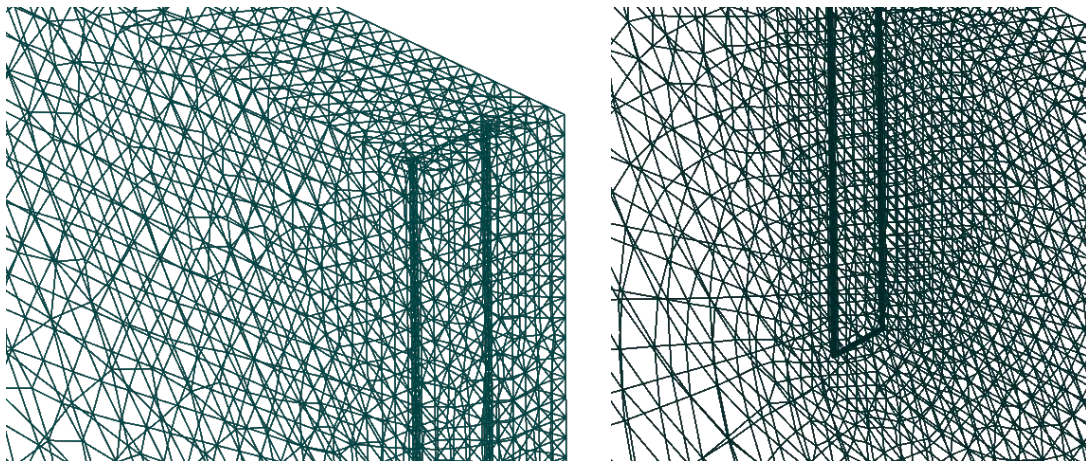


Figura 8.8 - Dettagli della mesh tridimensionale in corrispondenza della serpentina

Le dimensioni della mesh, eccetto che nell'area limitrofa alla paratia, sono le stesse utilizzate nel modello 2D e descritte nel capitolo 5.5.

La mesh risultante è composta da 23352 nodi e 119333 elementi finiti.

Tipologia di elementi finiti

Nella mesh sono presenti due zone con elementi finiti diversi:

- Il tubo.
- La parte restante del dominio, costituita dalla paratia e dal terreno.

Il tubo, che come detto s'ipotizza di sezione quadrata (trascurando lo spessore del tubo in materiale polimerico), è discretizzato con elementi finiti esaedrici del tipo DCC3D8, con

sezione pari a quella del tubo e lunghezza di circa 10 cm. La paratia e il terreno invece sono costituiti da elementi finiti tetraedrici del tipo DC3D4.

Per i dettagli sugli elementi finiti usati si faccia riferimento al capitolo 2.2.1.

8.5 Risultati

8.5.1 Parametri idraulici e termici

Basandosi sulle considerazioni fatte nel capitolo 7.2.1, si riportano di seguito i risultati in termini di perdite di carico e coefficiente di scambio convettivo, al variare della velocità di scorrimento del fluido termovettore.

Tabella riassuntiva											
V [m/s]	Re [-]	λ [-]	J [m/m]	L [m]	n	ΔH [m] distribuite	ΔH [m] concentrate	ΔH totale [m]	Pr [-]	Nu [-]	h [W/m ² °C]
0.005	150	0.4267	1.81E-05	30	2	5.44E-04	1.3E-06	0.0005	7.34	3.61	68.6
0.01	300	0.2133	3.62E-05			1.09E-03	5.1E-06	0.0011		3.61	68.6
0.02	600	0.1067	7.25E-05			2.17E-03	2.0E-05	0.0022		3.61	68.6
0.03	900	0.0711	1.09E-04			3.26E-03	4.6E-05	0.0033		3.61	68.6
0.05	1500	0.0427	1.81E-04			5.44E-03	1.3E-04	0.0056		3.61	68.6
0.10	3000	0.0427	7.25E-04			2.18E-02	5.1E-04	0.0223		30.89	586.9
0.15	4500	0.0386	1.47E-03			4.42E-02	1.1E-03	0.0454		42.72	811.7
0.20	6000	0.0359	2.44E-03			7.32E-02	2.0E-03	0.0752		53.78	1021.8
0.40	12000	0.0302	8.21E-03			2.46E-01	8.2E-03	0.2544		93.64	1779.1
0.60	18000	0.0273	1.67E-02			5.01E-01	1.8E-02	0.5189		129.51	2460.8
0.80	24000	0.0254	2.76E-02			8.28E-01	3.3E-02	0.8608		163.03	3097.6
1.00	30000	0.0240	4.08E-02			1.22E+00	5.1E-02	1.2748		194.89	3703.0

Tabella 18 – Tabella riassuntiva dei parametri idraulici e termici

Per quanto riguarda gli aspetti idraulici, l'analisi dei risultati evidenzia come all'aumentare della velocità del fluido, e quindi del numero di Reynolds, il valore di λ decresce, in accordo con gli andamenti di Figura 7.3; tuttavia, sia il valore delle perdite distribuite sia quello delle perdite concentrate aumentano, essendo proporzionali al quadrato della velocità.

Il valore consigliato ammissibile (vedi sottocapitolo 7.2.1) $\Delta H_{amm} = 0,45 \text{ m}$ è superato per V superiori a 0,4 m/s.

In fase di progettazione dell'impianto bisognerà quindi tener conto delle limitazioni sulla velocità del fluido termovettore, al fine di ridurre le perdite di carico idraulico e quindi la

potenza dell'impianto di pompaggio, cercando tuttavia di massimizzare il calore scambiato tra fluido e terreno.

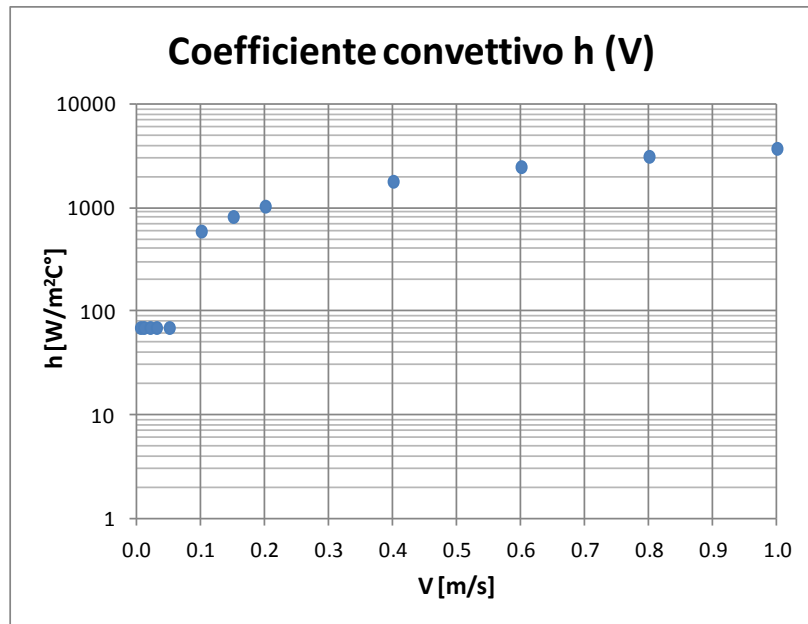


Figura 8.9 – Andamento del coefficiente convettivo h al variare della velocità del fluido

Esaminando il coefficiente di convezione h è evidente l'aumento che si ha passando dal moto laminare a quello turbolento. Da questa considerazione si deduce come lo scambio termico terreno-impianto sia maggiore nel caso di moto turbolento.

8.5.2 Andamento della temperatura in uscita dalla serpentina

Il funzionamento dell'impianto prevede che il fluido abbia una variazione di temperatura tra l'ingresso e l'uscita, precisamente una diminuzione in estate e un aumento in inverno.

Funzionamento MEDIO ANNUO

Il grafico in Figura 8.10 mostra l'andamento della temperatura in uscita nell'arco dei 12 mesi di funzionamento MEDIO ANNUO al variare della velocità di circolazione. La linea tratteggiata rappresenta l'andamento (imposto) della temperatura in ingresso.

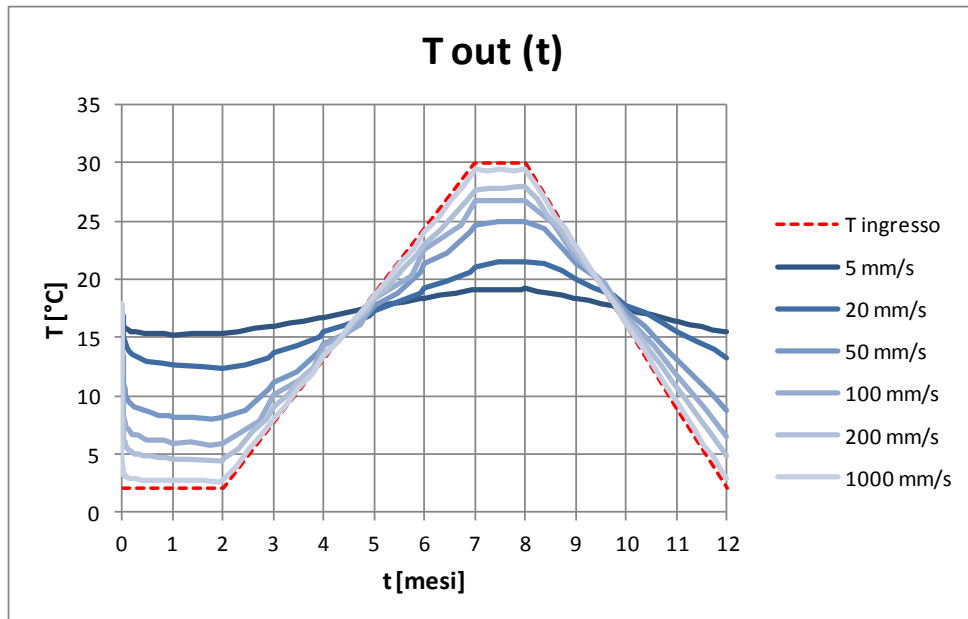


Figura 8.10 – Temperatura fluido in uscita al variare della velocità, funzionamento MEDIO ANNUO

La temperatura subisce variazioni minori per basse velocità, mentre l'oscillazione è maggiore per velocità elevate, tant'è che per $V=1000 \text{ mm/s}$ T_{out} è circa uguale a T_{in} . Questo risultato conferma quanto ottenuto sul pannello test nel capitolo 7: più la velocità è bassa, più tempo il fluido impiega a percorrere la serpentina e quindi la sua temperatura tenderà a eguagliare quella del terreno circostante.

La differenza tra ciascuna curva e quella tratteggiata rappresenta il ΔT tra l'ingresso e l'uscita della serpentina e quindi influenza, come descritto nel capitolo 7, la quantità di energia che quest'ultima può scambiare con il terreno; quest'analisi specifica sarà ripresa di seguito (capitolo 8.5.3).

Analisi ESTATE e INVERNO

Si riportano di seguito i risultati ottenuti nelle due analisi in condizioni di carico gravoso descritte nel capitolo 8.3, denominate "Analisi ESTATE" e "Analisi INVERNO".

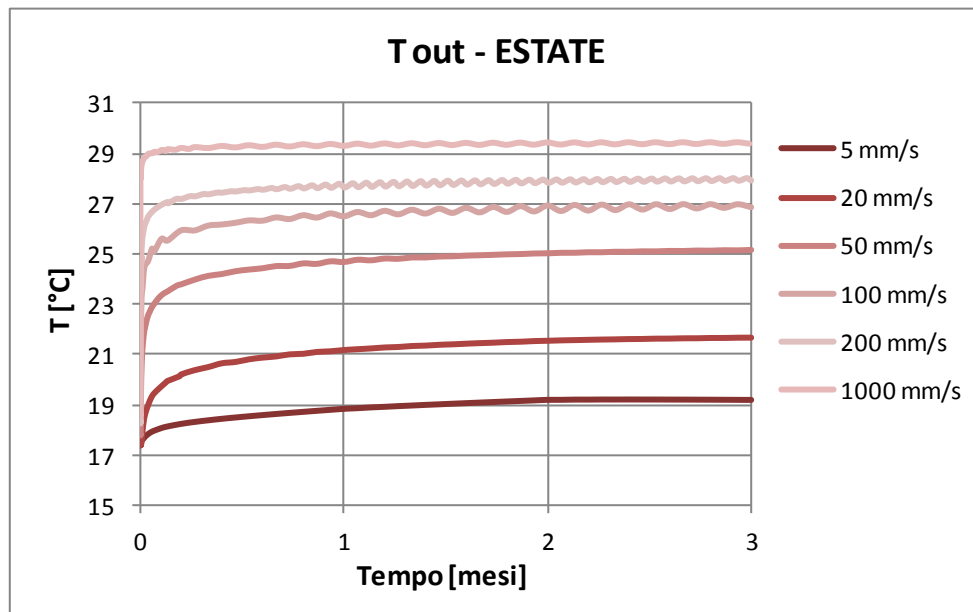


Figura 8.11 – Temperatura fluido in uscita al variare della velocità, analisi ESTATE

Nel grafico di Figura 8.11 emerge che la temperatura, durante i tre mesi estivi di analisi, tende ad aumentare e giungere a un valore di equilibrio, che approssimativamente coincide con il valore a regime.

Il valore di T_{out} a regime è raggiunto, per V basse, in circa 2 mesi, mentre al crescere di V tale il periodo si riduce a meno di un mese (pochi giorni per $V=1000$ mm/s).

Anche in questo caso l'andamento delle curve all'aumentare della velocità rispecchia quanto già osservato per il funzionamento medio annuo, con una tendenza alla diminuzione del ΔT tra ingresso e uscita.

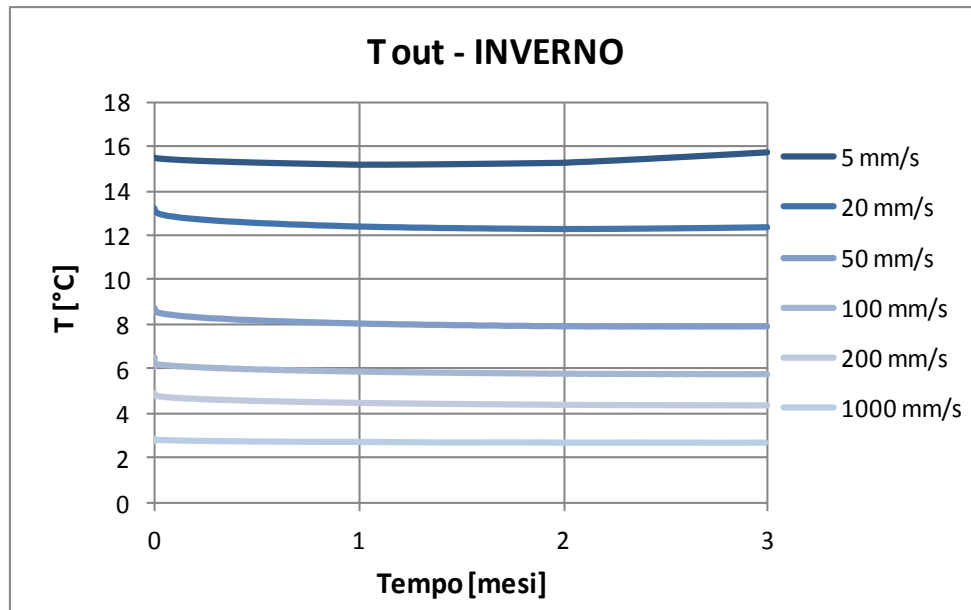


Figura 8.12 – Temperatura fluido in uscita al variare della velocità, analisi INVERNO

In inverno, per velocità molto bassa (5 mm/s), si osserva nel mese di marzo un lieve aumento della temperatura (Figura 8.12). Esso è dovuto al calore proveniente dall'interno dell'edificio (per ipotesi con $T=18^{\circ}\text{C}$), che influenza i 10 metri di serpentina più prossimi alla superficie. Questo effetto scompare per velocità superiori poiché il tempo di residenza del fluido nel tubo non è sufficiente perché esso ne risenta.

Nell'analisi ESTATE (Figura 8.6) la temperatura in ingresso ha un andamento a scalino (a fine maggio è 18°C e istantaneamente è portata a 30°C); questo provoca un transitorio più lungo, visibile in Figura 8.11 nel primo tratto iniziale, poiché la T_{out} del fluido impiega un tempo maggiore per portarsi nelle condizioni di equilibrio.

Invece nell'analisi INVERNO l'andamento della temperatura non ha una brusca variazione (Figura 8.5) e già a inizio analisi (fine dicembre) $T_{in}=2^{\circ}\text{C}$, mantenendosi poi tale per i tre mesi successivi. Questo spiega la minore variazione di T_{out} nel tempo rispetto a quella dell'istante iniziale.

Riassumendo, condizioni prossime a quelle di regime sono raggiunte tanto più rapidamente quanto maggiore è V .

Inoltre se la variazione delle condizioni al contorno, per esempio T_{in} , è rapida (come nell'"Analisi ESTATE"), il periodo di transitorio ha durata maggiore.

8.5.3 Quantità di energia scambiata tra serpentina e terreno

Si è calcolata la quantità di energia E [kWh] scambiata dalla serpentina con il terreno circostante, nelle tre analisi descritte al capitolo 8.3.

Essa si ottiene integrando l'andamento del flusso di calore q [W] dall'istante iniziale t_I a quello finale t_F dell'analisi.

La formula utilizzata è:

$$E = \int_{t_I}^{t_F} \dot{m} c(T_{out} - T_{in}) dt$$

La grandezza E ha segno positivo nel periodo invernale, dove $T_{out} > T_{in}$, viceversa nel periodo estivo.

Per l'analisi di funzionamento medio annuo si riporta il grafico (Figura 8.13) nel quale è evidenziata, per ogni mese, la quantità di energia scambiata.

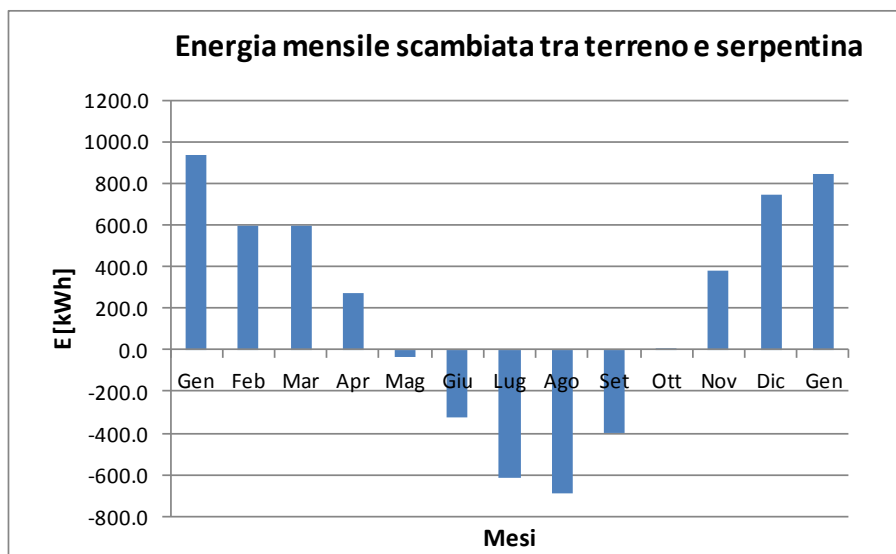


Figura 8.13 - Energia scambiata tra serpentina e terreno nei 12 mesi di funzionamento MEDIO ANNUO

I mesi nei quali si ha maggiore scambio termico sono gennaio e agosto; tuttavia il risultato nel mese di gennaio del primo anno è influenzato dal fatto che, per le ipotesi adottate, si suppone che l'impianto sia messo in funzione proprio a inizio del 1° anno.

Questo influisce sullo scambio termico, poiché il terreno circostante si trova a una temperatura superiore (non ha subito il raffreddamento di novembre e dicembre, nei quali si estrae calore) e quindi il gradiente termico è maggiore.

Un valore più realistico è quello di gennaio del 2° anno di analisi (mese n° 13), che risente dell'effetto dei mesi autunnali precedenti.

Si nota, infine, come l'energia scambiata sia maggiore in inverno rispetto all'estate.

Per le analisi stagionali (Figura 8.14) in condizioni di carico gravoso si riporta l'andamento dell'energia estratta nei tre mesi in funzione della velocità di circolazione del fluido nell'impianto; l'analisi, per le considerazioni fatte sulle perdite di carico, è stata svolta per velocità minori di 1 m/s.

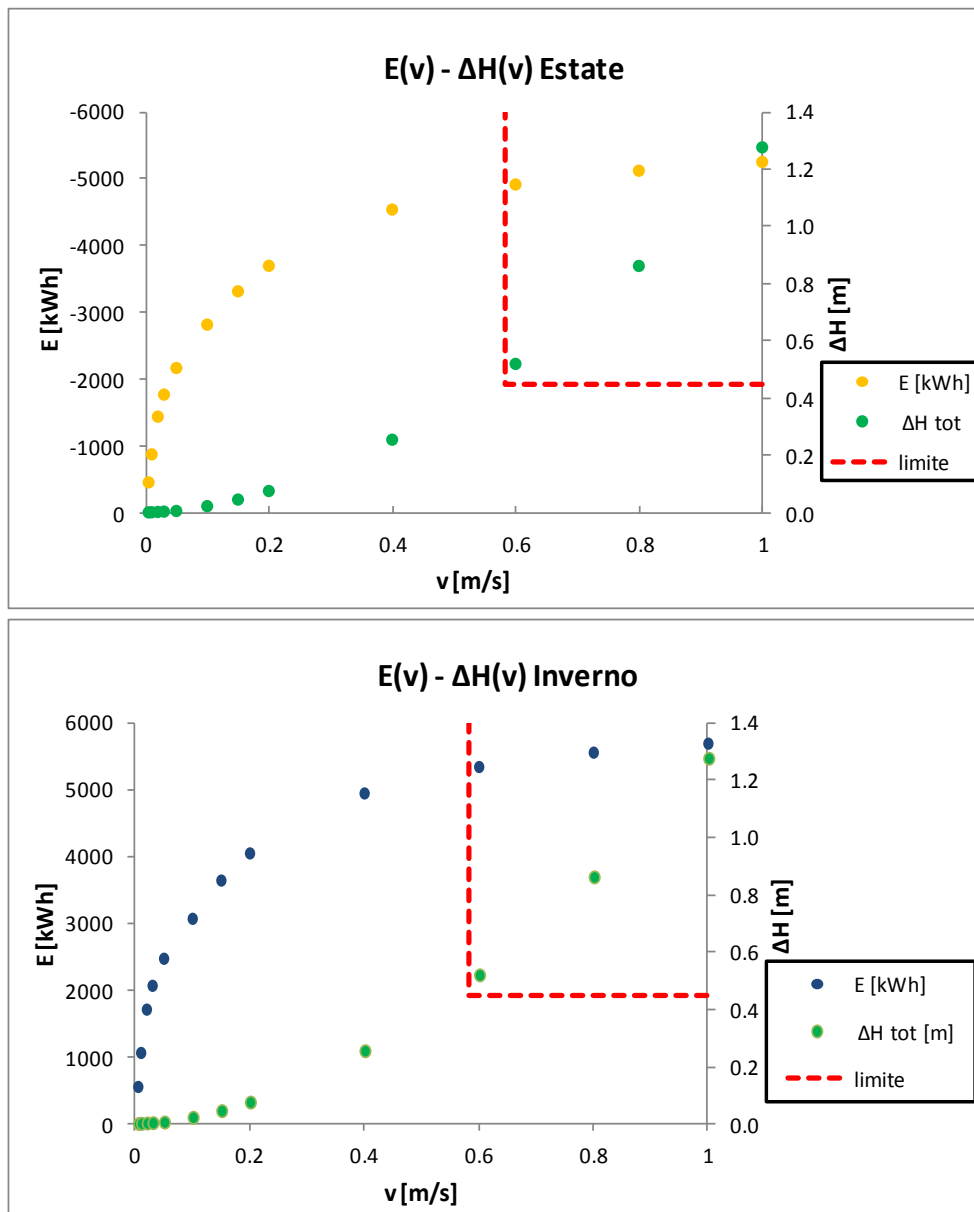


Figura 8.14 - Energia e perdite di carico in funzione della velocità, analisi ESTATE e INVERNO

L'energia scambiata ha un andamento crescente con la velocità, anche se si nota che l'incremento è sempre più piccolo all'aumentare di V . Per questo caso, a differenza del pannello test descritto nel capitolo 7, non si raggiunge la condizione di massimo, poiché l'aumento di \dot{m} predomina sulla riduzione del ΔT tra ingresso e uscita.

La perdita di carico totale ΔH_{tot} che si ha nella serpentina cresce esponenzialmente con la velocità del fluido, come osservato nel capitolo 7.2.1; la linea tratteggiata delimita il campo di velocità i cui valori superano il ΔH ammissibile, pari a 0,45 m.

Da ciò emerge come l'adottare velocità superiori a 0,6 m/s non sia vantaggioso poiché l'incremento di energia scambiata è esiguo, ma le perdite di carico (e di conseguenza la potenza delle pompe richieste) aumenta considerevolmente.

Nel caso in esame valori di velocità compresi tra 0,2 m/s e 0,4 m/s consentono di raggiungere un buon compromesso tra energia scambiata e perdite di carico.

Resta comunque da osservare come valori di velocità ridotti (circa 0,1 m/s, cioè in regime di moto laminare) consentano di mantenere perdite di carico prossime a zero e permettano comunque uno scambio di energia maggiore della metà di quello ottenuto con $V > 0,5$ m/s.

Inoltre velocità ridotte consentono una "salvaguardia" del calore presente nel terreno, evitando, specie se l'impianto funziona in sola modalità heating o cooling, che si abbia una riduzione nel tempo dell'efficienza dovuta a un eccessivo raffreddamento o riscaldamento della zona prossima all'energy foundation (Brandl, 2006).

Considerazioni per il dimensionamento dell'impianto

Sulla base dei risultati ottenuti, è consigliabile progettare l'impianto in modo da poter mantenere nel circuito primario mediamente una velocità ridotta (moto laminare), con la possibilità di poterla aumentare durante i periodi di maggior richiesta di energia.

Tuttavia la scelta non può basarsi soltanto su queste considerazioni, ma deve cercare la soluzione globalmente ottimale, dipendente dallo specifico impianto.

Inoltre in questo lavoro non sono stati considerati altri vincoli legati al range di velocità ammissibili per lo scambiatore situato nella pompa di calore (V troppo alte richiedono dimensioni eccessive della zona di scambio, V basse portano condizioni di moto laminare che ostacolano lo scambio termico).

8.5.4 Andamento della temperatura lungo l'asse del tubo

L'andamento della temperatura lungo l'asse del tubo è influenzato dallo scambio termico che avviene con il terreno, che come detto dipende dalla velocità del fluido e dalle condizioni al contorno.

Per un confronto con quanto già osservato nel capitolo 7, si è analizzato l'andamento della temperatura nei primi 14 metri di tubo, corrispondenti al tratto verticale tra l'ingresso e la prima curva sul fondo, e l'andamento del modulo del flusso termico q_s' [W/m^2] sulla superficie del tubo stesso.

I risultati si riferiscono alla fine del mese di gennaio, con velocità del fluido di 50 mm/s e in condizioni di funzionamento medio dell'impianto.

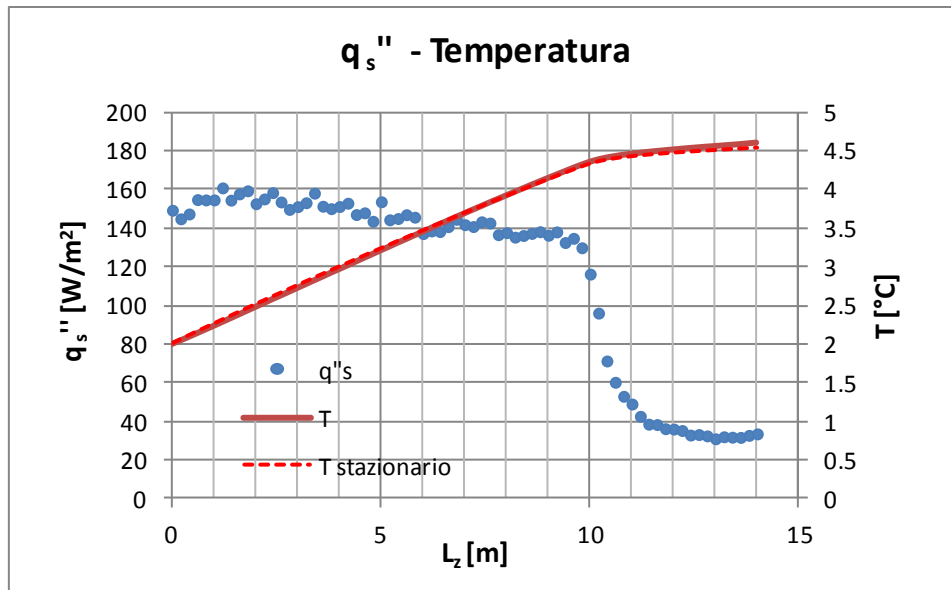


Figura 8.15 – Andamento del flusso di calore e della temperatura lungo il tubo

Nel grafico di Figura 8.15 lungo l'asse orizzontale è riportata la distanza progressiva L_z ($L_z=0$ coincide con l'ingresso del tubo), sull'asse verticale di sinistra la scala del flusso termico sulla parete del tubo e sull'asse di destra la scala della temperatura del fluido.

È possibile notare una discontinuità in corrispondenza di $L_z=10$ m; si ha, infatti, un cambiamento delle condizioni al contorno poiché si passa dalla zona di tubo ($L_z<10$ m) che risente dell'influenza della condizione $T=18^\circ\text{C}$ imposta sulla parete interna dell'edificio alla zona immersa nel terreno su entrambi i lati ($L_z>10$ m).

Per L_z minore di 10 m, q_s'' ha variazioni contenute e l'andamento della temperatura è lineare. Tuttavia non è verificata la relazione discussa nel sottocapitolo 7.6.3:

$$T(L_z) = T_i + \frac{q_s'' P}{\dot{m} c} L_z$$

Infatti, la presenza della condizione $T=18^\circ\text{C}$ sulla parete interna in prossimità del tubo influenza il flusso termico nella zona limitrofa al tubo stesso che non si trova più in condizioni "indisturbate" come nelle analisi del capitolo 7.

Invece per valori di $L_z > 11$ m, cioè nel tratto di paratia a quota inferiore alla platea di base dell'edificio, si hanno condizioni di flusso costante lungo la parete del tubo e vale la relazione sopra riportata.

Infatti, per L_z compresa tra 11,5 m e 14 m si ha:

$$\begin{aligned} q_s''_{medio} &= 33.9 \text{ W/m}^2 \\ T_i(L_z = 11,5 \text{ m}) &= 4,5^\circ\text{C} \\ \text{perimetro } P &= 4 \cdot 0.03 = 0.12 \text{ m} \end{aligned}$$

e, in accordo con la formula, vale la relazione

$$T(L_z = 14 \text{ m}) = T_i + \frac{q_s'' P}{\dot{m} c} L_z = 4.5^\circ\text{C} + \frac{33.9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0.12 \text{ m}}{45 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}} \cdot (14 - 11.5) \text{ m} = 4.55^\circ\text{C}$$

Il risultato coincide con quello del grafico di Figura 8.15, per $L_z=14$ m.

Analoghe verifiche, qui non riportate, sono state fatte al variare della velocità e risultano soddisfatte con sufficiente approssimazione in ogni circostanza.

Una nota a parte merita l'ipotesi, in apparenza non soddisfatta, di condizioni a regime, necessaria per la validità della formula utilizzata. In effetti, l'analisi svolta è in regime transitorio, poiché le condizioni al contorno variano nel corso dei mesi.

Tuttavia, si nota come nella zona prossima al tubo la condizione di regime stazionario sia raggiunta in pochi giorni di funzionamento dell'impianto; quindi i risultati di un'analisi in transitorio che subisce variazioni nell'arco di mesi sono pressoché identici a quelli ottenuti con una successione di stati a regime.

Nel grafico di Figura 8.15 sono riportati gli andamenti della temperatura dell'analisi in transitorio (mese di gennaio, linea continua) e dell'analisi in stazionario con le stesse condizioni al contorno (linea tratteggiata). Le due curve sono sovrapposte, perciò si può affermare che in un mese di analisi le condizioni a regime sono raggiunte.

Questo risultato conferma quanto evidenziato in Figura 8.11 e Figura 8.12.

Tale considerazione è inoltre confermata nelle ricerche di Brandl, il quale afferma che lo studio degli impianti di prassi si può svolgere con analisi in regime stazionario.

8.5.5 Andamento della temperatura lungo l'estradosso della paratia

La temperatura lungo l'estradosso della paratia (faccia a contatto con il terreno), a causa della geometria con la quale è disposta la serpentina all'interno dei pannelli, non è costante, ma vi è la presenza alternata di zone calde e fredde.

Sono riportate (Figura 8.16) la condizione estiva e invernale, indicando con il colore blu e rosso la temperatura relativa minore e maggiore del fluido. Per esempio durante l'estate è immesso nel sistema fluido caldo (indicato con m_{in}) e si ha ritorno di fluido a temperatura inferiore (m_{out}).

In inverno l'ingresso e l'uscita restano invariati ma ovviamente cambiano le temperature relative dei due fluidi.

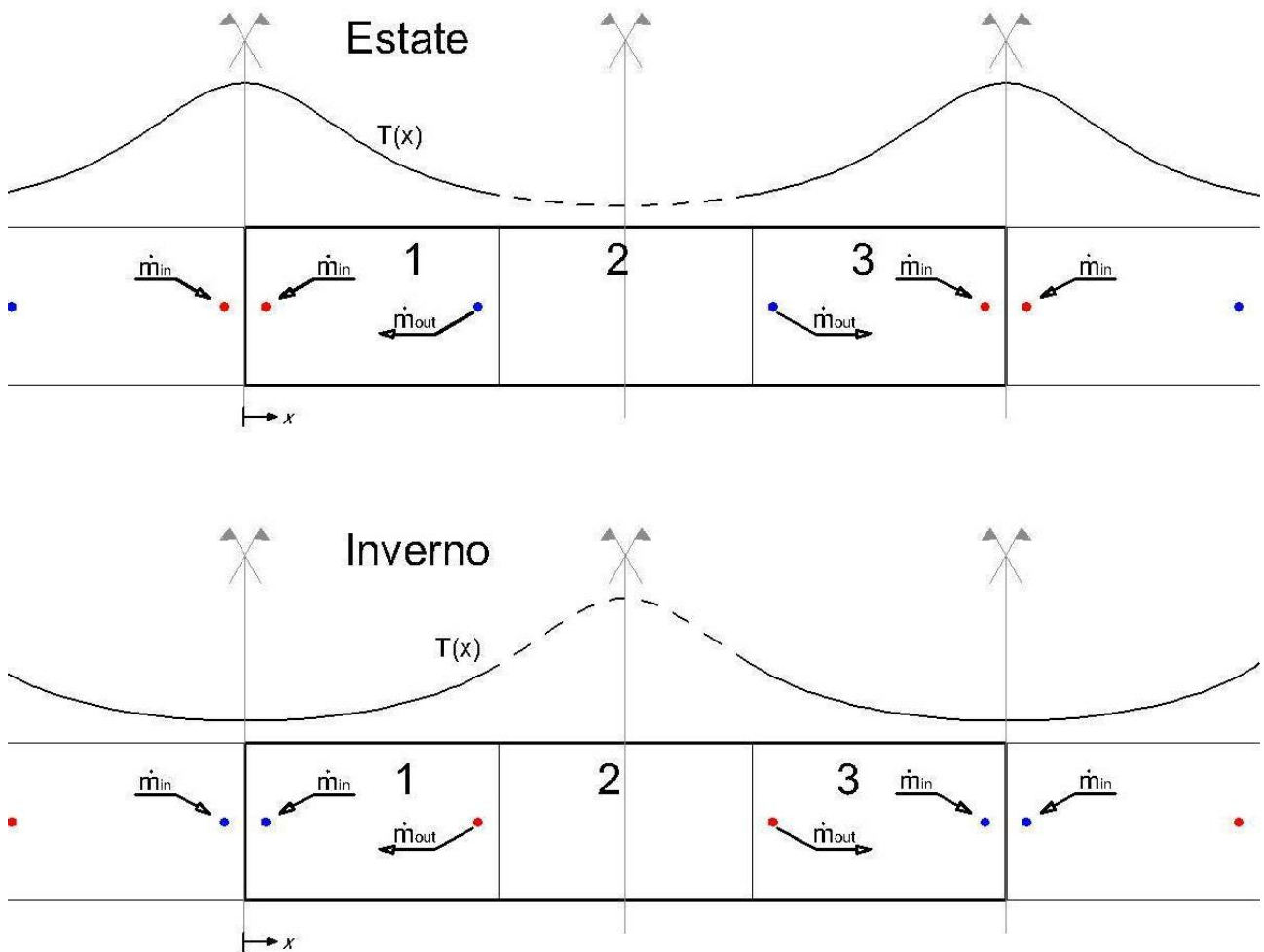


Figura 8.16 - Schema pannello e relativo andamento qualitativo temperatura estiva e invernale

Sono inoltre riportati gli andamenti qualitativi della temperatura lungo l'estradosso della paratia. Esaminando la condizione **estiva** si nota la formazione di una zona più calda al confine tra due pannelli, dovuta alla vicinanza tra i tubi con fluido caldo in ingresso. Nella zona centrale la temperatura è inferiore perché parte del calore è sottratto dal fluido fresco in uscita.

Si riporta di seguito (Figura 8.17) l'andamento della temperatura sull'estradosso alla profondità di 5 metri dal piano campagna, così da non risentire delle condizioni climatiche stagionali, ottenuto alla fine dei mesi di gennaio e luglio al variare della velocità del fluido. In questa analisi si adottano le condizioni di funzionamento MEDIO ANNUO, descritte nel sottocapitolo 8.3.1; il tubo di ingresso è posto a $x=0,05$ m, quello d'uscita a $x=0,75$ m.

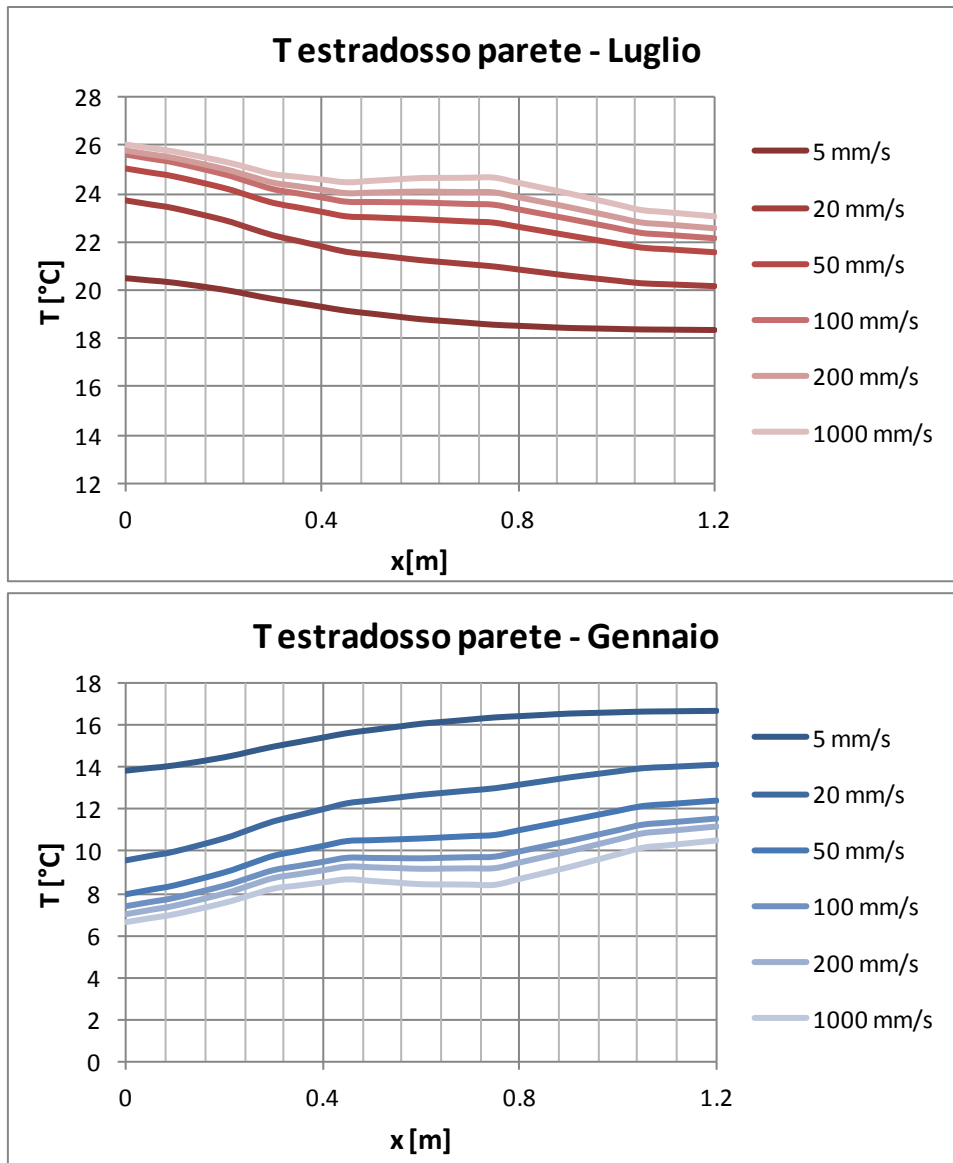


Figura 8.17 – Temperatura sull'estradosso della paratia al variare della velocità del fluido

Osservando la Figura 8.17, limitandosi ai risultati per il mese di luglio, si possono fare principalmente tre osservazioni:

- 1) La temperatura aumenta al crescere della velocità. Questa considerazione è ovvia per quanto già specificato nel paragrafo 8.5.3, cioè che aumentando la velocità del fluido si ha un maggiore scambio termico con il dominio circostante e quindi, nel caso estivo, la temperatura nel terreno tende a essere più elevata.
- 2) Nel caso di velocità molto bassa (5 mm/s) la soluzione tende ad allinearsi alla temperatura $T=18^{\circ}\text{C}$ imposta sulla parete interna dell'edificio. In particolare in luglio questa condizione si risente nella zona prossima all'asse di simmetria del pannello ($x=1,2$ m).
- 3) Per condizioni di moto laminare (velocità inferiori a 50 mm/s) l'andamento della temperatura lungo x è monotono decrescente; al contrario per velocità superiori si ha una lieve crescita in corrispondenza di $x=0,75$ m.

Essa è dovuta alla temperatura elevata che il fluido mantiene e che crea, in corrispondenza dell'ascissa del tubo di risalita ($x=0,75$ m), una zona circoscritta con temperatura maggiore rispetto alla fascia compresa tra i due tubi.

8.5.6 Variazioni del campo di temperatura intorno all'edificio provocate dall'accensione dell'impianto.

L'accensione dell'impianto induce una variazione del campo di temperatura nel terreno circostante la paratia, variabile nel corso dell'anno in base alla temperatura del fluido termovettore.

I dati riportati sono riferiti a due istanti temporali (quello invernale a fine gennaio e quello estivo a fine luglio), in condizioni di funzionamento medie dell'impianto, confrontati con la situazione a impianto spento (coincidente con la condizione a regime descritta nel capitolo 5 per terreno completamente saturo).

La coordinata z è coerente al sistema di assi adottato inizialmente (capitolo 5), da cui $z=30$ m sul piano campagna e $z=0$ m sul fondo del dominio.

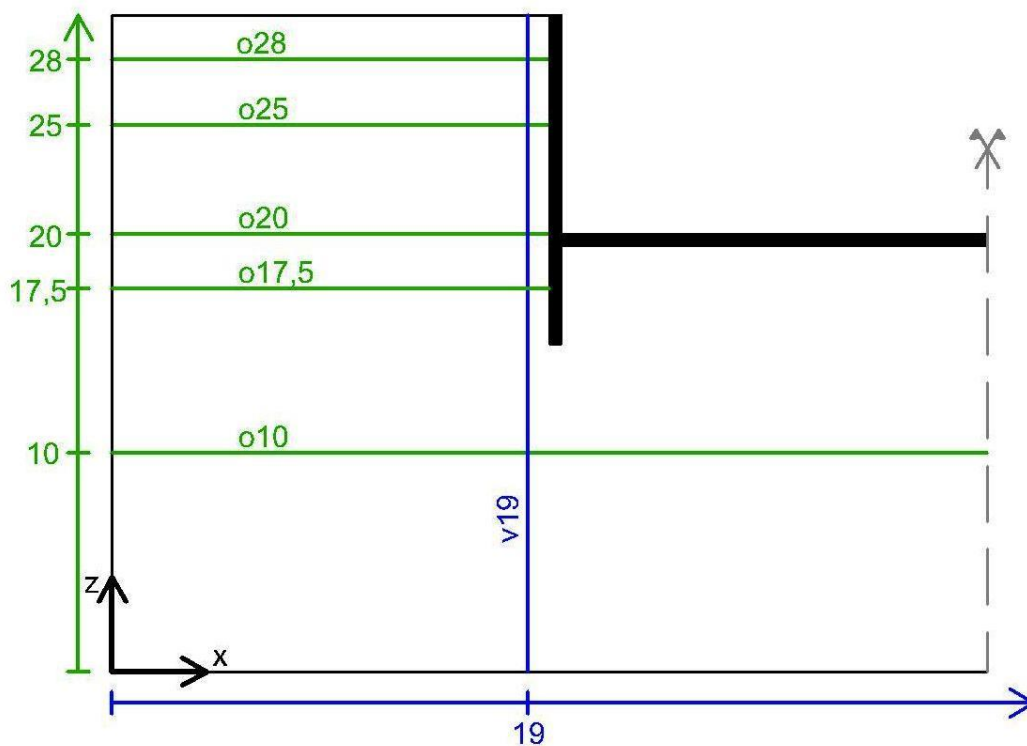


Figura 8.18 – Path analizzati con impianto funzionante

Per ipotesi si studia la situazione sul piano di simmetria prossimo al tubo d'ingresso del circuito (Figura 8.3); alla fine del sottocapitolo sono presenti alcune note di specifica riguardanti la scelta e le sue implicazioni.

Si riportano i risultati ottenuti lungo i path orizzontali e lungo il path $v19$.

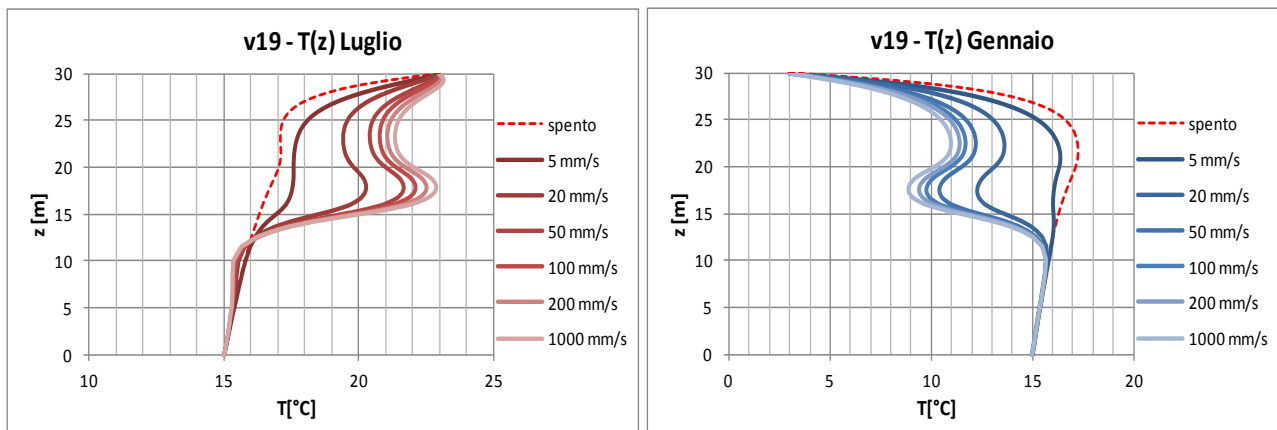


Figura 8.19 – Andamento temperatura lungo il path v19 al variare della velocità del fluido

Dai grafici di Figura 8.19 si osserva che la soluzione è differente per le 4 zone seguenti:

- 1) $25\text{m} < z < 30\text{ m}$
- 2) $20\text{ m} < z < 25\text{ m}$
- 3) $12\text{ m} < z < 20\text{ m}$
- 4) $z < 12\text{ m}$

Zona 1 ($z > 25\text{ m}$)

Osservando il path di Figura 8.19 si nota che il campo di temperatura subisce l'influenza delle condizioni climatiche esterne agenti sul piano campagna, con forti variazioni tra inverno ed estate. L'influenza dell'impianto aumenta spostandosi dalla superficie verso la zona più profonda.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti lungo il path o28; la linea tratteggiata rossa rappresenta l'andamento della temperatura T a regime per impianto spento, le altre linee l'andamento al variare della velocità V del fluido.

Attenzione, si riportano per motivi grafici solo i 10 metri prossimi alla paratia; nella parte restante del dominio le 7 curve sono sovrapposte.

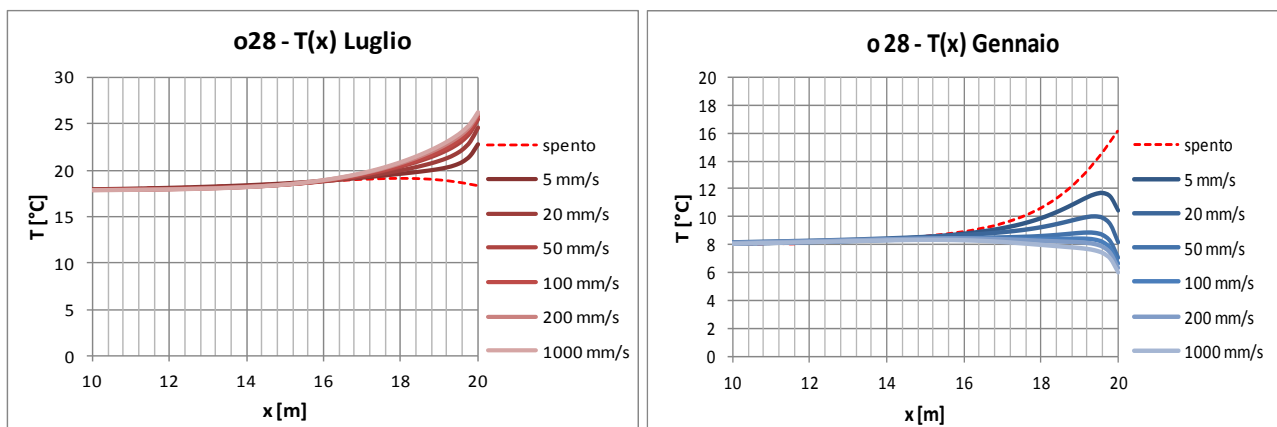


Figura 8.20 - Andamento temperatura lungo il path o28 al variare della velocità del fluido

A profondità pari a 2 metri (Figura 8.20) si nota come soltanto i 3 metri di terreno prossimi alla paratia risentano del cambiamento di temperatura dovuto alla serpentina.

L'effetto dovuto alle diverse velocità provoca una differenza nel gradiente di temperatura presente. Ad esempio, nella condizione estiva, al crescere della velocità aumenta la quantità di calore ceduto al terreno e quindi anche la temperatura in prossimità della paratia.

Si nota una differenza apprezzabile tra velocità molto basse ($V=5$ mm/s) e velocità alte ($V>50$ mm/s). Tuttavia tale differenza si riduce nelle condizioni di moto turbolento, tant'è che le curve ottenute con $V=100$ mm/s e $V=1000$ mm/s sono pressoché coincidenti.

Nella situazione invernale la zona d'influenza è più estesa, pari a circa 4 metri.

Zona 2 ($20 \text{ m} < z < 25 \text{ m}$)

Nei 5 metri considerati, si ha un andamento circa costante della temperatura con la profondità, come visibile in Figura 8.19.

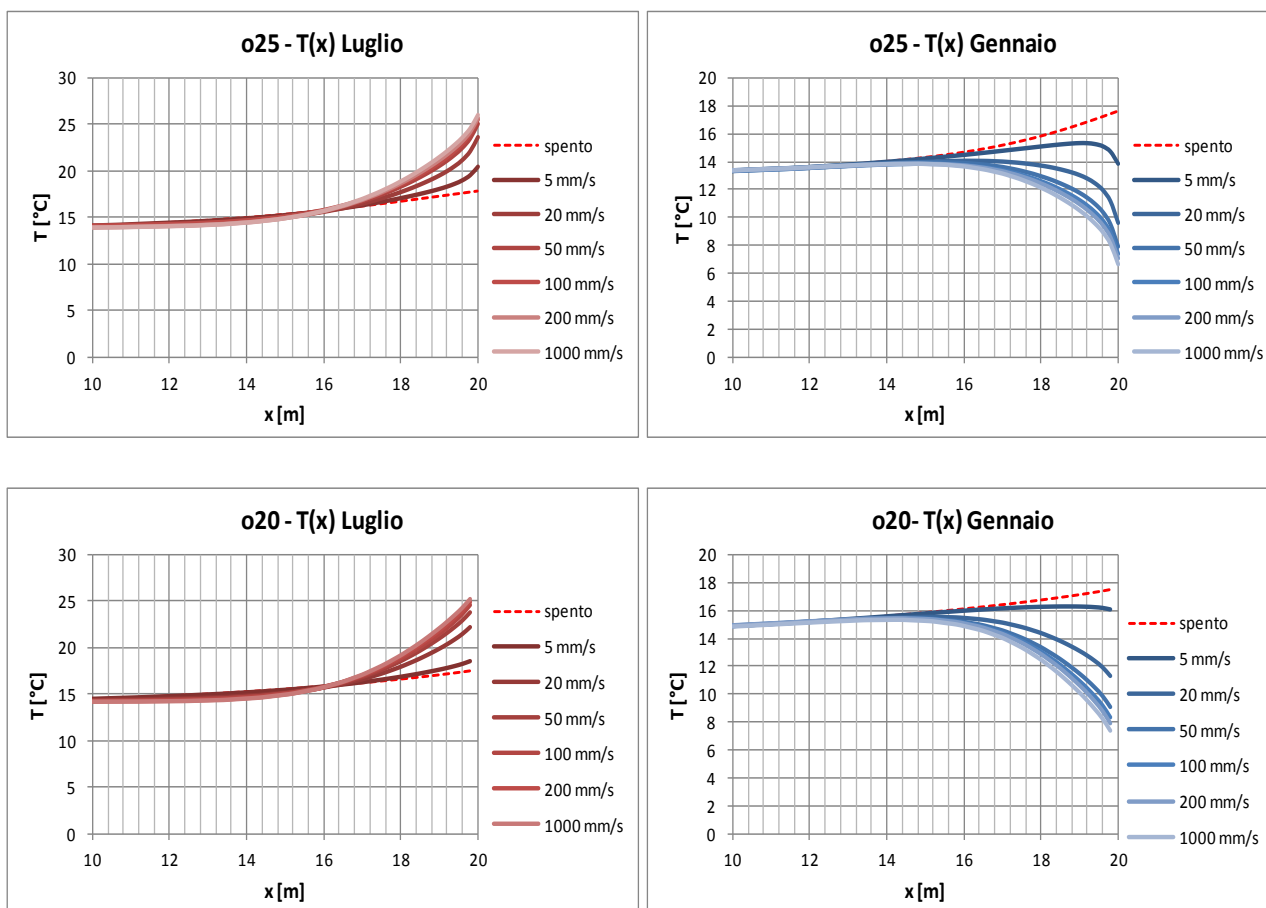


Figura 8.21 - Andamento temperatura lungo il path o25 al variare della velocità del fluido

Osservando i path o20 e o25 (Figura 8.21) si deduce che le considerazioni riguardanti l'effetto della velocità, fatte nella zona 1, sono valide anche in questo caso.

Lungo i due path di figura i risultati sono molto simili tra loro, tant'è che non si evidenziano differenze al variare di z . L'estensione della zona d'influenza, dove è apprezzabile una differenza rispetto alla curva a impianto spento, è pari a circa 3,5 metri in luglio e 4,5 m in gennaio.

La somiglianza nei risultati tra i due path è dovuta alla presenza della condizione $T=18^{\circ}\text{C}$ imposta sulla parete verticale interna all'edificio (nel sistema di riferimento a $x=20,5$ m), che orienta il flusso principalmente in direzione orizzontale.

Essa tende a catturare una parte del calore espulso dall'impianto in estate e a cedere calore al fluido in inverno, avendo nei due casi una temperatura rispettivamente minore e maggiore.

Zona 3 ($12\text{ m} < z < 20\text{ m}$)

Osservando la Figura 8.19, si nota durante l'estate un brusco aumento della temperatura nella fascia in esame rispetto alla zona 2 (tranne che nel caso di $V=5\text{mm/s}$).

Ovviamente in inverno si verifica la situazione opposta con riduzione della temperatura.

Esaminando anche i contour plot ottenuti con Abaqus (Figura 8.22), si nota la formazione di un bulbo di temperatura differente nella zona inferiore della paratia.

Nel caso estivo, il flusso di calore può disperdersi nel terreno in direzione circa radiale, non avendo più una condizione al contorno piana ($T=18^{\circ}\text{C}$) a condizionarne la forma.

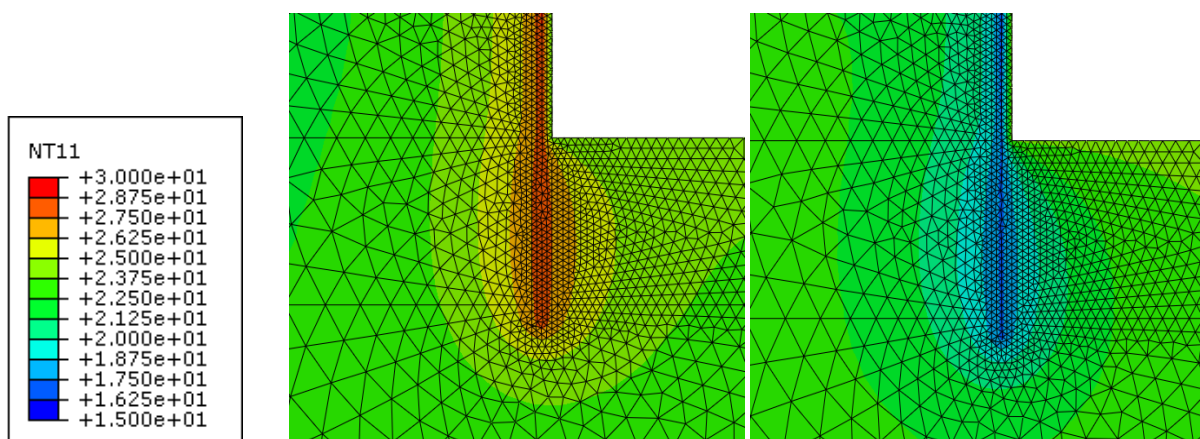


Figura 8.22 – Campo di temperatura del terreno in prossimità dell'estremità inferiore della paratia, con velocità del fluido $V=50\text{ mm/s}$ (estate e inverno)

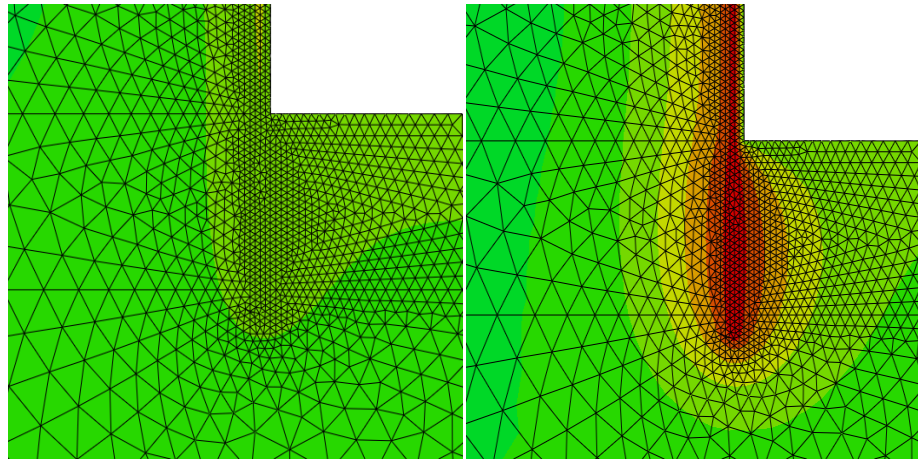


Figura 8.23 – Confronto campo di temperatura in prossimità della paratia con velocità fluido $V=5\text{mm/s}$ e $V=1000\text{ mm/s}$

Osservando i contour plot di Figura 8.23 si nota subito la differenza di comportamento al variare della velocità; per $V=5\text{ mm/s}$ il fluido si porta gradualmente a una temperatura prossima a quella del terreno circostante e quindi l'effetto di variazione di T è ridotto. Nel caso invece di velocità molto alte (moto turbolento), si ha un aumento dello scambio termico e il bulbo assume dimensioni maggiori.

Esaminando i risultati lungo il path o17,5 (Figura 8.24) si trova la conferma dei risultati dei contour plot. L'estensione della zona d'influenza è pari a circa 3,6 m in luglio e 5,4 m in estate.

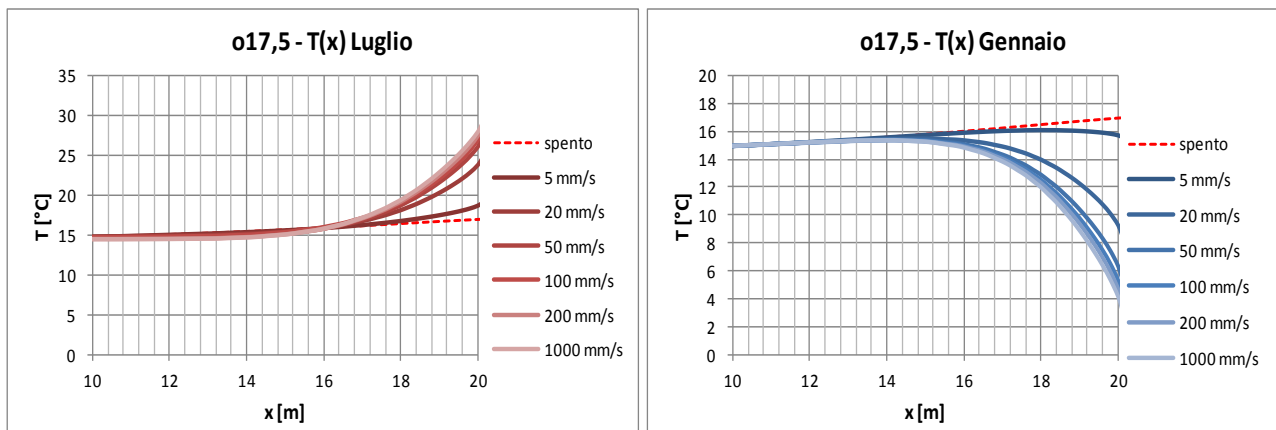


Figura 8.24 - Andamento temperatura lungo il path o17,5 al variare della velocità del fluido

Nella zona 3, in misura maggiore che nella parte alta del dominio, si ha quindi in estate uno stoccaggio del calore, che resta immagazzinato nel terreno, e che poi potrà essere estratto nuovamente durante l'inverno se il funzionamento dell'impianto è heating/cooling.

Come anticipato nel capitolo 6 (Brandl, 2006), se invece l'impianto funziona esclusivamente per il raffreddamento o per il riscaldamento, si può avere un effetto

indesiderato di accumulo o sottrazione di calore nel tempo che, riducendo T nell'area del bulbo, porta ad una graduale perdita di efficienza dell'impianto.

L'ultima considerazione riguardante la zona 3 è basata sulle osservazioni di Adam & Markiewicz (2002) riportate nel capitolo 6 in base alla diversa efficienza di scambio in funzione della geometria dello scambiatore.

Infatti, il calore ha qui una diffusione radiale a partire dalla paratia e questo consente uno scambio termico migliore, essendo maggiore la superficie di terreno interessata.

Zona 4 ($0 \text{ m} < z < 12 \text{ m}$)

Nella parte più profonda la soluzione risente dell'influenza della condizione di temperatura costante pari a 15°C imposta sul fondo del dominio. L'influenza dell'impianto è quindi ridotta e limitata.

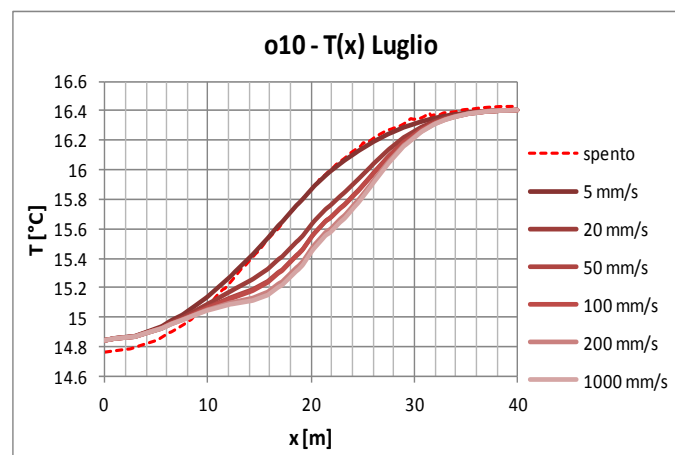


Figura 8.25 - Andamento temperatura lungo il path o10 al variare della velocità del fluido

Esaminando il path o10 (Figura 8.25) si nota la differenza rispetto alla condizione di impianto spento, solo nella zona centrale del dominio (al di sotto della paratia, posta a $x=20 \text{ m}$).

L'ordine di grandezza della variazione, come emerge dalla scala dell'asse delle ordinate, è comunque ridotto, limitato a pochi decimi di grado.

Nel caso si adotti un funzionamento dell'impianto in solo heating (o cooling) l'estensione del bulbo precedentemente descritto potrà, nel corso di più anni di analisi, interessare anche la zona più profonda del dominio.

Tale evenienza, qui non studiata, richiederebbe comunque un'analisi specifica.

Altre considerazioni

Le indagini sulla variazione del campo di temperatura, sono state fatte sulla faccia coincidente con il piano di simmetria sul bordo del pannello, vicino all'ingresso del tubo. Come evidenziato dalla Figura 8.26, il bulbo non ha forma simmetrica nella terza dimensione esaminata, poiché cambia la temperatura del fluido tra il tratto di discesa e quello di risalita.

Sul piano di simmetria posto a metà pannello (cioè la faccia sul retro, non visibile in Figura 8.26) l'estensione del bulbo, e in generale delle zone di influenza, è diversa rispetto alle situazioni studiate.

Si può affermare tuttavia che tale estensione è minore, poiché il gradiente di temperatura tra tubo di risalita e terreno è inferiore rispetto a quello presente nella zona limitrofa al tubo di discesa. La Figura 8.27 mostra qualitativamente quest'osservazione per il caso di $V=50$ mm/s.

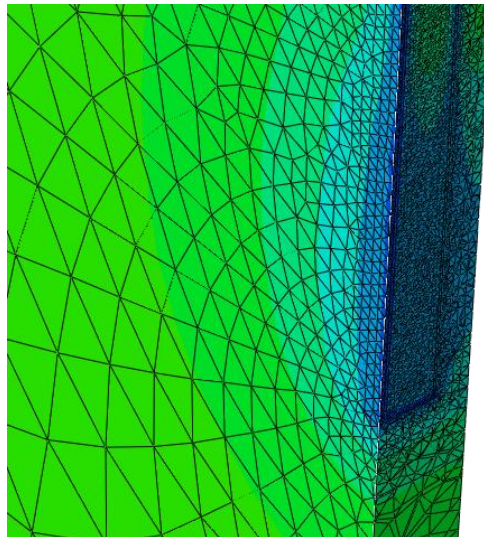


Figura 8.26 – Bulbo di temperatura in gennaio alla base della paratia, con velocità del fluido $V=50$ mm/s

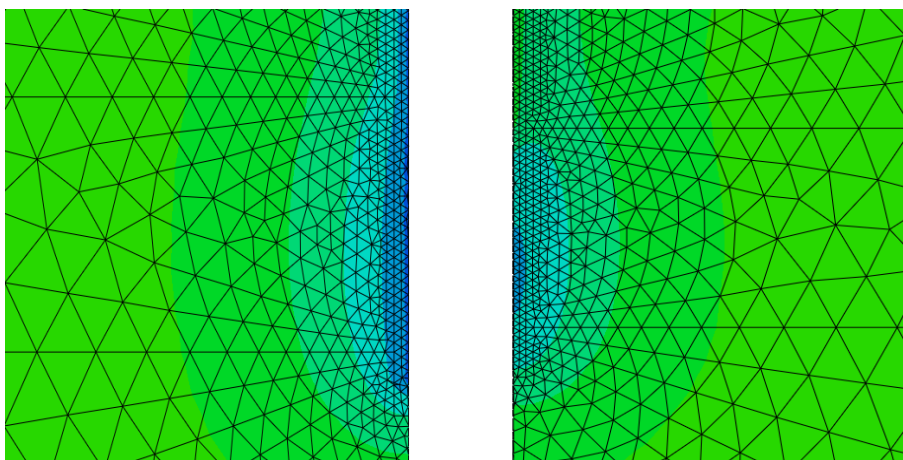


Figura 8.27 – Confronto forma bulbo tra fronte (sinistra) e retro (destra) del modello

8.6 Conclusioni

I risultati ottenuti nelle analisi sull'impianto di Tradate, in cui la serpentina è semplificata con una forma a U, sono riassunti di seguito.

- Le perdite di carico idraulico crescono all'aumentare della velocità V ; in particolare si nota un forte incremento passando dalle condizioni di moto laminare (che si verifica per $V < 0,1$ m/s) a quelle di moto turbolento. In particolare nel moto laminare le perdite sono circa pari a zero.
Per valori di $V > 0,60$ m/s le perdite di carico superano il valore massimo consigliato per questa tipologia di impianti.
- L'andamento della temperatura del fluido in uscita dalla serpentina è stato analizzato nelle tre analisi proposte.
In tutti i casi si è osservato come la differenza $T_{in}-T_{out}$ si riduca all'aumentare di V , a causa del minor tempo di permanenza del fluido all'interno del circuito, che può subire quindi minori variazioni di temperatura.
Nelle analisi ESTATE e INVERNO è emerso che la temperatura nel tempo tende a un valore asintotico, coincidente con le condizioni di regime.
La durata del transitorio diminuisce al crescere di V ; inoltre dipende da come varia la temperatura in ingresso: aumenta per brusche variazioni di T_{in} .
- Esaminando l'energia E scambiata tra la serpentina e il terreno per l'analisi in "Funzionamento MEDIO ANNUO", si nota che è più elevata nella stagione estiva e invernale, dove la differenza tra la temperatura del fluido e quella del terreno è massima.
Per le analisi stagionali "ESTATE" e "INVERNO" invece si è studiata la variazione di E con la velocità di movimento del fluido; si osserva che, a differenza del pannello test studiato nel capitolo 7, non si raggiunge in questo caso la condizione di massimo nel range di velocità ammissibili (Figura 8.14).
Si osserva inoltre come, per velocità di moto laminare, l'energia scambiata cresca molto rapidamente, mentre nel moto turbolento l'incremento si riduce.
- Lungo l'asse del tubo, la variazione di temperatura T e il flusso di calore q_s'' sulla parete del condotto sono, rispettivamente lineare, e costante a tratti.
Si evidenzia una discontinuità a 10 metri dal piano campagna, dove scompare l'effetto della parete interna dei piani seminterrati che influenza il flusso di calore nella zona vicina al tubo. Infatti, nella parte profonda è valido il legame tra q_s'' e T già individuato nel capitolo 7 e in accordo con le considerazioni teoriche, mentre nella parte più superficiale il legame non è verificato.

L'andamento di temperatura trovato dopo un mese di analisi è molto simile rispetto a quello delle condizioni a regime, segno che la temperatura del fluido dipende molto dalla temperatura della zona immediatamente circostante.

- Lungo il paramento esterno della paratia si possono individuare delle zone alternate a temperatura diversa, poste in prossimità dei tubi, la cui estensione cresce all'aumentare della velocità del fluido termovettore.
- L'accensione dell'impianto provoca delle variazioni sul campo di temperatura preesistente nel terreno in prossimità dell'edificio. L'effetto in generale aumenta al crescere della velocità del fluido.

Nella zona più superficiale l'influenza è ridotta poiché il campo di temperatura è governato dalle fluttuazioni stagionali, mentre nella parte più profonda della paratia si crea una zona con forma a bulbo nella quale il campo di temperatura subisce una variazione.

L'estensione di tale zona cresce con la velocità di movimento del fluido termovettore ed è importante specialmente nei casi di funzionamento monodirezionale dell'impianto (solo heating o solo cooling).

Infatti, essa può estendersi nel tempo e, nel lungo periodo, ridurre il gradiente termico e quindi l'efficienza dell'impianto; in questi casi è necessaria una definizione attenta del limite di velocità per evitare un calo di energia scambiata.

9 CONCLUSIONI

Le analisi svolte nell'elaborato hanno dimostrato come le caratteristiche fisiche del terreno regolino il fenomeno di trasmissione del calore al suo interno.

Il terreno è un materiale che presenta un'inerzia termica piuttosto alta, che cresce all'aumentare del contenuto d'acqua; infatti, quest'ultima è caratterizzata da una conducibilità termica k bassa e da un calore specifico c molto grande.

Il **campo di temperatura** nel terreno risente di queste caratteristiche, mostrando una capacità di risposta assai lenta alle variazioni di temperatura imposte in superficie.

Le fluttuazioni stagionali della temperatura esterna dell'aria, in caso di terreno in campo aperto, producono effetti nei primi 8÷10 metri di profondità e la risposta è sfasata nel tempo e smorzata procedendo verso il basso.

Oltre i 10 metri dal piano campagna, invece, la temperatura è sempre costante, pari a circa 15°C.

La presenza di un edificio dotato di piani interrati costituisce un disturbo che va ad alterare il normale profilo di temperatura che naturalmente si crea nel terreno, poiché all'interno della struttura la temperatura nel corso dell'anno è pressoché costante.

Esaminando il caso di Tradate si nota come, sotto la platea di fondazione, la temperatura del terreno non risente delle oscillazioni stagionali, ma della presenza dell'edificio che provoca un lieve rialzo termico.

Il processo continua finché nell'arco di circa 6÷7 anni si raggiungono le condizioni a regime.

Nella zona più superficiale, lateralmente alla porzione interrata della struttura, si nota invece una sovrapposizione tra gli effetti dovuti alle stagioni e il calore trasmesso dall'interno dell'edificio.

In generale la presenza della struttura influisce sul campo di temperatura fino a una distanza orizzontale di circa 10 metri; le condizioni a regime sono raggiunte più rapidamente nella fascia prossima alla superficie, in genere in 4÷5 anni.

Passando dalle condizioni di terreno completamente saturo a quelle indotte da una variazione del livello di falda, si è notato come il terreno nella zona insatura abbia una diminuzione dell'inerzia termica. Essa è dovuta essenzialmente a una forte riduzione del calore specifico, che prevale sulla modesta riduzione di conducibilità k .

Ne consegue una risposta più rapida del terreno alle fluttuazioni stagionali.

La presenza di un tessuto urbano più fitto, tipico di un centro cittadino, rappresentata attraverso l'inserimento di un edificio limitrofo a quello in esame, altera il campo di temperatura presente nel terreno.

Il calore proveniente dagli edifici forma una fascia continua di temperatura più alta al di sotto della superficie, che "isola" gli strati più profondi dalle variazioni stagionali. Queste ultime, agendo su una superficie del piano campagna ridotta dalla presenza degli edifici, producono variazioni del campo di temperatura limitate alla fascia più superficiale, fino a 3÷4 metri di profondità.

Le considerazioni fatte riguardo alla presenza di più edifici hanno tuttavia un carattere qualitativo, poiché dipendono dalla geometria del problema (distanza tra gli edifici limitrofi e numero di piani interrati).

Qualora si volesse installare un impianto del tipo "energy foundation", bisognerebbe tenere conto che l'eventuale presenza di edifici vicini porterebbe dei benefici per quanto riguarda la fase invernale, ma degli svantaggi nel periodo estivo, essendo minore il gradiente di temperatura tra il fluido e il terreno.

Nella seconda parte del lavoro, esaminando l'impianto, si è osservato che i parametri principali sono la geometria della fondazione contenente gli scambiatori di calore (dimensioni e disposizione spaziale della serpentina) e il regime di moto del fluido termovettore.

Nello studio del **pannello test** si è osservato che l'efficienza dello scambiatore, a parità di dimensioni del dominio, non dipende dalla lunghezza della serpentina ma dalla sua disposizione geometrica.

È bene evitare un'eccessiva vicinanza tra i tubi d'ingresso e d'uscita, poiché si avrebbe un gradiente termico elevato che andrebbe in parte ad annullare la variazione di temperatura ottenuta nella restante parte del percorso.

Inoltre si è osservato come la potenza termica scambiata q (in regime stazionario) sia funzione della portata in massa \dot{m} e della differenza tra la temperatura di uscita e quella d'ingresso nella serpentina ΔT .

Aumentando la velocità di movimento aumenta \dot{m} ma allo stesso tempo si riduce ΔT , per cui si verifica, nei casi esaminati, un punto nel quale il flusso di calore è massimo; questo punto di funzionamento consente di scambiare la massima quantità di calore, ma non è detto che coincida con la condizione di ottimo per l'impianto.

Infatti, è necessario verificare che la velocità non sia eccessiva, altrimenti le perdite di carico idraulico che si creano sono tali da richiedere un sistema di pompaggio eccessivo e costi di gestione troppo elevati, tali da sconsigliarne l'applicazione.

Il regime di moto (laminare o turbolento) influenza notevolmente gli aspetti idraulici legati alle perdite di carico, ma gioca un ruolo fondamentale anche nella trasmissione del calore; i due ambiti sono strettamente accoppiati tra loro, influenzandosi reciprocamente. È emerso come lo scambio termico sia nettamente maggiore nel caso di moto turbolento, poiché il coefficiente di scambio termico convettivo h ha un rapido aumento rispetto alle condizioni di moto laminare. Tuttavia bisogna tener conto delle maggiori perdite di carico idraulico in regime turbolento.

Si è inoltre osservato, muovendosi lungo l'asse del tubo, che l'andamento della temperatura è lineare e il flusso termico lungo la parete è costante; questo concorda con la teoria che prevede questa soluzione, confermando che i risultati ottenuti possono essere considerati corretti.

Con riferimento all'**impianto di Tradate** sono state ripetute alcune analisi condotte sul pannello test, che permettono di estendere in parte alcune delle considerazioni già fatte.

Nell'analisi "Funzionamento MEDIO ANNUO" si osserva che l'andamento dell'energia E [kWh] scambiata tra terreno e impianto è maggiore nella stagione estiva e invernale, dove la differenza tra la temperatura del fluido e quella del terreno è massima.

In "Analisi ESTATE" e "Analisi INVERNO" l'andamento dell'energia è crescente con la velocità V , anche se, a differenza del pannello test, non è stato raggiunto un punto di massimo.

Quest'ultimo, se presente, si verifica per un valore di V maggiore del limite ammissibile per il rispetto dei vincoli sulle perdite di carico, e non è raggiungibile, essendo anche superiore al valore massimo di velocità prevista per questa tipologia di impianti (1 m/s).

L'impianto provoca un cambiamento del campo di temperatura in prossimità dell'edificio, che presenta caratteristiche diverse in base alla posizione.

Nella zona superficiale (1÷2 m di profondità) l'influenza è ridotta, a causa dell'effetto delle condizioni stagionali che, come detto, governano il campo di temperatura in questo strato. Muovendosi verso gli strati più profondi la variazione di temperatura si propaga fino a una distanza maggiore, dell'ordine dei 4÷6 m, variabile in base alla velocità di movimento del fluido termovettore.

In particolare nella parte più profonda della paratia lo scambio termico può avvenire in direzione pseudo - radiale, creando una zona di terreno con forma a bulbo nel quale la temperatura varia rispetto alle condizioni preesistenti.

Si è notato come la dimensione del **bulbo** sia fortemente legata alla velocità di movimento del fluido: è quasi nulla per moto laminare e massima per moto turbolento.

Questa zona di accumulo (estate) o di mancanza (inverno) di calore può avere importanza negli impianti con funzionamento monodirezionale (solo *heating* o solo *cooling*), poiché

può estendersi nel tempo e, nel lungo periodo, ridurre il gradiente termico e quindi l'efficienza dell'impianto; in questi casi è necessaria una definizione attenta del limite di velocità per evitare un depauperamento della risorsa.

Gli impianti a bassa entalpia rappresentano un sistema di estrazione di energia termica rinnovabile, applicabili ovunque e realizzabili alla scala della singola opera o edificio.

L'impatto estetico (rispetto a altre fonti rinnovabili) è assolutamente nullo e, nella tipologia degli scambiatori integrati nelle fondazioni, l'impianto non richiede la costruzione di opere aggiuntive rispetto a quelle già necessarie per la struttura stessa.

Inoltre i recenti progressi nella tecnologia, che hanno consentito un miglioramento dell'efficienza delle pompe di calore, ne rendono sempre più diffuso l'utilizzo, come confermato dai dati degli ultimi anni.

Il lavoro di tesi presenta notevoli possibilità di ampliamento e sviluppo.

Riguardo alla trasmissione del calore nel terreno si possono implementare modelli più complessi, considerando l'accoppiamento del processo con la variazione di umidità nel suolo.

Può inoltre essere analizzato un regime di falda non idrostatico, tenendo in considerazione l'effetto del movimento dell'acqua sul bilancio termico del terreno.

Gli effetti, trascurati in questo lavoro, di scambio termico con l'atmosfera a causa di precipitazioni, radiazione solare e vento possono essere inclusi nel bilancio termico del dominio.

In merito all'impianto è possibile approfondire lo studio valutando geometrie della serpentina più complesse e realistiche, eventualmente studiando il circuito primario insieme alla pompa di calore e al circuito secondario, così da poter includere il reale consumo e fabbisogno energetico dell'edificio nel bilancio termico.

Inoltre può essere studiato l'impianto nel caso di funzionamento in sola modalità heating o cooling, così da analizzare eventuali esaurimenti o riduzioni dell'efficienza dell'impianto nel corso di più anni di esercizio.

Con la disponibilità di dati misurati in sito, sono inoltre possibili una calibrazione del modello e una descrizione quantitativa più aderente alla realtà, meno legata alle ipotesi introdotte.

BIBLIOGRAFIA

- Adam, D., & Markiewicz, R. (2002). Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke. *Österr. Ing. Archit. Z.* 147 , p. 4-6.
- Adjali, M., Davies, M., & Rees, S. (2004). A comparative study of design guide calculations and measured heat loss through the ground. *Building and Environment* 39 , p. 1301-1311.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. (1993). *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE.
- ARPA Lombardia. (s.d.). Tratto da www.arpalombardia.it.
- Association des Ingénieurs de Climatisation et de Ventilation de France. (1990). *AICVF Guide: Chauffage-Calculs des déperditions et charges thermiques d'hiver*. Paris: Pyc Edition.
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique* 56 , n° 2, p. 81-122.
- Buratti, C. (s.d.). Impianti di riscaldamento: criteri di progetto. digilander.libero.it .
- CEN, European Committee for Standardisation. (1992). *Thermal performance of buildings – heat exchange with the ground – calculation method*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Chartered Institution of Building Services Engineers. (1986). *CISBE Guide A3: thermal properties of buildings structures*. London.
- Citrini, D., & Nosedà, G. (1987). *Idraulica*. Casa Editrice Ambrosiana.
- Corigliano, A., & Taliercio, A. *Meccanica computazionale - Soluzione del problema elastico lineare*. Progetto Leonardo.
- Incropera, F. P., De Witt, D. P., Bergman, T., & Lavine, A. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley.
- Inzoli, F., & Dassù, G. (2003b). *Lezioni di fisica tecnica - Termodinamica*. CUSL.
- Inzoli, F., & Dassù, G. (2003a). *Lezioni di fisica tecnica - Trasmissione del calore*. CUSL.
- Janssen, H., Carmeliet, J., & Hens, H. (2004). The influence of soil moisture transfer on building heat loss via the ground. *Building and Environment* 39 , p. 825-836.
- Krarti, M., & Choi, S. (1996). Simplified method for foundation heat loss calculation. In *ASRAE Transaction* (p. 102; 140-52).
- Legambiente, 2012. *Comuni rinnovabili 2012*.
- Lewis, R. W., Nithiarasu, P., & Seetharamu, K. N. (2004). *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. John Wiley & Sons, Ltd.

Lund, J., Freeston, D., & Boyd, T. (2005). Direct application of geothermal energy 2005: worldwide review. *Geothermics* , 691-727.

Thomas, H., & Rees, S. (2009). Measured and simulated heat transfer to foundation soils. *Géotechnique* 59 , n° 4, p. 365-375.

Unione Geotecnica Italiana. (2007). *La geotermia - Ieri, oggi e domani*. ETS.