

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ENERGETICA

D.I.N.

Dipartimento di Ingegneria Industriale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

in

ingegneria energetica

**SOSTENIBILITÀ DI CAMPI DI SONDE GEOTERMICHE IN ASSENZA DI
MOVIMENTO DELL'ACQUA DI FALDA**

CANDIDATO:
Bistosini Beatrice

RELATORE:
Zanchini Enzo

CORRELATORE:
Lazzari Stefano

Anno Accademico 2012/2013

Sessione III

Indice

Introduzione	pag.3
CAPITOLO I - LE POMPE DI CALORE GEOTERMICHE	pag.5
I.1 Funzionamento invernale e estivo di una pompa di calore geotermica	pag.5
I.2 Tipi di pompe di calore geotermiche	pag.6
I.3 Prestazioni di una pompa di calore geotermica	pag.12
CAPITOLO II - TEST DI RISPOSTA TERMICA	pag.15
II.1 Misura della temperatura di terreno indisturbato	pag.16
II.2 Fase di riscaldamento	pag.17
II.3 Il metodo line heat source	pag.18
II.4 Il metodo cylindrical heat source	pag.20
II.5 Metodi numerici per l'interpretazione dei Test di Risposta Termica	pag.21
CAPITOLO III - METODI DI DIMENSIONAMENTO DI CAMPI DI SONDE GEOTERMICHE	pag.23
III.1 Il metodo ASHRAE	pag.23
III.2 Sostenibilità nel lungo termine dei campi di sonde geotermiche in assenza di movimento dell'acqua di falda: i problemi del metodo ASHRAE	pag.27
CAPITOLO IV - SOSTENIBILITA' NEL LUNGO PERIODO DI CAMPI DI SONDE GEOTERMICHE IN ASSENZA DI MOVIMENTO DELL'ACQUA DI FALDA: 1° METODO	pag.32
IV.1 Il modello numerico	pag.32
IV.2 Le equazioni del modello numerico	pag.32
IV.3 Gli effetti dei carichi termici mensili	pag.34
IV.4 Esempi di calcolo degli effetti dei carichi termici mensili sull'evoluzione della temperatura media della sonda centrale del campo	pag.36

IV.5 Analisi degli effetti prodotti dalla presenza delle altre sonde sull'evoluzione della temperatura media della sonda centrale del campo	pag.59
IV.6 Esempio di analisi di un campo costituito da tre sonde disposte lungo una singola linea	pag.60
IV.7 Criticità del metodo	pag.63
CAPITOLO V - SOSTENIBILITA' NEL LUNGO PERIODO DI CAMPI DI SONDE GEOTERMICHE IN ASSENZA DI MOVIMENTO DELL'ACQUA DI FALDA: 2° METODO	pag.65
V.1 Il modello e le equazioni che lo compongono	pag.65
V.2 Implementazione del modello ed espressioni analitiche della temperatura adimensionale prodotta dal carico lineare unitario costante $H(\tau^*)$	pag.69
V.3 Temperatura adimensionale prodotta da un carico termico costante per ciascun mese, ma diverso per i vari mesi: sonda singola	pag.79
V.4 Temperatura adimensionale all'interfaccia sonda-terreno, per un campo di tre sonde in linea	pag.82
Conclusione	pag.85
Bibliografia	pag.86

Introduzione

La crisi petrolifera degli anni '70 mise in evidenza i problemi legati al rapporto tra aumento demografico – sviluppo economico – disponibilità limitata dei combustibili fossili – inquinamento ambientale. Proprio in quegli anni iniziarono a svilupparsi le idee ecologiste e cominciarono ad essere studiate in modo più approfondito le conseguenze in ambito sanitario indotte dall'inquinamento.

L'aumento del costo dei carburanti fossili e la questione del rifornimento energetico legato alla loro disponibilità limitata portarono ad introdurre il concetto di risparmio energetico e negli anni '80 quello di sviluppo sostenibile. Si prese dunque coscienza del fatto che molti problemi ambientali sono dovuti ad un uso inappropriato delle risorse naturali e si iniziò a ricercare nuove soluzioni.

Nonostante ciò, negli ultimi trent'anni l'uso globale annuo di energia primaria ha avuto un incremento del 70%, raggiungendo oggi quota 11,3 GTEP, e si prevede che nei prossimi anni tale dato continuerà a crescere, spinto dallo sviluppo economico di nazioni emergenti, come Cina e India, e dall'aumento demografico globale. Le fonti primarie sono costituite, in larga maggioranza (80%), da combustibili fossili. La principale conseguenza dell'uso massiccio di petrolio, carbone e gas naturale è l'emissione di gas serra nell'atmosfera, e, in particolar modo quella di CO₂.

Ridurre l'uso dei combustibili fossili dunque rappresenta un importante obiettivo per salvaguardare la salute dell'uomo e del pianeta. Lo sviluppo e la promozione di nuove tecnologie basate sullo sfruttamento di fonti energetiche rinnovabili sono le direzioni su cui oggi si punta per cercare di raggiungere tale obiettivo.

Nonostante però la rapidità del progresso scientifico e tecnologico e l'impegno dei paesi industrializzati ad incentivare l'uso delle fonti energetiche alternative, dovranno passare ancora molti anni prima che esse riescano a soddisfare una quota significativa del fabbisogno energetico. Vi sono infatti alcune limitazioni al loro sviluppo. Innanzitutto occorre riuscire a produrre energia in modo competitivo, dal punto di vista economico, rispetto alle fonti energetiche tradizionali. Inoltre, affinché le fonti energetiche alternative siano vantaggiose, è necessario che esse diventino concentrabili, immagazzinabili e trasportabili, in modo tale da riuscire a soddisfare grandi richieste energetiche anche in luoghi diversi da quelli in cui avviene la produzione di energia. Un altro importante fattore che impedisce la loro diffusione su larga scala è il fatto di essere discontinue. Questo infatti fa sì che nel momento in cui vi sia un picco della domanda energetica non ci sia la sicurezza di riuscire a produrre la quantità di energia richiesta.

Circa il 50% dell'energia primaria prodotta a livello mondiale viene impiegata nell'edilizia. Le abitazioni necessitano infatti di molta energia per produrre riscaldamento, climatizzazione, illuminazione e acqua calda sanitaria. Proprio questo settore è quello su cui oggi ci si concentra maggiormente per ridurre i consumi ed è anche quello in cui i sistemi basati sullo sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili trovano la loro principale applicabilità. Impiegando infatti collettori solari, impianti a biomassa o geotermici per fornire l'energia termica necessaria al riscaldamento interno dell'edificio e pannelli fotovoltaici o sistemi di mini eolico per produrre l'energia elettrica che vi occorre, è possibile realizzare case energeticamente autosufficienti che riducono le emissioni dei gas inquinanti.

Per quanto riguarda il riscaldamento e la climatizzazione domestica, sempre maggior interesse stanno suscitando le Ground Source Heat Pumps (GSHPs) o “pompe di calore geotermiche”. Tali sistemi permettono l'uso della cosiddetta geotermia a bassa entalpia e necessitano per il loro

funzionamento di una sorgente di calore a bassa temperatura (come terreno, acqua di falda o acque superficiali di laghi e stagni) e di energia elettrica. Impiegando scambiatori di calore di geometria opportuna, il calore viene estratto durante l'inverno dalla sorgente termica e ceduto a quest'ultima in estate.

In base alla sorgente termica utilizzata e al tipo di scambiatori usato, vi sono vari tipi di sistemi. Il più diffuso è costituito dalle Ground Coupled Heat Pumps (GCHPs), o "pompe di calore accoppiate al terreno". In questa tipologia di impianti lo scambio termico avviene con il sottosuolo e lo scambiatore di calore è costituito da un circuito di tubazioni posto nel terreno, che può avere geometria verticale o orizzontale. La disposizione verticale è quella più impiegata, perché permette di ottenere rendimenti più elevati.

Gli scambiatori di calore verticali sono denominati Borehole Heat Exchangers (BHEs) o, in italiano, "sonde geotermiche verticali". Il terreno viene perforato mediante trivellazione, fino ad una profondità che varia tra 30 e 200 m, e nei fori vengono immessi uno o due tubi a U in polietilene, all'interno dei quali circola un fluido termovettore. Mediante malte di materiale opportuno, questi fori vengono poi sigillati.

Il progetto di un campo di sonde geotermiche avviene oggi principalmente attraverso il metodo raccomandato dall'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Questo metodo permette di dimensionare la lunghezza delle sonde facendo riferimento a un periodo di 10 anni e non considerando il movimento dell'acqua di falda.

Recenti studi, che verranno descritti nell'ambito di questa Tesi di laurea, hanno però messo in evidenza che questo metodo di progetto non riesce a garantire la sostenibilità nel lungo termine di campi di sonde sottoposti a carichi termici stagionali di tipo non bilanciato.

Per una singola sonda, dimensionata con questo metodo, sottoposta a carichi termici stagionali completamente non bilanciati, la sostenibilità nel lungo termine è stata verificata sia teoricamente che sperimentalmente sia in presenza che in assenza di movimento di acqua di falda. Se si considerano invece campi costituiti da molte sonde, quando esse vengono sottoposte a carichi termici stagionali parzialmente o totalmente non bilanciati, in assenza di movimento dell'acqua di falda, le condizioni in cui il sistema si trova ad operare possono diventare critiche in alcuni decenni. Nell'ambito della seguente Tesi verranno illustrati due metodi che permettono di valutare il comportamento nel lungo termine di campi di sonde geotermiche sottoposti a carichi non bilanciati, in assenza di movimento dell'acqua di falda. Tali metodi permettono entrambi di determinare, per un periodo di 50 anni, l'evoluzione nel tempo della temperatura di interfaccia tra il terreno e la sonda centrale del campo sonde, che è quella che si trova ad operare in condizioni più critiche, poiché subisce l'interferenza termica prodotta dalla presenza di tutte le altre sonde. In entrambi i metodi, il carico termico considerato ha periodo un anno e viene costruito mediante sovrapposizione temporale di dodici carichi termici costanti di durata un mese ciascuno. I risultati che si ottengono vengono dati in forma adimensionale e permettono di determinare, trasformandoli in forma dimensionale, l'evoluzione nel tempo della temperatura del terreno a contatto con la sonda più critica del campo e di stabilire, di conseguenza, se vi sono o no le condizioni di sostenibilità nel lungo termine.

I due metodi presentati costituiscono un punto di partenza per la progettazione e l'ottimizzazione di campi di sonde geotermiche.

CAPITOLO I

LE POMPE DI CALORE GEOTERMICHE

Le pompe di calore geotermiche o in inglese Ground Source Heat Pumps (GSHPs), sono sistemi che permettono il riscaldamento invernale e la refrigerazione estiva degli ambienti e la produzione di acqua calda sanitaria. Possono essere utilizzate sia per applicazioni di piccola scala, come singole abitazioni, o di medio-grande scala, come condomini e industrie.

Vi sono varie tipologie di sistemi in base alla sorgente termica utilizzata, che può essere il terreno, l'acqua di falda o gli specchi d'acqua superficiali, come laghi e stagni.

Poiché il suolo assorbe circa la metà dell'energia solare che arriva sulla Terra, esso può essere considerato una sorta di serbatoio energetico. Analizzandone gli strati superficiali, fino a una profondità di circa 100 m, la temperatura risulta essere costante durante tutto l'anno, a differenza dell'aria ambiente, la cui temperatura varia invece con le stagioni. Ne deriva che il sottosuolo, l'acqua di falda e le acque superficiali di laghi e stagni sono più caldi dell'aria ambiente in inverno e più freddi invece d'estate. Tale energia solare accumulata nel terreno può così essere sfruttata mediante le pompe di calore geotermiche.

I.1 Funzionamento invernale e estivo di una pompa di calore geotermica

Una pompa di calore è un sistema costituito da un compressore, un condensatore, una valvola di espansione e un evaporatore. All'interno di tali componenti circola un fluido, in genere acqua o una miscela di acqua e anticongelante, il quale subisce cambiamenti di stato e permette gli scambi termici tra l'ambiente interno da riscaldare o raffreddare e il serbatoio termico in cui il calore viene assorbito o espulso.

Caratteristica principale del sistema è la reversibilità: infatti grazie alla presenza di un'opportuna valvola è possibile scambiare il condensatore con l'evaporatore e viceversa, e quindi riscaldare o raffreddare i locali interni di un edificio.

Se la pompa di calore è utilizzata per produrre riscaldamento, il fluido assorbe calore dal serbatoio termico per poi cederlo all'ambiente interno. Durante l'estate invece, il calore viene prelevato dall'ambiente interno che si vuol raffrescare e poi espulso nel serbatoio termico. In entrambi i casi si ha comunque trasferimento di calore da un ambiente a temperatura maggiore verso uno a temperatura minore.

Descrivendo il funzionamento del sistema più in dettaglio, si ha che il fluido in stato di vapore entra in un compressore, che ne aumenta pressione e temperatura, e percorre in seguito un condensatore, dove da vapore surriscaldato esce allo stato liquido, cedendo calore all'ambiente interno (funzionamento invernale) o all'ambiente esterno (funzionamento estivo). Successivamente, passando attraverso una valvola di espansione, temperatura e pressione vengono fortemente diminuiti, e entrando poi all'interno di un evaporatore, il fluido dallo stato di liquido a bassa temperatura e pressione assorbe calore (dall'ambiente esterno se il funzionamento è invernale o dall'ambiente interno da raffreddare se estivo) tornando così allo stato di vapore (fig.1).

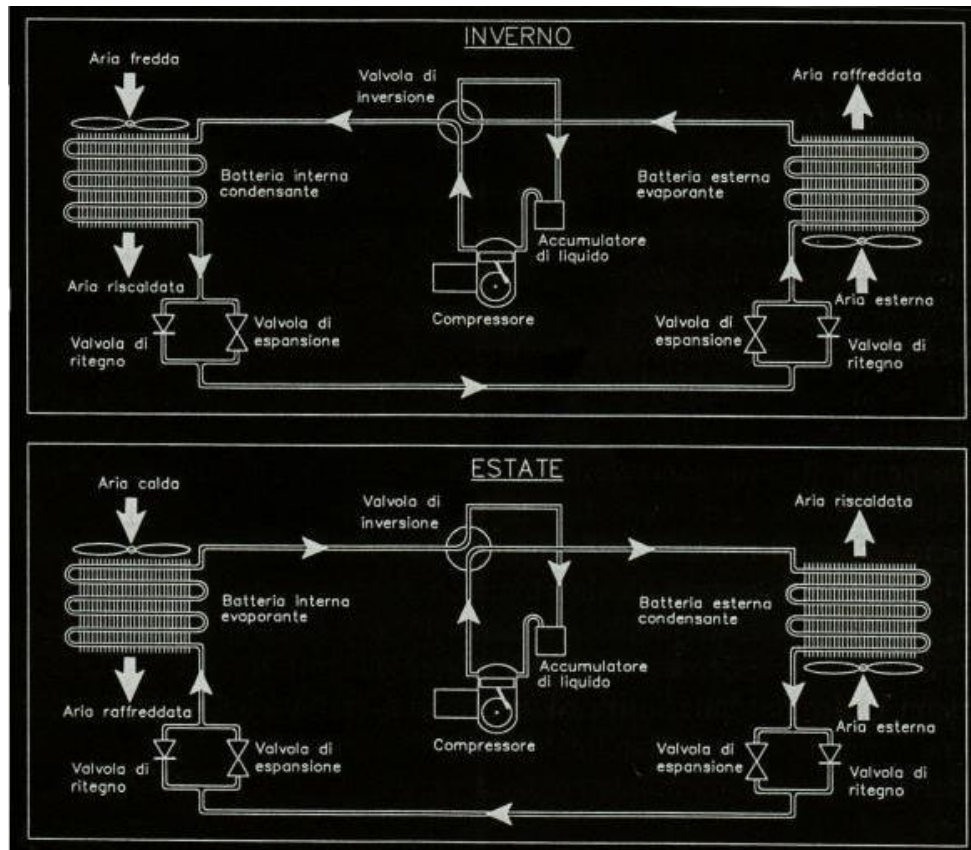


Fig.1 Funzionamento invernale e estivo di una pompa di calore

In base ai tipi di sorgente termica utilizzati, le pompe di calore sono classificate in quattro diversi tipi:

- pompe di calore aria-aria, dove sia la sorgente termica esterna che quella interna sono costituite da aria;
- pompe di calore aria-acqua, dove la sorgente termica esterna è costituita dall'aria ambiente, ma lo scambio termico con l'ambiente interno è realizzato mediante acqua che circola in appositi scambiatori;
- pompe di calore acqua-acqua, dove entrambe le sorgenti termiche sono costituite da acqua (all'esterno, acqua di fiume, o di lago, o di mare, o di falda);
- pompe di calore terreno-acqua, dove la sorgente esterna è costituita dal terreno.

Le pompe di calore dove la sorgente termica esterna è costituita dal terreno, o da acqua di falda, o da acqua superficiale sono comunemente chiamate "pompe di calore geotermiche". La terminologia è impropria, perché questi sistemi sono estremamente poco influenzati dal gradiente geotermico e dal flusso di energia proveniente dall'interno della crosta terrestre. Tuttavia, la terminologia è molto diffusa e sarà quindi anche qui accettata.

I.2 Tipi di pompe di calore geotermiche

In base alla sorgente termica sfruttata, l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) ha suddiviso le pompe di calore geotermiche, chiamate Ground Source Heat Pumps (GSHPs), in tre gruppi con la seguente nomenclatura:

- Ground Coupled Heat Pumps (GCHPs) o pompe di calore accoppiate al terreno;
- Groundwater Heat Pumps (GWHPs) o pompe di calore ad acqua di falda;
- Surface Water Heat Pumps (SWHPs) o pompe di calore ad acqua superficiale.

Il primo gruppo, costituito dalle Ground Coupled Heat Pumps (GCHPs), è il più diffuso. Poiché in questo caso la sorgente termica da utilizzare è quella del suolo, lo scambiatore collegato alla pompa di calore è un circuito di tubazioni posto nel terreno. Esso può avere geometria verticale o orizzontale e in base a questa caratteristica le GCHPs vengono distinte in GCHPs verticali (fig.2) e GCHPs orizzontali (fig.3). In entrambi i casi il circuito dello scambiatore è chiuso e il fluido termovettore che vi circola (che può essere acqua o una miscela di acqua e glicole etilenico, un anticongelante non tossico) ha la sola funzione di trasferire calore dal suolo al circuito della pompa di calore e viceversa.

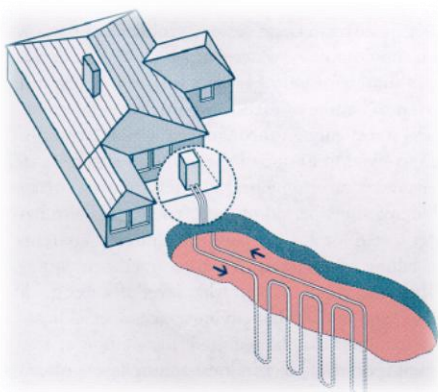


Fig.2 GCHP verticale

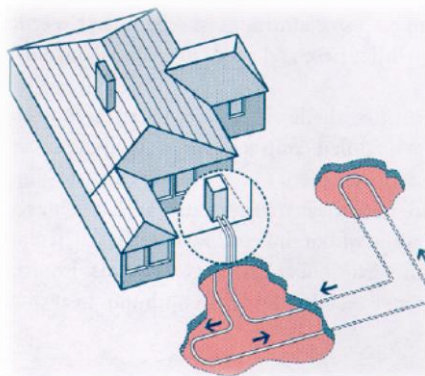


Fig.3 GCHP orizzontale

Gli scambiatori di calore verticali, detti in inglese Borehole Heat Exchangers (BHEs) e in italiano sonde geotermiche, possono avere varie configurazioni. I più usati sono quelli a singolo (fig.4) o doppio (fig.5) tubo a U e quelli a tubi coassiali (fig.6). Il primo tipo è quello più tradizionale: le sonde sono formate da una o due coppie di tubi, uno di mandata e uno di ritorno, ciascuna delle quali è collegata nella parte terminale formando un tubo a U. I tubi sono di materiale plastico (polietilene ad alta densità). Quelle di tipo coassiale presentano invece un tubo interno di ritorno in polietilene ad alta densità o in polipropilene (PPR 80) e un tubo esterno di mandata in acciaio.

Per le sonde geotermiche a tubi a U, i tubi hanno diametro esterno compreso tra 30 e 40 mm, e vengono posti nel terreno all'interno di fori, praticati da macchine perforatrici, la cui profondità varia da 30 a 200 m. Una volta inseriti i tubi, i fori trivellati devono essere sigillati per evitare che le acque di falda più profonde e pure vengano inquinate dalle acque che si trovano invece più in superficie. Viene utilizzata a questo scopo una malta sigillante, costituita da una miscela di betonite, cemento e sabbia o da materiali sigillanti speciali, come il termoplast, a conducibilità termica più elevata.

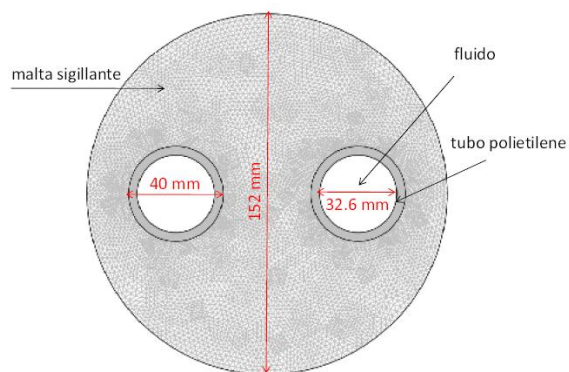


Fig.4 Sezione di una sonda geotermica con singolo tubo

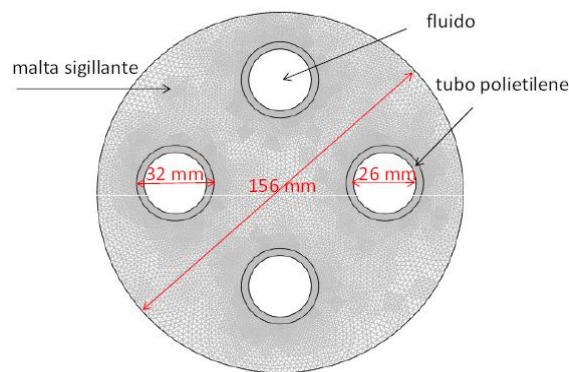


Fig.5 Sezione di una sonda geotermica con doppio tubo a U

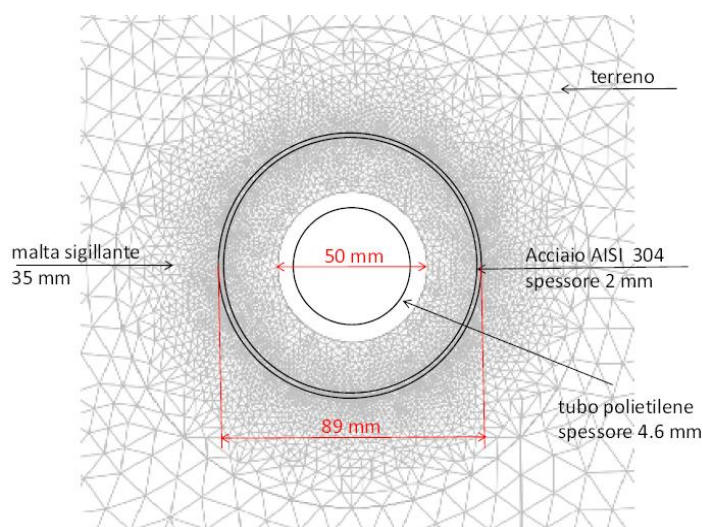


Fig.6 Sezione di una sonda geotermica coassiale

Il numero di scambiatori utilizzati, a lunghezza fissata, dipende dall'energia termica richiesta e dalle caratteristiche del terreno. Gli impianti possono essere di diverso tipo: ci può essere un'unica pompa di circolazione che alimenta più gruppi di sonde collegate in parallelo, le quali sono a loro volta connesse in parallelo a più pompe di calore, oppure si possono usare una pompa di circolazione e una pompa di calore per ciascun gruppo di sonde. In alcuni casi però, quando ad esempio le sonde sono molto corte, è possibile anche porle in serie.

Il principale vantaggio di questi sistemi è il fatto che gli scambiatori verticali sono a contatto con strati di terreno a temperatura costante durante tutto l'anno, non influenzata dalle variazioni della temperatura esterna. Inoltre, poiché essi si sviluppano in profondità, le aree di terreno necessarie per l'installazione sono poco estese. L'energia elettrica richiesta dal pompaggio è più bassa di quella richiesta dai sistemi con scambiatori orizzontali, e questo rende massima l'efficienza delle pompe di calore. L'aspetto negativo è però rappresentato dal costo elevato della perforazione del suolo, che richiede attrezzature e manodopera adeguate.



Fig.7 Installazione di una sonda geotermica con doppio tubo a U

Gli scambiatori di calore con il terreno di tipo orizzontale vengono interrati a circa 1-2 m di profondità. Sono costituiti da materiale plastico e percorsi da una soluzione di acqua e antigelo. Possono avere tre configurazioni:

- tubo singolo (fig.8), in cui un unico tubo viene posto nel terreno occupandone però un'ampia area;
- tubi multipli (fig.9), dove in un unico solco vengono inseriti due o quattro tubi a diverse profondità, distanziati tra loro di 30-40 cm, riducendo così la superficie necessaria per l'installazione;
- tubo a spirale (fig.10), in cui lo scambiatore è formato da più rami di tubi in polietilene in parallelo, ciascuno dei quali è avvolto a spirale, posta orizzontalmente o verticalmente, così da diminuire ulteriormente la porzione di terreno occupato.

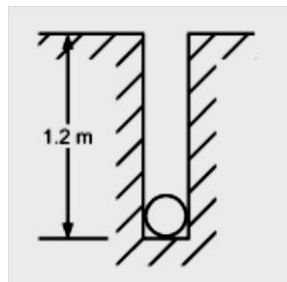


Fig.8 Tubo singolo

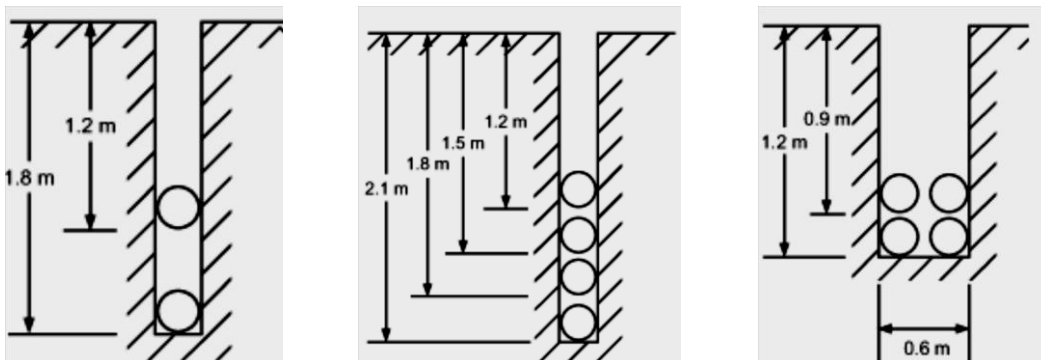


Fig.9 Tubi multipli

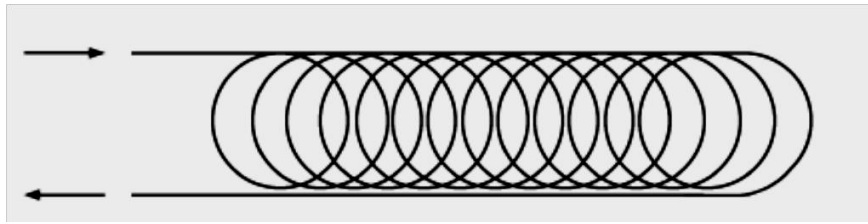


Fig.10 Tubo a spirale

La lunghezza del circuito dipende dalle esigenze termiche dell'edificio (come ordine di grandezza, la lunghezza è di circa 35-55 m per kW di potenza dell'impianto). All'aumentare del numero di tubi posti nello stesso solco diminuisce l'estensione superficiale dell'impianto ma aumentano le dimensioni dello scavo, in profondità se i tubi sono sovrapposti o in larghezza se sono affiancati, per evitare le interferenze termiche. Considerando lo scambiatore a spirale, se da un lato l'area di terreno occupata diminuisce, dall'altro aumenta la lunghezza del tubo stesso e questo comporta un maggior consumo di energia elettrica per il pompaggio.

La maggior parte delle installazioni GCHPs orizzontali sono costituite da circuiti di tubi posti in parallelo. Così infatti, rispetto al collegamento in serie, diminuisce la potenza richiesta per alimentare la pompa. Inoltre, nonostante il numero di tubi sia maggiore rispetto alla connessione in serie, essi hanno dimensione minore e questo comporta minor quantità di fluido termovettore necessario e costi più bassi.

Il principale vantaggio di questi sistemi è proprio il basso costo di installazione, in quanto non è necessaria una perforazione del terreno ma una semplice escavazione. Gli aspetti negativi sono soprattutto due: l'ampia area di terreno necessaria e l'influenza delle fluttuazioni termiche stagionali, che fanno diminuire l'efficienza del sistema.



Fig.11 GCHP orizzontale con tubo singolo



Fig.12 GCHP orizzontale con tubo a spirale

La seconda tipologia di impianti è costituita dalle Groundwater Heat Pumps (GWHPs). In questo caso l'acqua di falda, oltre ad essere la sorgente termica, funge anche da fluido termovettore. Vengono realizzati due pozzi, uno di estrazione e uno di reiniezione dell'acqua di falda. Essa viene così prelevata e inviata a uno scambiatore connesso alla pompa di calore e viene poi pompata nuovamente in falda, percorrendo così un circuito aperto. L'acqua di alimentazione viene prelevata dal fondo del primo pozzo mentre quella di ritorno viene pompata sulla superficie del secondo (fig.13).

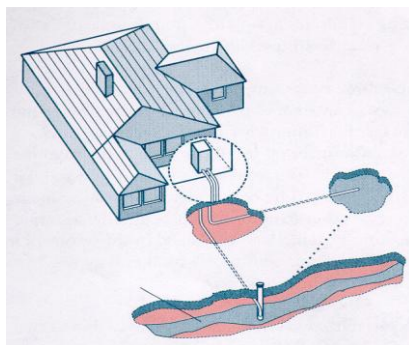


Fig.13 Schema GWHP

E' necessario analizzare la qualità dell'acqua di falda, affinché non si manifestino problemi di incrostazioni e corrosione dei dispositivi che compongono l'impianto, e verificarne la quantità disponibile.

Si possono avere principalmente due configurazioni di impianti: la prima prevede uno scambiatore di calore centrale di tipo acqua-acqua tra l'acqua di falda e il circuito chiuso collegato alla pompa di calore acqua-aria o acqua-acqua posta nell'edificio, la seconda in cui l'acqua di falda circola direttamente nella pompa di calore.

Per quanto riguarda i costi di questo tipo di impianti, confrontandoli con i sistemi GCHPs, essi risultano essere inferiori. Sebbene le GCHPs siano più semplici da gestire e per questo sono le più utilizzate, il loro costo cresce all'aumentare della potenza dell'impianto. Nelle GWHPs invece al crescere della potenza il costo dell'impianto per ogni kW di potenza si riduce. Questo fa sì che questi sistemi siano più adatti al settore commerciale piuttosto che alle abitazioni.

I vantaggi delle GWHPs sono soprattutto i bassi costi dell'impianto e dell'installazione rispetto agli altri sistemi e gli spazi più contenuti. Gli svantaggi sono invece sostanzialmente tre:

- sono utilizzabili solo dove si ha una risorsa idrica sotterranea di buona qualità e non troppo profonda, facilmente raggiungibile;
- la diversa temperatura dell'acqua di ritorno rispetto a quella prelevata deve rispettare delle precise normative;
- limitazioni all'utilizzo dell'acqua di falda, che ne vincolano lo sfruttamento.



Fig.14 Esempio di impianto GWHP per uso abitativo

Il terzo gruppo di impianti geotermici è costituito dalle Surface Water Heat Pumps (SWHPs). Possono essere a circuito aperto, se è l'acqua dei laghi o degli stagni a essere pompata direttamente alla pompa di calore acqua-aria o acqua-acqua o a uno scambiatore di calore intermedio, oppure a

circuito chiuso, se cioè viene invece utilizzato un opportuno fluido termovettore costituito da acqua e anticongelante.

Il circuito di scambio termico, posto sul fondo dello specchio d'acqua (fig.15), è costituito da più avvolgimenti di tubi a spirale in polietilene a alta densità posti tra loro in parallelo di diametro compreso tra $\frac{3}{4}$ e 1 inch.

Poiché le acque superficiali possono contenere dendriti e agenti corrosivi la scelta del circuito aperto presuppone un filtraggio dell'acqua. Inoltre proprio a causa di queste sostanze è necessario utilizzare dei materiali di protezione esterna per i tubi sommersi nell'acqua.



Fig.15 Esempio impianto SWHP

Gli scambiatori a bobina consentono ingombri poco vasti degli specchi d'acqua, anche se una eccessiva concentrazione della zona di scambio può portare a disturbi termici.

Il principale vantaggio delle SWHPs è il costo contenuto di installazione, in quanto non sono richiesti scavi e perforazioni del terreno. Questi sistemi sono utilizzabili però solo dove vi è la presenza di uno specchio d'acqua superficiale di opportune dimensioni; inoltre, il fatto che lo scambiatore è sommerso nell'acqua ne comporta una maggior esposizione alla possibilità di danneggiamenti. Le fluttuazioni termiche dell'acqua possono influire sull'efficienza dell'impianto, soprattutto nei periodi più freddi e più caldi.



Fig.16 Esempio di SWHP posto in un lago

I.3 Prestazioni di una pompa di calore geotermica

La pompa di calore sia durante l'inverno che l'estate trasferisce calore da un ambiente a temperatura più bassa a uno a temperatura più alta. E' necessario però fornire lavoro dall'esterno, sotto forma di energia elettrica. Le prestazioni del sistema si esprimono mediante due coefficienti

adimensionali: il *COP* (Coefficient of Performance) e l'*EER* (Energy Efficiency Ratio): il primo si riferisce a quando l'impianto è usato per produrre riscaldamento, il secondo per raffreddamento. Si indichino con T_1 e T_2 le temperature dell'ambiente caldo e dell'ambiente freddo, con Q_1 il calore ceduto alla sorgente calda, con Q_2 il calore sottratto alla sorgente fredda e con W il lavoro assorbito, cioè l'energia elettrica consumata.

Nel funzionamento estivo, si ha:

$$EER = \frac{Q_2}{W}$$

$$EER_{max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

dove EER_{max} è il valore massimo dell'*EER*, ottenibile nel limite di ciclo reversibile.

Nel funzionamento invernale, si ha:

$$COP = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_2 + W}{W} = EER + 1$$

$$COP_{max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} + 1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

Si nota subito che l'efficienza della pompa di calore è fortemente dipendente dalla differenza di temperatura tra la sorgente termica e l'ambiente da riscaldare o raffreddare. Infatti se la differenza $T_1 - T_2$ tende a 0, sia il COP_{max} che l' EER_{max} tendono a infinito.

In Italia la temperatura del terreno per i primi 100 m di profondità, zona in cui si è già detto essere circa costante durante tutto l'anno, è compresa tra i 12 e i 16 °C. Questo consente di ottenere buone prestazioni termiche sia durante il periodo del riscaldamento, quando le temperature del fluido termovettore in ingresso ai pannelli radianti a pavimento è di 30 - 35 °C, sia in estate, quando la temperatura del fluido termovettore, per il raffrescamento a pannelli radianti, è 16 - 20 °C.

Le GCHPs verticali e orizzontali hanno in genere un COP compreso tra 4 e 5, mentre le GWHPs e le SWHPs tra 3,5 e 5,5.

Per le GCHPs, poiché il calore viene estratto e ceduto al terreno per conduzione, un fattore che influenza notevolmente le prestazioni e l'economicità del sistema è la conducibilità termica del terreno, che dipende dal tipo di sottosuolo in cui si effettua l'installazione. In particolare, la lunghezza complessiva dello scambiatore necessaria per erogare la potenza richiesta risulta minore dove la conducibilità termica del terreno è maggiore.

Per l'installazione di un impianto a pompa di calore accoppiata al terreno è dunque necessario conoscere le caratteristiche del sottosuolo che si intende utilizzare.

Valori medi della conducibilità termica di vari tipi di terreno e corrispondenti valori orientativi della potenza massima di picco scambiabile con il terreno sono riportati nella tabella 1.

Tipo di sottosuolo	Conducibilità termica (W/m×K)	Potenza massima scambiabile (W/m)
Rocce mobili secche	< 1,5	< 25
Rocce indurite o rocce mobili sature d'acqua	1,5 - 3	60
Rocce indurite a alta conducibilità termica	> 3	84
Ghiaia, sabbia secche	0,4	< 25
Ghiaia, sabbia sature d'acqua	1,8 - 2,4	65 - 80
Calcere massiccio	2,8	55 - 70
Arenaria	2,3	65 - 80
Granito	3,4	65 - 85
Gneiss	2,9	70 - 85

Tabella 1: Conducibilità termica e potenza massima scambiabile per i vari tipi di terreno

CAPITOLO II

TEST DI RISPOSTA TERMICA

Il tipo di impianti che d'ora in poi verranno presi in considerazione sono le pompe di calore accoppiate al terreno (GCHPs) verticali.

Per dimensionare un campo di sonde geotermiche è necessario conoscere le proprietà termofisiche del terreno nel quale si vogliono impiantare tali scambiatori e della malta sigillante utilizzata, cioè conducibilità termica e diffusività termica.

Il tipo di materiali e la geometria della sezione trasversale con cui viene realizzata la malta sigillante influenzano il valore della resistenza termica interna della sonda. Come già accennato nel capitolo precedente, le malte sono costituite in genere da miscele di betonite e cemento o da materiali più innovativi, come il termoplast. La loro conducibilità termica è spesso nota e certificata e questo permette di determinare la resistenza termica della sonda con un semplice calcolo. Quando però i materiali utilizzati sono diversi da quelli appena citati o sono miscelati con percentuali diverse rispetto alle comuni malte impiegate, per determinare il valore della resistenza termica è necessario ricorrere a codici di calcolo numerici.

Le proprietà conducibilità termica e diffusività termica sono legate dalla seguente relazione:

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

α = diffusività termica

k = conducibilità termica

ρ = densità del materiale

c_p = calore specifico a pressione costante del materiale

Per dimensionare la lunghezza delle sonde geotermiche da installare è necessario conoscerne il valore sia per il terreno che per la malta sigillante, come già detto. Per determinarle si esegue un Test di Risposta Termica (TRT), cioè una prova sperimentale in cui si utilizza una sonda test e il seguente circuito (fig.17):

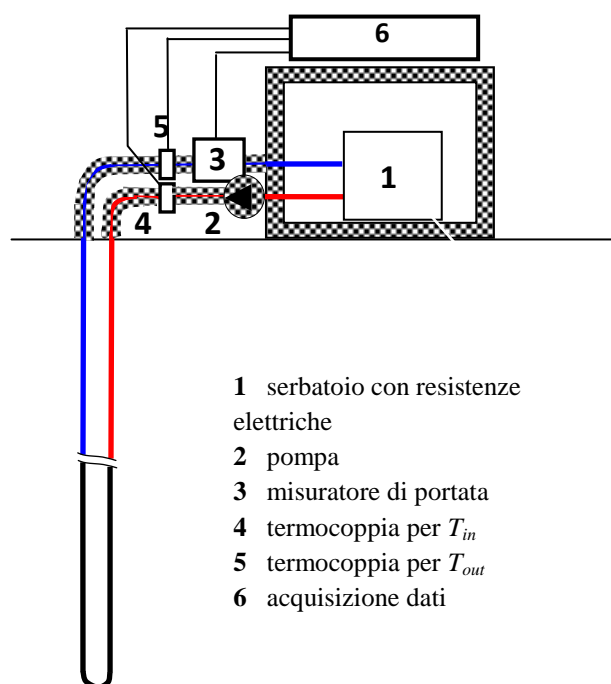


Fig.17 Circuito di prova utilizzato per eseguire un TRT

Sia il sistema da utilizzare che la procedura del test sono state stabilite dall'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Esso si compone di due fasi: innanzitutto si misura la temperatura di terreno indisturbato facendo circolare l'acqua nella pompa e successivamente si inizia il test vero e proprio attivando le resistenze e fornendo al circuito una potenza costante. Da questa seconda parte, detta anche fase di riscaldamento, attraverso le misure effettuate è possibile applicando metodi analitici o numerici ricavare le proprietà termofisiche del terreno e della malta.

II.1 Misura della temperatura di terreno indisturbato

La temperatura di terreno indisturbato, indicata con T_g , è il valore medio della temperatura del suolo considerando la profondità che va dalla superficie fino alla lunghezza raggiunta dalla sonda test posta nel terreno. Essa viene misurata prima dell'inizio del test ed è un dato importante necessario per poter poi interpretare i risultati del TRT.

Se si trascura la presenza dell'acqua di falda o se questa è assente, la temperatura del terreno all'aumentare della profondità presenta le seguenti caratteristiche:

- fino a 7-8 m, cioè negli strati superficiali, subisce l'influenza dei cambiamenti stagionali e risulta quindi essere variabile durante l'anno;
- a circa 10 m è più o meno costante durante tutto l'arco dell'anno e pari alla temperatura media annua della località in esame;
- da 10-20 m in poi aumenta con un gradiente geotermico di 1 °C ogni 33 m.

La presenza dell'acqua di falda ha l'effetto di ridurre la profondità dello strato superficiale di temperatura variabile durante l'anno e le regolarità con cui la temperatura si distribuisce nei vari strati.

Per determinare il valore della temperatura di terreno indisturbato T_g , la sonda geotermica viene riempita d'acqua alcuni giorni prima dell'inizio del test così che essa possa portarsi in equilibrio termico con il terreno. Si può poi procedere in due diversi modi:

- il primo metodo consiste nel misurare la temperatura dell'acqua nella sonda alle varie profondità utilizzando un freatimetro. I valori raccolti vengono poi mediati e da tale calcolo si ricava T_g . Questo procedimento è però in genere sconsigliato: infatti il freatimetro con cui si effettuano le misure può restare incastrato nella sonda e rompersi;
- nel secondo metodo invece, a resistenze spente, l'acqua del circuito viene messa in circolazione con una pompa e vengono misurate e registrate a intervalli di tempo prestabiliti la temperatura dell'acqua in ingresso e in uscita dalla sonda per un certo tempo. Successivamente i valori della temperatura in uscita misurati vengono mediati e si ottiene T_g . L'utilizzo di questo metodo si preferisce rispetto all'altro. Visualizzando però gli andamenti delle temperature di ingresso e di uscita si nota che esse hanno valori fluttuanti, per via dell'immissione continua di acqua fredda nella sonda, e crescenti nel tempo. Questa seconda caratteristica è dovuta alla pompa che mettendo in circolazione l'acqua nella sonda fornisce calore. Per non commettere allora errori nella valutazione di T_g è necessario che il tempo di misura non sia eccessivamente lungo.

Determinata la temperatura di terreno indisturbato si procede con la seconda fase del TRT, quella di riscaldamento in cui vengono attivate le resistenze e viene fornita una potenza costante.

II.2 Fase di riscaldamento

In questa fase si inizia il test vero e proprio. Vengono accese le resistenze e a intervalli di 1-2 minuti si misurano e registrano le seguenti quantità:

- portata in volume dell'acqua \dot{V} ;
- temperatura in ingresso T_{in} e in uscita T_{out} dell'acqua nella sonda;
- potenza elettrica assorbita dalle resistenze e dalla pompa \dot{Q}_{el} ;
- temperatura dell'acqua nel serbatoio T_w ;
- temperatura dell'aria esterna T_a .

I vari dispositivi che compongono il sistema di prova vengono posti in isolamento ma nonostante ciò si verificano comunque degli scambi termici tra circuito e aria esterna. Questo fa sì che la potenza elettrica non coincida esattamente con quella che viene somministrata alla sonda. Il valore di potenza elettrica raccomandato dall'ASHRAE è 50-80 W/m.

E' possibile ricavare la potenza netta trasferita al fluido nella sonda, stimando la potenza dispersa verso l'ambiente esterno e quella dispersa nel serbatoio. Infatti:

$$\dot{Q}_b = \dot{Q}_{el} - \dot{Q}_d - \dot{Q}_r$$

\dot{Q}_d = potenza dispersa nei tubi

\dot{Q}_r = potenza dispersa nel serbatoio

\dot{Q}_{el} = potenza elettrica fornita

\dot{Q}_b = potenza trasmessa al fluido nella sonda

La potenza dispersa dai tubi è data da:

$$\dot{Q}_d = U(T_w - T_a)$$

con U coefficiente globale di scambio termico fra i tubi e l'esterno. Quella dispersa nel serbatoio può essere calcolata se viene effettuata in laboratorio una misura del coefficiente globale di scambio termico fra il serbatoio e l'esterno.

La portata in volume dell'acqua entro la sonda deve essere tale che la differenza di temperatura $T_{out} - T_{in}$, dopo le prime ore di funzionamento, sia compresa tra 3,7 e 7 °C, come raccomandato dall'ASHRAE. La verifica può essere fatta con l'equazione di bilancio di energia, per il regime stazionario:

$$\dot{Q}_{el}l = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})$$

da cui:

$$T_{out} - T_{in} = \frac{\dot{Q}_{el}l}{\dot{m}c_p}$$

dove l è la lunghezza della sonda e \dot{m} è la portata in massa dell'acqua.

Per interpretare i dati raccolti dalle misure effettuate e determinare quindi le proprietà termofisiche del terreno e della malta sigillante possono essere utilizzati poi dei metodi di tipo analitico o numerico.

II.3 Il metodo line heat source

Il metodo line heat source è il modello analitico più utilizzato per interpretare i risultati dei Test di Risposta Termica. Proposto da Morgan nel 1983, esso schematizza la sonda geotermica con una sorgente termica lineare e il suolo in cui è posta con un solido infinito. La potenza per unità di lunghezza erogata da tale sorgente q_l è costante e nota. L'equazione del campo di temperatura, in funzione del tempo t e della coordinata radiale r è:

$$T(r, t) = \frac{q_l}{4\pi k_g} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du + T_0 = \frac{q_l}{4\pi k} E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) + T_0$$

k_g = conducibilità termica del suolo

α = diffusività termica del suolo

T_0 = temperatura iniziale del suolo pari alla temperatura di terreno indisturbato T_g

E_1 è detto integrale esponenziale e per valori di $\alpha t/r^2$ alti può essere approssimato con la relazione:

$$E_1\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) = \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \quad \text{con} \quad \frac{4\alpha t}{r^2} \geq 5$$

dove γ è la costante di Eulero pari a 0,5772. L'approssimazione è tanto migliore quanto più si è lontani dall'istante iniziale del riscaldamento e/o dalle pareti della sonda. Infatti si ha che per $\frac{\alpha t}{r^2} \geq 20$ l'errore massimo è del 2,5% mentre per $\frac{\alpha t}{r^2} \geq 5$ è del 10%.

Il campo di temperatura può essere riscritto come:

$$T(r, t) = \frac{q_l}{4\pi k_g} \left(\ln \left(\frac{4\alpha_g t}{r^2} \right) - \gamma \right) + T_g$$

Se il valore della resistenza termica della sonda R_b è noto, la temperatura media del fluido contenuto nella sonda, detto a il suo raggio, è data da:

$$T_m(t) = \frac{q_l}{4\pi k_g} \left(\ln \left(\frac{4\alpha_g t}{a^2} \right) - \gamma \right) + q_l R_b + T_g$$

Quest'equazione può essere riscritta nella forma:

$$T_m(t) - T_g = \frac{q_l}{4\pi k_g} \ln(t) + B = A \ln(t) + B$$

dove le costanti A e B sono date da:

$$A = \frac{q_l}{4\pi k_g}$$

$$B = q_l \left\{ R_b + \frac{1}{4\pi k_g} \left[\ln \left(\frac{4\alpha_g}{a^2} \right) - 0,5772 \right] \right\}$$

Se si riporta un diagramma di $T_m - T_g$ in funzione del logaritmo naturale del tempo e si esegue una interpolazione lineare, si trovano i valori delle costanti A e B .

La costante A consente di determinare la conducibilità termica del terreno k_g , mediante la relazione:

$$k_g = \frac{q_l}{4\pi A}$$

La costante B , se la resistenza termica della sonda R_b è nota, consente di determinare la diffusività termica del terreno, mediante la relazione:

$$\alpha_g = \frac{\alpha^2}{4} \exp \left[4\pi k_g \left(\frac{B}{q_l} - R_b \right) + 0,5772 \right]$$

In alcuni casi però il valore di R_b non è noto. Si procede allora in modo diverso, cioè si considera per α_g il valore stimato in base al tipo di terreno in questione (tabella 2) e quindi si ricava con le precedenti relazioni il valore di R_b :

$$R_b = \frac{B}{q_l} - \frac{1}{4\pi k_g} \left[\ln \left(\frac{4\alpha_g}{a^2} \right) - 0,5772 \right]$$

Tipo di terreno	Conducibilità [W/mK]	Diffusività [m ² /day]	Diffusività [mm ² /s]
Argilla pesante 15% acqua	1,4 ÷ 1,9	0,042 ÷ 0,061	0,486 ÷ 0,706
Argilla pesante 5% acqua	1,0 ÷ 1,4	0,047 ÷ 0,061	0,544 ÷ 0,706
Argilla leggera 15% acqua	0,7 ÷ 1,0	0,055 ÷ 0,047	0,637 ÷ 0,544
Argilla leggera 5% acqua	0,5 ÷ 0,9	0,056 ÷ 0,056	0,648 ÷ 0,648
Sabbia pesante 15% acqua	2,8 ÷ 3,8	0,084 ÷ 0,11	0,972 ÷ 1,27
Sabbia pesante 5% acqua	2,1 ÷ 2,3	0,093 ÷ 0,14	1,08 ÷ 1,62
Sabbia leggera 15% acqua	1,0 ÷ 2,1	0,047 ÷ 0,093	0,544 ÷ 1,08
Sabbia leggera 5% acqua	0,9 ÷ 1,9	0,055 ÷ 0,12	0,637 ÷ 1,39

Tabella 2: Conducibilità termica e diffusività termica per vari tipi di terreno (ASHRAE handbook 2007)

Affinché il metodo line heat source dia valori affidabili è necessario che il tempo trascorso dall'inizio della fase di riscaldamento sia almeno di 15 ore. Inoltre dei quattro parametri necessari al dimensionamento della sonda (conducibilità termica e diffusività termica del terreno e della malta), questo metodo ne determina solo due e per ottenere il valore di α_g è necessario fornire quello di R_b .

II.4 Il metodo cylindrical heat source

In questo modello analitico, utilizzato anch'esso per interpretare i risultati dei TRT, la sonda geotermica viene schematizzata con un cilindro infinito di raggio a immerso in un solido di temperatura iniziale pari a quella di terreno indisturbato che eroga una potenza per unità di superficie nota e costante q_s . Il campo di temperatura in funzione del tempo t e della coordinata radiale r è dato da:

$$T(r, t) = \frac{q_s}{k_g} G(z, p) + T_g$$

con

$$z = \frac{\alpha_g t}{r^2}$$

$$p = \frac{r}{a}$$

$G(z, p)$ funzione di sorgente cilindrica descritta dalla seguente espressione:

$$G(z, p) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty f(\beta) d\beta$$

dove

$$f(\beta) = (e^{-z\beta^2} - 1) \frac{[J_0(p\beta)Y_1(\beta) - Y_0(p\beta)J_1(\beta)]}{\beta^2[J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)]}$$

con J_0 e Y_0 funzioni di Bessel di prima e seconda specie di ordine 0, J_1 e Y_1 funzioni di Bessel di prima e seconda specie di ordine 1.

Per trovare α_g e k_g si procede per tentativi rendendo minima la differenza dei quadrati tra i valori misurati di T_m e quelli calcolati di $T_m(t)$ per la temperatura media del fluido.

Per calcolare $T_m(t)$ nota la resistenza termica della sonda R_b si usa la seguente espressione:

$$T_m(t) = T(a, t) + q_l R_b$$

dove q_l è la potenza per unità di lunghezza.

Questo metodo, come il precedente, permette di determinare solo α_g e k_g , cioè solo due dei quattro parametri che invece sono necessari per il dimensionamento. Inoltre anche in questo caso è necessario conoscere il valore della resistenza termica della sonda, non sempre nota. Infine, è stato mostrato in letteratura [23] che il metodo cylindrical heat source fornisce valori della conducibilità errati per eccesso, e quindi il metodo line heat source è sia più semplice che più preciso.

II.5 Metodi numerici per l'interpretazione dei Test di Risposta Termica

I modelli numerici permettono di valutare conducibilità termica e diffusività termica della malta e del terreno in modo più preciso rispetto a quelli analitici, soprattutto quando il valore della resistenza termica della sonda non è noto. Possono essere monodimensionali, bidimensionali o tridimensionali.

Il metodo di Berberich et al. [12] prevede la raccolta dei dati di temperatura ponendo dei sensori lungo la parete della sonda e l'analisi di essi sia mediante il metodo line heat source sia mediante un modello numerico bidimensionale alle differenze finite in cui le variabili sono conducibilità termica k_g e capacità termica per unità di volume $(\rho c_p)_g$ del terreno.

Shonder e Beck [15] hanno sviluppato invece un modello numerico monodimensionale basato sul cylindrical heat source aggiungendo però a questo cilindro uno strato privo di capacità termica per rappresentare la resistenza termica e uno strato di malta sigillante di proprietà termofisiche differenti rispetto al terreno circostante.

Austin et al. [27,28] hanno invece realizzato un modello bidimensionale non stazionario in coordinate polari agli elementi finiti, in cui la sonda è rappresentata da settori circolari su cui è imposto un flusso termico costante. Per schematizzare la resistenza termica dovuta ai moti convettivi dell'acqua contenuta nella sonda si considera per i tubi una conducibilità termica equivalente.

Signorelli et al. [26] hanno invece presentato un modello tridimensionale sviluppato mediante il codice di calcolo agli elementi finiti FRACTure. Il software permette di analizzare lo scambio termico convettivo entro la sonda con elementi monodimensionali e di utilizzare per le altre regioni del dominio computazionale elementi invece tridimensionali.

Il metodo elaborato da Zanchini e Terlizze [7] è di tipo bidimensionale e utilizza il codice di calcolo agli elementi finiti COMSOL Multiphysics. L'acqua viene rappresentata mediante un solido a elevata conducibilità termica e il problema di scambio viene ridotto a pura conduzione, introducendo una conducibilità termica equivalente per il materiale di cui è composta la sonda per tener conto della resistenza termica convettiva dovuta ai fenomeni di convezione.

Tutti i metodi numerici appena citati procedono per tentativi. Cioè si variano di volta in volta i quattro parametri che si vogliono determinare, cioè conducibilità termica e diffusività termica di terreno e malta sigillante, cercando di minimizzare la somma dei quadrati degli scarti tra i valori di temperatura misurati sperimentalmente durante il TRT e quelli simulati col modello numerico.

CAPITOLO III

METODI DI DIMENSIONAMENTO DI CAMPI DI SONDE GEOTERMICHE

Affinché un impianto geotermico sia in grado di garantire un buon rapporto costo/beneficio è necessario che tutti i dispositivi che lo compongono siano efficienti. Se ad esempio la progettazione è rivolta al riscaldamento e alla refrigerazione di un'abitazione, si deve tener conto del fabbisogno energetico, delle caratteristiche ambientali e climatiche della località in questione e della struttura dell'edificio, cioè di tutti quei fattori che possono influire sul bilancio economico-gestionale-ambientale dell'impianto.

Nel caso particolare delle pompe di calore accoppiate al terreno (GCHPs) l'attenzione deve essere posta anche sul dimensionamento dello scambiatore di calore che viene posizionato nel terreno. Infatti un sottodimensionamento porta a un abbassamento del rendimento della pompa di calore mentre un sovradimensionamento comporta maggiori spese. Dunque un dimensionamento corretto deve essere in grado di garantire risparmio energetico e economico. I parametri di cui si deve tener conto sono:

- tipologia di terreno;
- temperatura di terreno indisturbato;
- gradiente geotermico;
- materiali utilizzati per la malta sigillante;
- fabbisogno energetico estivo e invernale che la pompa di calore deve soddisfare;
- ore di funzionamento della pompa di calore.

Il tipo di scambiatori di calore che d'ora in poi verranno presi in considerazione sono le sonde geotermiche verticali. Nel precedente capitolo sono stati spiegati i metodi impiegati per determinare le proprietà necessarie al dimensionamento di questo tipo di sistemi, cioè temperatura di terreno indisturbato e conducibilità termica e diffusività termica del terreno e della malta sigillante. Partendo dalla conoscenza di queste proprietà nei prossimi paragrafi verrà illustrato il metodo di dimensionamento proposto dall'ASHRAE, che è anche quello attualmente più impiegato per la progettazione degli impianti geotermici, ponendo l'attenzione sulle criticità che esso comporta quando il movimento dell'acqua di falda è assente e i carichi termici stagionali sono non bilanciati.

III.1 Il metodo ASHRAE

Il metodo proposto dall'ASHRAE per il dimensionamento delle sonde geotermiche verticali è stato elaborato nel 1985. Partendo dalla soluzione per il campo di temperatura ricavata dal modello cylindrical heat source, sono state introdotte delle modifiche in modo tale da poter considerare scambiatori di tipo a U e è stato aggiunto un calcolo attraverso il quale è possibile determinare la resistenza termica del terreno considerando diversi tipi di impulsi di calore e diverse scale temporali (breve, medio e lungo periodo).

Per determinare la lunghezza della sonda si hanno due equazioni, una valida per il raffrescamento (cooling) e una valida per il riscaldamento (heating). In entrambi i casi l'incognita da determinare è la lunghezza della sonda L .

Cooling:

$$L_c = \frac{Q_a R_{ga} + (Q_c - W_c)(R_b + PLF_m R_{gm} + R_{gd} F_{sc})}{T_g - T_m - T_p}$$

Heating:

$$L_h = \frac{Q_a R_{ga} + (Q_h - W_h)(R_b + PLF_m R_{gm} + R_{gd} F_{sc})}{T_g - T_m - T_p}$$

dove:

Q_a = potenza media annua scambiata con il terreno (positiva in caso di riscaldamento, negativa in caso di raffreddamento), [W]

Q_c = carico termico di progetto per il raffrescamento (negativo), [W]

Q_h = carico termico di progetto per il riscaldamento (positivo), [W]

W_c = potenza elettrica assorbita con carico Q_c , [W]

W_h = potenza elettrica assorbita con carico Q_h , [W]

PLF_m = fattore di carico parziale del mese di progetto

F_{sc} = fattore di penalizzazione per scambi termici interni

R_b = resistenza termica della sonda, [mK/W]

R_{ga} = resistenza termica del terreno per impulsi annuali

R_{gm} = resistenza termica del terreno per impulsi mensili

R_{gd} = resistenza termica del terreno per impulsi giornalieri

T_g = temperatura di terreno indisturbato

T_m = temperatura media del fluido

T_p = fattore di penalizzazione per l'interferenza fra sonde (positivo in caso di riscaldamento, negativo in caso di raffreddamento), [°C]

Tra questi due valori L_c e L_h si sceglie per il dimensionamento il maggiore. Nel caso in cui $L_c > L_h$ per ottenere maggiori vantaggi durante l'uso invernale dell'impianto è possibile o sovradimensionare lo scambiatore o scegliere la lunghezza L_h e collegare lo scambiatore a una torre evaporativa. Questa seconda soluzione è la migliore tra le due perché permette di bilanciare i carichi termici stagionali.

Per determinare i valori R_{ga} , R_{gm} e R_{gd} , resistenze termiche del terreno rispettivamente per impulsi annuali, mensili e giornalieri si esegue il seguente calcolo.

Si introduce in primo luogo il numero di Fourier per adimensionalizzare il tempo, definito dalla seguente espressione:

$$FO = \frac{4\alpha_g \tau}{D_b^2} = \frac{\alpha_g \tau}{a^2}$$

con α_g diffusività termica del terreno, τ tempo, D_b diametro della sonda, $a = D_b/2$ raggio della sonda. Successivamente si considerano tre impulsi termici, uno di 10 anni (3650 giorni), uno di 1 mese (30 giorni) e uno di 6 ore (0,25 giorni). Si definiscono tre intervalli di tempo τ_1 , τ_2 e τ_f :

$$\tau_1 = 10 \text{ anni} = 3650 \text{ giorni}$$

$$\tau_2 = 10 \text{ anni} + 1 \text{ mese} = 3650 + 30 = 3680 \text{ giorni}$$

$$\tau_f = 10 \text{ anni} + 1 \text{ mese} + 6 \text{ ore} = 3650 + 30 + 0,25 = 3680,25 \text{ giorni}$$

cui corrispondono i seguenti numeri di Fourier:

$$Fo_1 = \frac{4\alpha_g(\tau_f - \tau_1)}{D_b^2}$$

$$Fo_2 = \frac{4\alpha_g(\tau_f - \tau_2)}{D_b^2}$$

$$Fo_f = \frac{4\alpha_g\tau_f}{D_b^2}$$

Per ciascun valore del numero di Fourier si ricava poi una quantità detta G factor. Questo è un numero puro e la corrispondenza tra Fo e G viene fornita dall'ASHRAE [2] in forma di grafico e di tabella (fig.18):

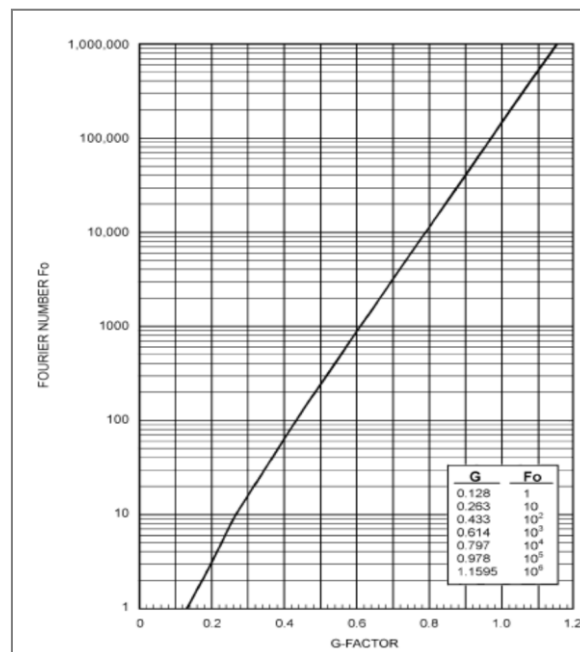
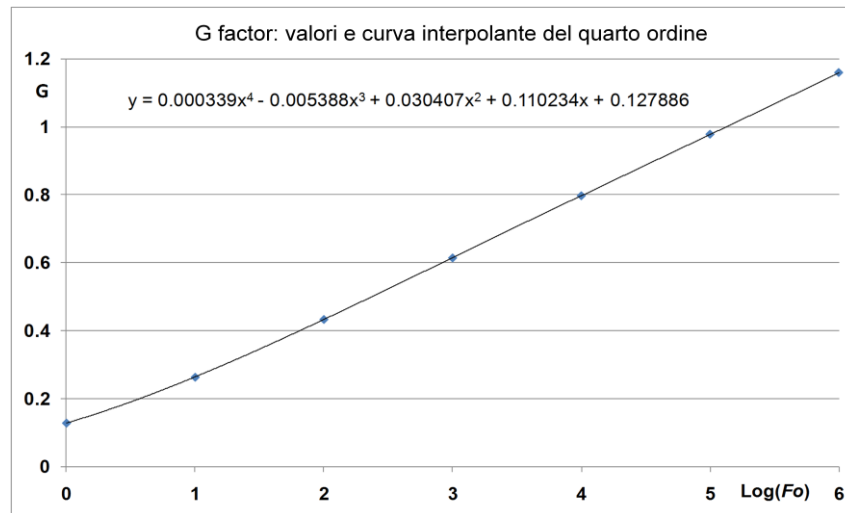


Fig.18 G factor in funzione del numero di Fourier Fo

Interpolando i valori della tabella è possibile ottenere un'espressione polinomiale di G in funzione del logaritmo in base 10 di Fo :



$$G = 0,000339[\log_{10}(Fo)]^4 - 0,005388[\log_{10}(Fo)]^3 + 0,030407[\log_{10}(Fo)]^2 + 0,110234 \log_{10}(Fo) + 0,127886$$

Ricavando allora per Fo_1 , Fo_2 , Fo_f i rispettivi G factor G_1 , G_2 e G_f è possibile calcolare le resistenze termiche cercate:

$$R_{ga} = \frac{(G_f - G_1)}{k_g}$$

$$R_{gm} = \frac{(G_1 - G_2)}{k_g}$$

$$R_{gd} = \frac{G_2}{k_g}$$

Sia nell'espressione per L_c che in quella per L_h compare la quantità F_{sc} . Essa è un termine che tiene conto delle perdite di calore di corto circuito che si verificano durante l'ascesa e la risalita del fluido all'interno dei tubi a U. In genere le sonde sono collegate in parallelo. Quando però le profondità da raggiungere sono basse è possibile anche porre due o tre sonde in serie in modo tale da ridurre le perdite di corto circuito che si verificano. La seguente tabella (tabella 3), fornita dall'ASHRAE, permette di valutare il valore di F_{sc} in base al numero di sonde in serie e alla portata in volume del fluido per kW:

N° di sonde in serie	F_{sc}	
	36 (l m/s kW)	54 (l m/s kW)
1	1,06	1,04
2	1,03	1,02
3	1,02	1,01

Tabella 3: Valore assunto da F_{sc} in funzione del numero di sonde in serie e della portata in volume del fluido per kW

Come si può notare, all'aumentare del numero di sonde in serie le perdite diminuiscono.

Un'altra quantità di cui bisogna tener conto per il calcolo della lunghezza L è la variazione di temperatura dovuta all'interferenza che si crea tra più sonde vicine, indicata con T_p . Quando si progetta un campo di sonde, esse devono essere poste tra loro a una distanza ragionevole che minimizzi gli effetti di interferenza termica senza incrementare eccessivamente la porzione di terreno occupata e la lunghezza degli scambiatori. Nella seguente tabella (tabella 4) fornita dall'ASHRAE vengono mostrati i valori di T_p per un campo di 10×10 sonde dopo 10 anni di funzionamento:

Ore di carico pieno equivalenti Heating/Cooling	Interasse tra sonde adiacenti (m)	T_p (K)
1000/500	4,6	trascurabile
1000/1000	4,6	2,6
1000/1000	6,1	1,3
500/1000	4,6	4,2
500/1000	6,1	2,2
500/1000	4,6	7,1
500/1500	6,1	3,7
500/1500	7,6	1,9
500/1500	4,6	da evitare
0/2000	6,1	5,8
0/2000	7,6	3,1

Tabella 4: Valori assunti da T_p dopo 10 anni di funzionamento per un campo di 10×10 sonde

Si nota che al diminuire della distanza tra gli assi delle sonde, a parità di carico, cresce il valore di T_p .

L'ASHRAE inoltre fornisce dei fattori moltiplicativi per T_p per altri tipi di campi di sonde geotermiche (tabella 5):

Campo 1×10	Campo 2×10	Campo 5×5	Campo 20×20
0,36	0,45	0,75	1,14

Tabella 5: Fattori moltiplicativi per T_p per vari tipi di campi

Per quanto riguarda invece il fattore di carico parziale del mese di progetto PLF_m , noto il carico termico giornaliero dell'edificio (invernale o estivo) e il carico orario di picco, esso si determina mediante la seguente relazione:

$$PLF_m = \frac{\text{carico termico giornaliero}}{\text{carico orario di picco} \times 24} \times \frac{\text{giorni di occupazione}}{\text{giorni del mese}}$$

III.2 Sostenibilità nel lungo termine dei campi di sonde geotermiche in assenza di movimento dell'acqua di falda: i problemi del metodo ASHRAE

Recenti studi hanno dimostrato che la sostenibilità di un campo di sonde geotermiche dimensionato con il metodo ASHRAE è garantita solo per un periodo di tempo non superiore a 10 anni, che è appunto il periodo considerato nello sviluppo del metodo.

Signorelli, Kohl e Rybach [26] hanno simulato, attraverso il software FRACTure, l'evoluzione temporale della temperatura nel terreno a 10 cm di distanza dalle sonde per effetto dello scambio termico fra sonde e terreno, per sonde in funzionamento solo invernale. Hanno considerato un periodo di funzionamento di 30 anni, seguito da 70 anni di spegnimento, per una singola sonda geotermica e un campo composto da 6 sonde geotermiche, assumendo trascurabile l'effetto del movimento dell'acqua di falda.

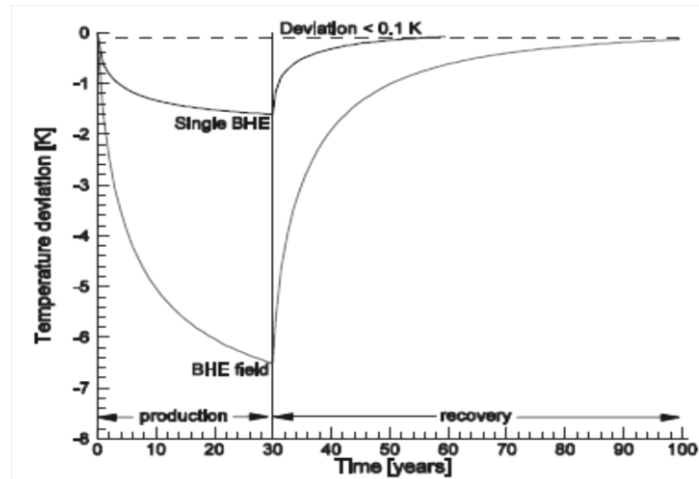


Fig.19 Variazioni della temperatura del terreno dovute agli scambi termici di una singola sonda e di un campo composto da 6 sonde, per 30 anni di funzionamento invernale e 70 di riequilibrio termico, a 50 m di profondità e 10 cm di distanza.

Come si nota nella figura 19, le variazioni di temperatura dovute all'impiego di un campo di sonde sono molto maggiori di quelle dovute a una singola sonda, e il tempo necessario per il riequilibrio termico è molto più lungo.

Zanchini, Lazzari e Priarone [6] hanno analizzato attraverso un modello numerico implementato con il codice di calcolo agli elementi finiti COMSOL Multiphysics le variazioni di temperatura del fluido termovettore prendendo in esame quattro geometrie di campi di sonde geotermiche a doppio tubo a U: sonda singola, linea di sonde infinite, due linee di sonde infinite, quadrato di infinite sonde. Assumendo -5°C come valore minimo accettabile per la temperatura del fluido di lavoro e considerando un arco temporale di 50 anni sono stati simulati in ciascun caso gli effetti dovuti a carichi termici stagionali bilanciati, parzialmente bilanciati e totalmente non bilanciati.

Sono stati presi in considerazione carichi termici stagionali di tipo sinusoidale con periodo di un anno (fig.20) e sono state scelte due diverse ampiezze del carico termico lineare: $A = 30\text{W/m}$ e $A_r=20\text{W/m}$.

Carichi bilanciati:

$$Q_1 = A \sin(\omega\tau)$$

$$Q_{1r} = A_r \sin(\omega\tau)$$

Carichi parzialmente bilanciati:

$$Q_2 = \frac{3}{4}A \sin(\omega\tau) + \frac{1}{4}A|\sin(\omega\tau)|$$

$$Q_{2r} = \frac{3}{4}A_r \sin(\omega\tau) + \frac{1}{4}A_r|\sin(\omega\tau)|$$

Carichi completamente sbilanciati:

$$Q_3 = \frac{1}{2}A \sin(\omega\tau) + \frac{1}{2}A|\sin(\omega\tau)|$$

$$Q_{3r} = \frac{1}{2}A_r \sin(\omega\tau) + \frac{1}{2}A_r|\sin(\omega\tau)|$$

con:

$$\omega = \frac{2\pi}{P} = 1,9924 \times 10^{-7} \text{ rad s}^{-1}$$

$$P = 1 \text{ anno} = 31536000 \text{ s}$$

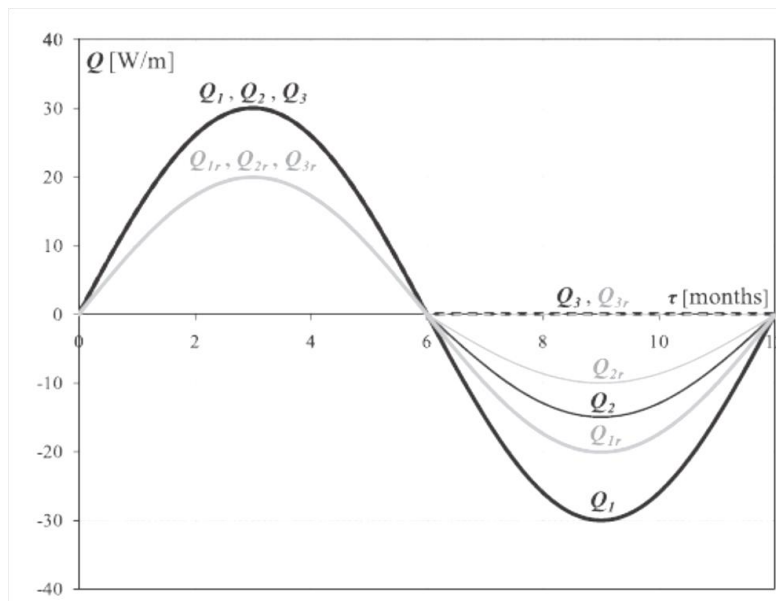


Fig.20 Carichi termici stagionali periodici

E' stato visto che nel caso di sonda singola la temperatura del fluido termovettore risulta essere sempre superiore al valore limite di -5°C sia per carichi termici bilanciati che sbilanciati (fig.21):

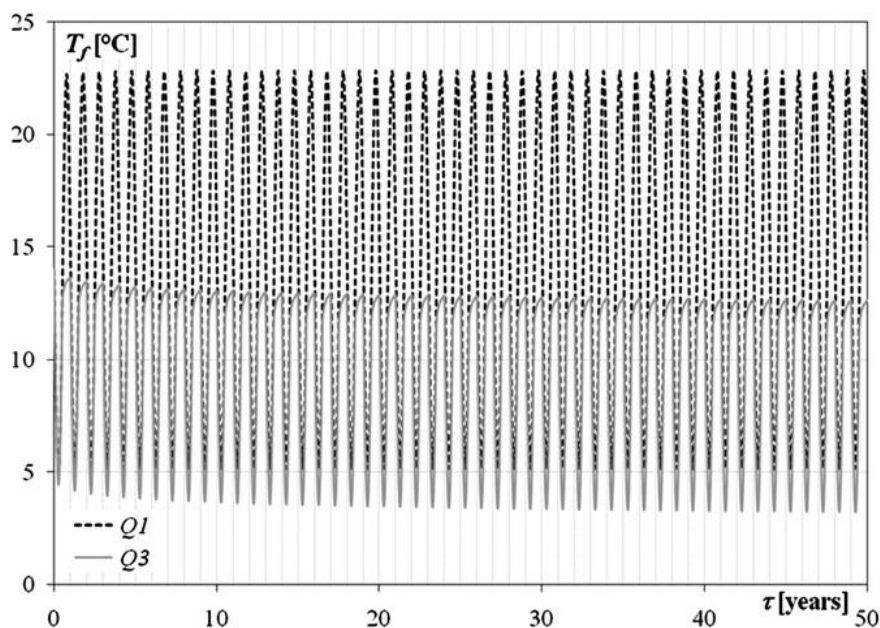


Fig.21 Variazioni di temperatura del fluido termovettore nel caso di sonda singola per i carichi termici stagionali Q_1 e Q_3

Analizzando invece i campi di sonde e considerando anche l'effetto dovuto all'interferenza termica che tra esse si genera è stato riscontrato che in alcuni casi la temperatura del fluido di lavoro scende al di sotto del valore limite (fig.22-23). In ciascun caso le simulazioni sono state eseguite considerando sonde distanziate tra loro di 6, 8, 10 e 14 m.

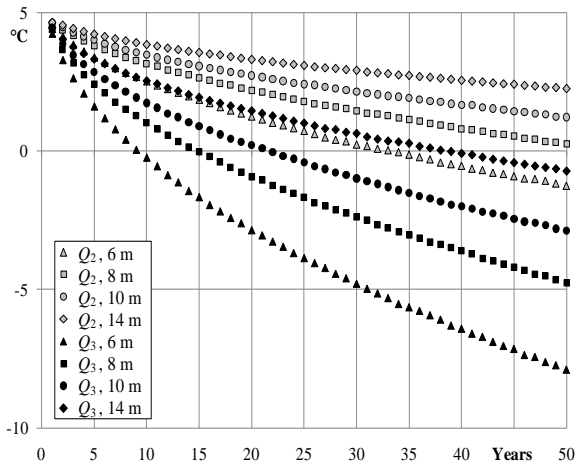


Fig.22 Variazioni di temperatura del fluido termovettore nel caso di linea singola di infinite sonde

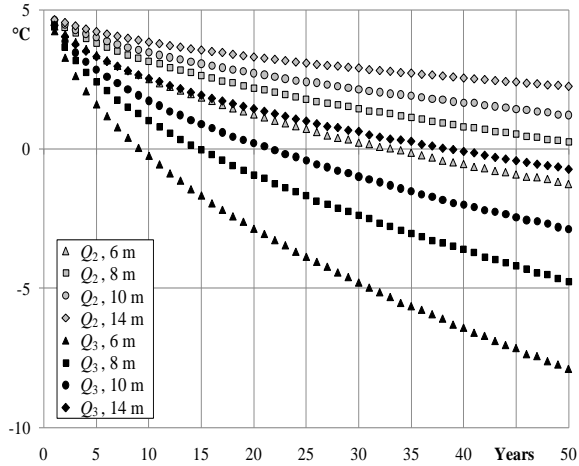


Fig.23 Variazioni di temperatura del fluido termovettore nel caso di campo quadrato di infinite sonde

Il movimento dell'acqua di falda rende meno critica la sostenibilità nel lungo periodo di campi di sonde geotermiche con carichi termici stagionali non bilanciati. Un primo studio rilevante è stato effettuato da Chiasson, Rees e Spitler [1]. Gli autori hanno anzitutto considerato i valori tipici di velocità dell'acqua di falda che si hanno nei vari tipi di terreno. Si possono avere valori elevati nei terreni ghiaiosi, non elevati ma comunque significativi in quelli sabbiosi e quasi nulli in quelli argillosi, come è mostrato nella tabella 6.

Terreno	Porosità media	Velocità media acqua (m/anno)
Ghiaia	0,31	3050
Sabbia grossa	0,385	60,1
Sabbia fine	0,4	5,05
Limo	0,475	0,094
Argilla	0,47	0,000146

Tabella 6: Velocità dell'acqua di falda nei vari tipi di terreno

Considerando poi una velocità dell'acqua pari a 60 m/anno, tipica del terreno sabbioso, essi hanno osservato come il movimento dell'acqua di falda abbia effetti positivi sulla sostenibilità nel lungo termine degli impianti geotermici. Ciò che hanno visto è che la temperatura media del fluido termovettore durante il funzionamento evolve nel tempo, cioè diminuisce, fino a portarsi ad un valore circa costante. Questo vuol dire che poiché le prestazioni dell'impianto dipendono da tale temperatura, una volta raggiunto questo valore, anche l'efficienza del sistema sarà stabile nel tempo. Questo è stato verificato anche da altre attività di ricerca [6] ed è stato inoltre dimostrato essere vero per vari tipi di carichi termici, cioè bilanciati, parzialmente bilanciati e completamente non bilanciati.

Quando però il movimento dell'acqua di falda è così lento da poter essere trascurato e i carichi termici stagionali sono parzialmente o totalmente non bilanciati, per vasti campi di sonde la

temperatura media del fluido termovettore evolve fino ad assumere dei valori non sufficienti a garantire dei buoni rendimenti e le condizioni in cui il sistema si trova a dover operare possono diventare critiche. Tuttavia, per campi in linea singola o non molto estesi, si possono avere condizioni di buon funzionamento anche se i carichi termici stagionali sono parzialmente non bilanciati.

Talvolta, infine, non si hanno dati certi sul movimento dell'acqua di falda e conviene assumere, prudenzialmente, che questo abbia effetti trascurabili. In tali circostanze, il metodo di dimensionamento proposto dall'ASHRAE, basato su simulazioni della durata di 10 anni, non garantisce la sostenibilità nel lungo periodo ed è necessario utilizzare metodi di dimensionamento più raffinati, basati su simulazioni di lungo termine. Uno di questi metodi è il codice di calcolo EED (Earth Energy Designer) [11]. Un metodo alternativo è in corso di elaborazione presso il Dipartimento D.I.N. (Dipartimento di Ingegneria Industriale) dell'Università di Bologna. Una prima stesura di tale metodo sarà presentata nei prossimi capitoli di questa Tesi.

CAPITOLO IV

SOSTENIBILITA' NEL LUNGO PERIODO DI CAMPI DI SONDE GEOTERMICHE IN ASSENZA DI MOVIMENTO DELL'ACQUA DI FALDA: 1° METODO

In questa sezione sarà presentato il primo dei due nuovi modelli numerici elaborati per analizzare la sostenibilità nel lungo termine di campi di sonde geotermiche in assenza di movimento dell'acqua di falda. Ciò che il modello permette di valutare è come evolve nel tempo la temperatura media di interfaccia tra la sonda centrale del campo e il terreno. Tale sonda è quella che si trova ad operare in condizioni più critiche subendo l'interferenza termica prodotta dalla presenza di tutte le altre sonde del campo. In base all'andamento di tale temperatura media è possibile trarre delle conclusioni sulla sostenibilità nel lungo termine del campo di sonde che si sta analizzando e successivamente adottare un giusto metodo di dimensionamento che garantisca l'efficienza dell'intero impianto.

IV.1 Il modello numerico

Il modello numerico studia le variazioni di temperatura, all'interfaccia tra la sonda centrale di un campo di sonde geotermiche e il terreno, indotte da carichi termici con andamento periodico nel tempo. Viene considerato un arco temporale di cinquanta anni, supponendo assenza di movimento dell'acqua di falda.

Il comportamento della temperatura della sonda centrale viene determinato mediante simulazioni numeriche eseguite con il codice di calcolo agli elementi finiti COMSOL Multiphysics e il principio di sovrapposizione degli effetti.

La sonda centrale viene schematizzata con una sorgente termica cilindrica, infinitamente lunga, soggetta ad un carico termico per unità di lunghezza costante durante ciascun mese di funzionamento e diverso per i singoli mesi dell'anno. Tale carico termico viene studiato come sovrapposizione pesata di carichi termici descritti da una funzione a onda quadra e aventi ciascuno la durata di un mese. Il terreno è descritto da un mezzo solido infinito di proprietà termofisiche costanti. Il problema è considerato bidimensionale, trascurando le variazioni della temperatura lungo l'asse della sonda.

Lo studio viene condotto sulla sola sonda centrale del campo. Per valutare gli effetti dovuti alle altre sonde si applica poi, nuovamente, il principio di sovrapposizione degli effetti.

IV.2 Le equazioni del modello numerico

Adottando un sistema di riferimento cartesiano centrato sulla sonda e detto D il diametro di essa, il dominio computazionale in cui svolgere le simulazioni, che rappresenta il terreno, viene definito da un quadrato centrato anch'esso sull'origine di lato molto maggiore del diametro della sonda.

Si considera che all'istante iniziale $\tau = 0$ la temperatura sia uniforme in tutto lo spazio e pari alla temperatura di terreno indisturbato T_g .

Per $\tau > 0$ all'interfaccia tra la sonda e il terreno è presente invece un flusso di calore uniforme per unità di area pari a

$$q(\tau) = \frac{Q_0}{\pi D} F(\tau)$$

Q_0 è il flusso di calore per unità di lunghezza con modulo massimo, positivo se il calore è fornito al terreno (periodo estivo), negativo se il calore è sottratto al terreno (periodo invernale). $F(\tau)$ è invece una funzione adimensionale del tempo.

L'equazione differenziale che deve essere risolta, considerando che ci sia pura conduzione, è:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha_g \nabla^2 T$$

con α_g diffusività termica del terreno. La condizione al contorno alla superficie S tra sonda e terreno è:

$$-k_g(\nabla T \cdot \vec{n})|_S = \frac{Q_0}{\pi D} F(\tau)$$

con \vec{n} vettore unitario diretto verso l'esterno e k_g conducibilità termica del terreno, mentre il perimetro del quadrato è adiabatico.

Introducendo l'operatore adimensionale $\nabla^* = D\nabla$ e le quantità anch'esse adimensionali

$$x^* = \frac{x}{D}$$

$$y^* = \frac{y}{D}$$

$$\tau^* = \frac{\alpha_g \tau}{D^2}$$

$$T^* = k_g \frac{T - T_g}{Q_0}$$

è possibile riscrivere l'equazione da risolvere, la condizione al contorno e la condizione iniziale in forma adimensionale:

$$\frac{\partial T^*}{\partial \tau^*} = \nabla^{*2} T^*$$

$$-(\nabla^* T^* \cdot \vec{n})|_S = \frac{F(\tau)}{\pi}$$

$$T^* = 0$$

Una volta impostato il modello è dunque possibile procedere alla valutazione degli effetti prodotti da carichi termici di tipo mensile.

IV.3 Gli effetti dei carichi termici mensili

Considerando che il campo di sonde geotermiche venga impiegato per la climatizzazione di un edificio, si può supporre che il carico termico a cui tali sonde sono soggette sia di tipo periodico, con periodo $\tau_0 = 1$ anno. Tale carico può essere descritto dalla sovrapposizione temporale di dodici carichi termici costanti di durata un mese ciascuno.

Per il generico carico mensile si considera che la funzione $F(\tau)$ descriva uno step unitario e costante di durata un mese (fig.24):

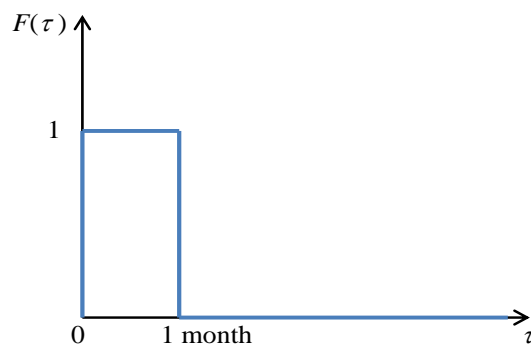


Fig.24 Funzione $F(\tau)$ con step unitario di durata un mese

Essa viene definita mediante la seguente somma di funzioni di Heaviside:

$$F(\tau) = H(\tau) - H(\tau - \tau_1)$$

dove $\tau_1 = 1$ mese. Considerando poi tutti i mesi uguali e pari a trenta giorni e sommando dodici funzioni $F(\tau)$, ciascuna traslata di τ_1 e opportunamente pesata, si ottiene il carico termico adimensionale di durata un anno. I dodici carichi mensili sono quindi definiti nel seguente modo:

$$\begin{aligned} F(\tau) &= H(\tau) - H(\tau - \tau_1) \\ F(\tau - \tau_1) &= H(\tau - \tau_1) - H(\tau - 2\tau_1) \\ F(\tau - 2\tau_1) &= H(\tau - 2\tau_1) - H(\tau - 3\tau_1) \\ &\dots \end{aligned}$$

e il carico termico adimensionale annuo è dato da:

$$A_0 F(\tau) + A_1 F(\tau - \tau_1) + A_2 F(\tau - 2\tau_1) + \dots + A_{11} F(\tau - 11\tau_1) = \sum_{j=0}^{11} A_j F(\tau - j\tau_1)$$

dove A_0, A_1, \dots, A_{11} sono coefficienti adimensionali che esprimono il rapporto fra la potenza termica scambiata fra sonda e terreno nel mese in esame e quella del mese di massimo carico. Attraverso poi la sovrapposizione temporale di più carichi annui del tipo appena trovato, è possibile

ottenere un carico di calore periodico di periodo $\tau_0 = 1$ anno di durata N anni, dato dalla seguente espressione:

$$f(\tau) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{11} A_j F(\tau - i\tau_0 - j\tau_1)$$

Il modello considera $N = 50$ anni.

Per porre poi tutto in forma adimensionale si introduce il numero di Fourier:

$$Fo = \frac{\alpha_g \tau}{D^2}$$

In questo modo infatti, facendo riferimento alle equazioni del modello precedentemente esposte, si ottiene:

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{\tau^*}{Fo}$$

Il numero di Fourier viene calcolato a partire dal diametro reale della sonda centrale del campo e dalla diffusività termica del terreno in questione. In genere il diametro della sonda varia tra 9 e 16 cm mentre per la diffusività termica del terreno si fa riferimento ai valori stabiliti dall'ASHRAE (tabella 7).

Tipo di terreno	Conducibilità [W/mK]	Diffusività [m ² /day]	Diffusività [mm ² /s]
Argilla pesante 15% acqua	1,4 ÷ 1,9	0,042 ÷ 0,061	0,486 ÷ 0,706
Argilla pesante 5% acqua	1,0 ÷ 1,4	0,047 ÷ 0,061	0,544 ÷ 0,706
Argilla leggera 15% acqua	0,7 ÷ 1,0	0,055 ÷ 0,047	0,637 ÷ 0,544
Argilla leggera 5% acqua	0,5 ÷ 0,9	0,056 ÷ 0,056	0,648 ÷ 0,648
Sabbia pesante 15% acqua	2,8 ÷ 3,8	0,084 ÷ 0,11	0,972 ÷ 1,27
Sabbia pesante 5% acqua	2,1 ÷ 2,3	0,093 ÷ 0,14	1,08 ÷ 1,62
Sabbia leggera 15% acqua	1,0 ÷ 2,1	0,047 ÷ 0,093	0,544 ÷ 1,08
Sabbia leggera 5% acqua	0,9 ÷ 1,9	0,055 ÷ 0,12	0,637 ÷ 1,39

Tabella 7: Conducibilità termica e diffusività termica per vari tipi di terreno (dall'ASHRAE handbook 2007)

Il problema viene poi risolto mediante il software COMSOL Multiphysics. Tale codice di calcolo permette di suddividere il dominio computazionale con l'uso di tre tipi di mesh di forma arbitraria. In questo modo si ottiene l'evoluzione della temperatura adimensionale T^* in funzione del tempo adimensionale τ^*/Fo prodotta dalla sonda centrale del campo. La temperatura adimensionale può essere valutata in qualsiasi posizione adimensionale. Poiché il carico termico considerato è uniforme, il campo di temperatura ha una simmetria assiale, ovvero la temperatura adimensionale dipende solo dalla distanza L dall'asse della sonda, che, in forma adimensionale, diventa

$$L^* = \frac{L}{D}$$

I valori della temperatura adimensionale determinati mediante le simulazioni numeriche sono stati interpolati mediante i seguenti tipi di funzione:

$$T_S^* = \begin{cases} B_1 \log_{10} \left(1 + B_2 \frac{\tau^*}{Fo} \right) & 0 \leq \frac{\tau^*}{Fo} \leq \frac{1}{12} \\ \frac{B_3}{\left(\frac{\tau^*}{Fo} \right)^{B_4}} + \frac{0,008}{\frac{\tau^*}{Fo}} & \frac{\tau^*}{Fo} > \frac{1}{12} \end{cases}$$

$$T_{L^*}^* = C_1 \left[\left(\frac{\tau^*}{Fo} \right)^{C_2} \exp \left(\frac{C_3}{\frac{\tau^*}{Fo}} \right) \right]^{-1} \quad \frac{\tau^*}{Fo} > 0$$

dove T_S^* e $T_{L^*}^*$ descrivono la temperatura adimensionale rispettivamente all'interfaccia S tra sonda e terreno e alla distanza L^* e $B_1, B_2, B_3, B_4, C_1, C_2, C_3$ sono dei valori costanti che vengono determinati per tentativi in base al numero di Fourier considerato.

IV.4 Esempi di calcolo degli effetti dei carichi termici mensili sull'evoluzione della temperatura media della sonda centrale del campo

E' stata innanzitutto costruita la geometria del problema mediante il software COMSOL Multiphysics. Per la sonda si è scelta una circonferenza di diametro D unitario e per il terreno si è considerato un quadrato di lato pari a $2000D$, cioè 2000, con proprietà termofisiche costanti e unitarie, per riprodurre le equazioni adimensionali (fig.25). Il dominio computazionale su cui vengono svolte le simulazioni è costituito dal solo quadrato, escludendo l'area occupata dalla sonda (fig.26).

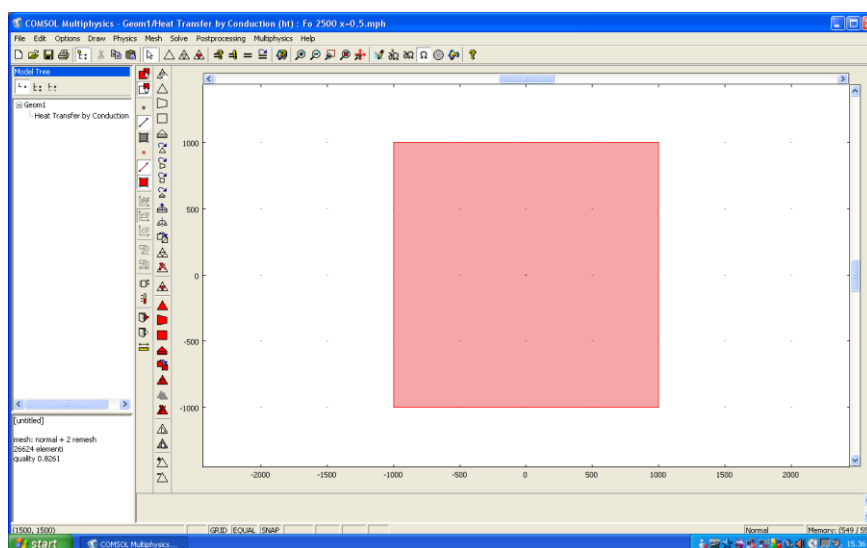


Fig.25 Dominio computazionale costruito in COMSOL Multiphysics

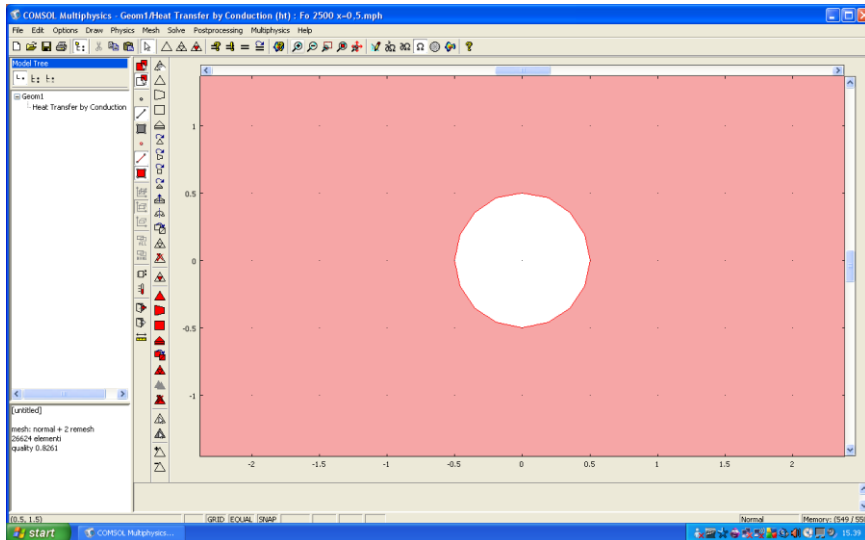


Fig.26 Zoom del dominio computazionale costruito. Come si nota, l'area occupata dalla sonda è stata esclusa

Sono state poi imposte nel codice computazionale l'equazione da risolvere, le condizioni al contorno e la condizione iniziale enunciate dal modello.

Il flusso di calore $F(\tau)$ viene descritto dalla funzione di Heaviside, che in COMSOL Multiphysics è data dall'espressione '*flc2hs*'. Tale funzione però non descrive esattamente lo step unitario di cui fa uso il modello per definire il carico termico mensile. Essa infatti è centrata nell'origine e nel passaggio da uno a zero descrive una rampa e non un gradino. Per far sì che essa approssimi la funzione $F(\tau)$ del modello è necessario sia traslarla in modo tale che essa si annulli dopo un mese sia definire un breve intervallo di tempo in cui deve avvenire lo smorzamento di tale rampa, in modo che sia il più possibile ripida. Poiché anche il tempo deve essere posto in forma adimensionale, prima di far ciò deve essere calcolato il numero di Fourier Fo .

Scegliendo per il diametro della sonda il valore di 0,09 m, sono stati analizzati tre casi: argilla leggera con 15% di acqua, sabbia pesante con 5% di acqua, sabbia leggera con 5% di acqua. Utilizzando dunque i valori di diffusività termica definiti dall'ASHRAE per questi tre tipi di terreno, i numeri di Fourier ottenuti sono stati rispettivamente 2500, 4400, 6300.

Fatto ciò è stato definito per ciascun caso il flusso di calore mentre l'intervallo di annullamento della rampa della funzione di Heaviside è stato scelto in modo tale che fosse duecento volte più piccolo della durata di un mese (cioè 7,2 ore).

Per svolgere poi le simulazioni è stato scelto di suddividere in tutti e tre i casi il dominio computazionale in mesh triangolari di 1664 elementi (fig.27-28).

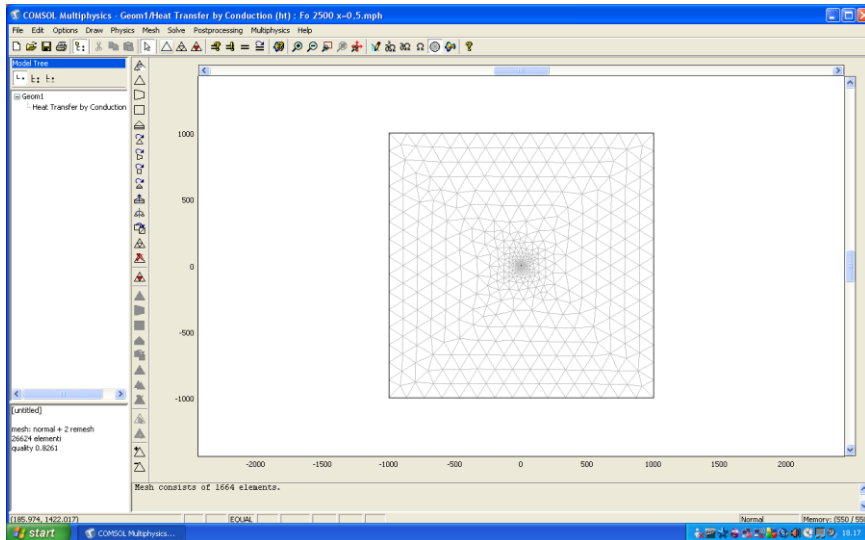


Fig.27 Divisione del dominio computazionale in 1664 elementi triangolari

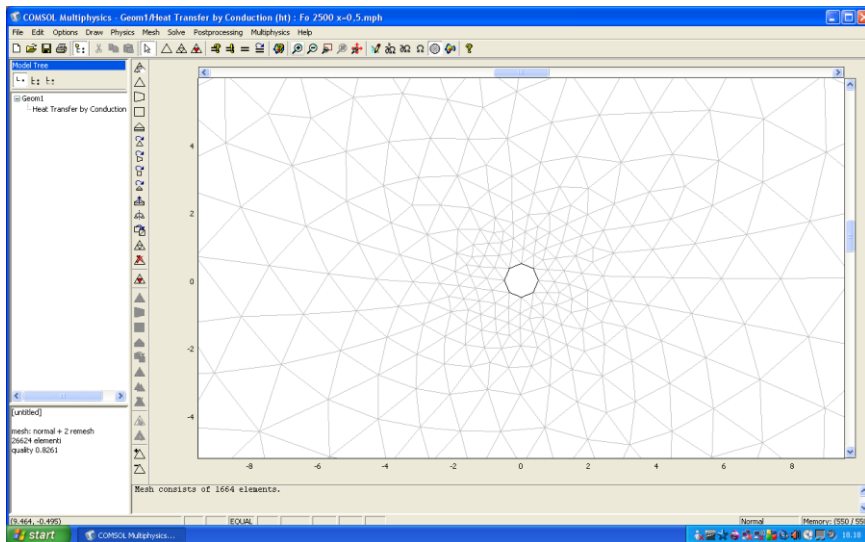


Fig. 28 Zoom di suddivisione del dominio computazionale intorno alla sonda

Poiché il modello considera un arco temporale di cinquanta anni, è necessario che esso venga diviso in intervalli uniformi adimensionali. Tali step temporali sono stati scelti pari a $\frac{50}{16000} \times Fo$.

In questo modo si ottiene l'evoluzione della temperatura adimensionale in funzione del tempo adimensionale prodotta da un carico termico mensile. Essa è stata valutata sia all'interfaccia S tra sonda e terreno che a varie distanze adimensionali L^* (40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160) per ciascun caso esaminato.

I valori di temperatura adimensionale ottenuti mediante le simulazioni sono stati interpolati mediante i tipi di funzione precedentemente descritti. Sono stati così determinati i valori delle costanti riportati nelle tabelle 8 e 9:

S			
B_1	B_2	B_3	B_4
$Fo = 2500$			
0,0783	25600	1,770E-06	5
$Fo = 4400$			
0,0778	46706	5,477E-07	5,5
$Fo = 6300$			
0,0785	62935	1,645E-07	6

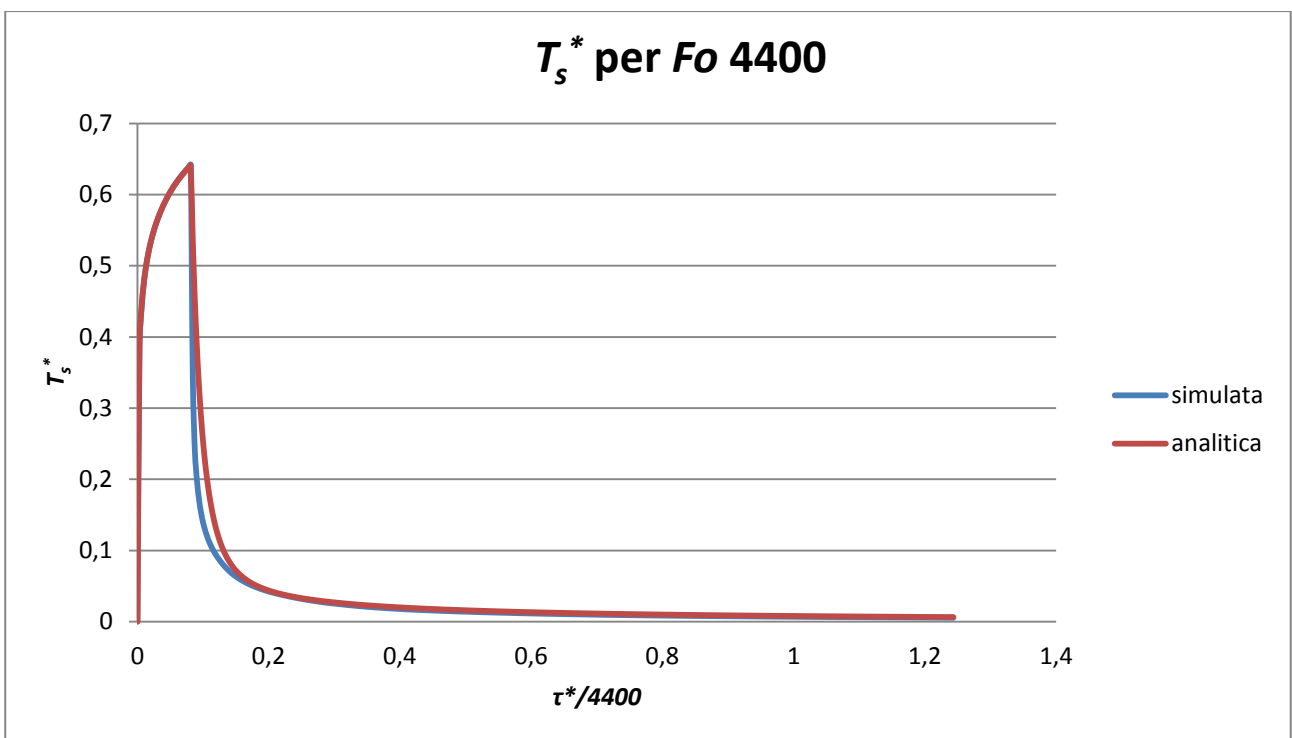
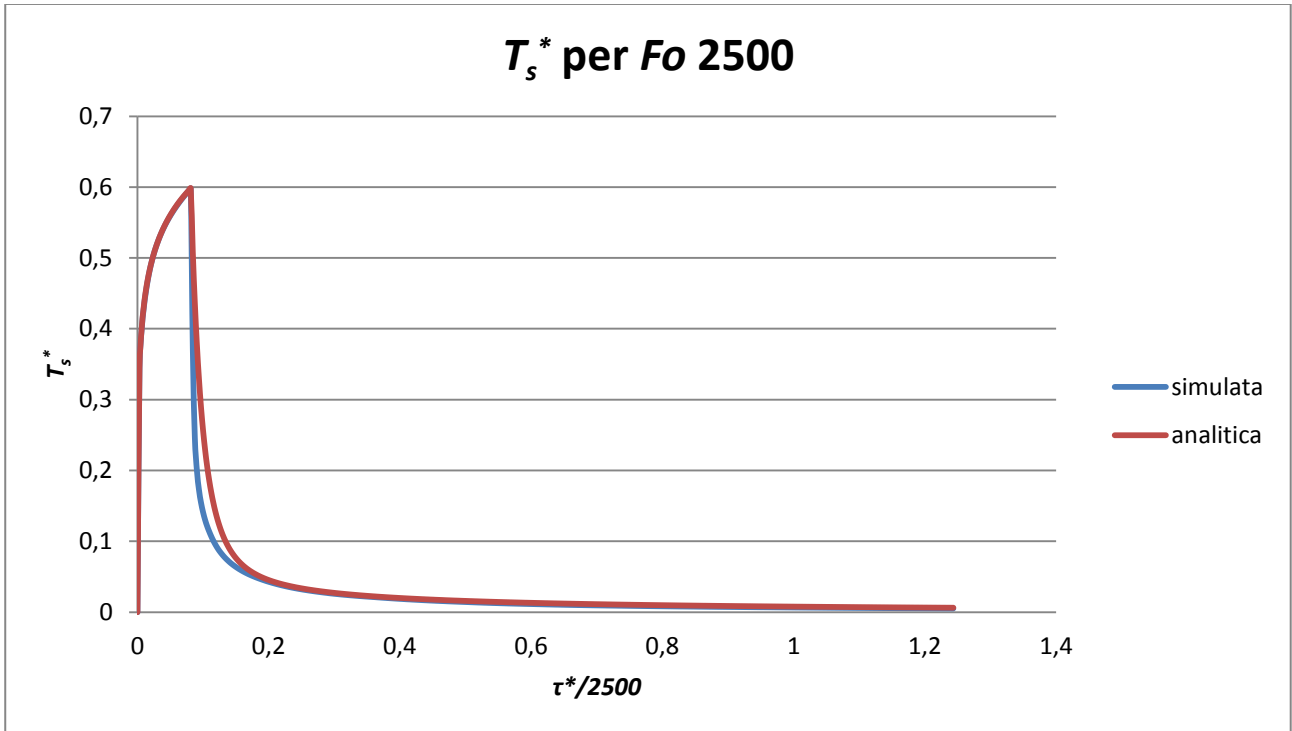
Tabella 8: Costanti utilizzate per costruire la funzione interpolante T_3^* per i vari numeri di Fourier

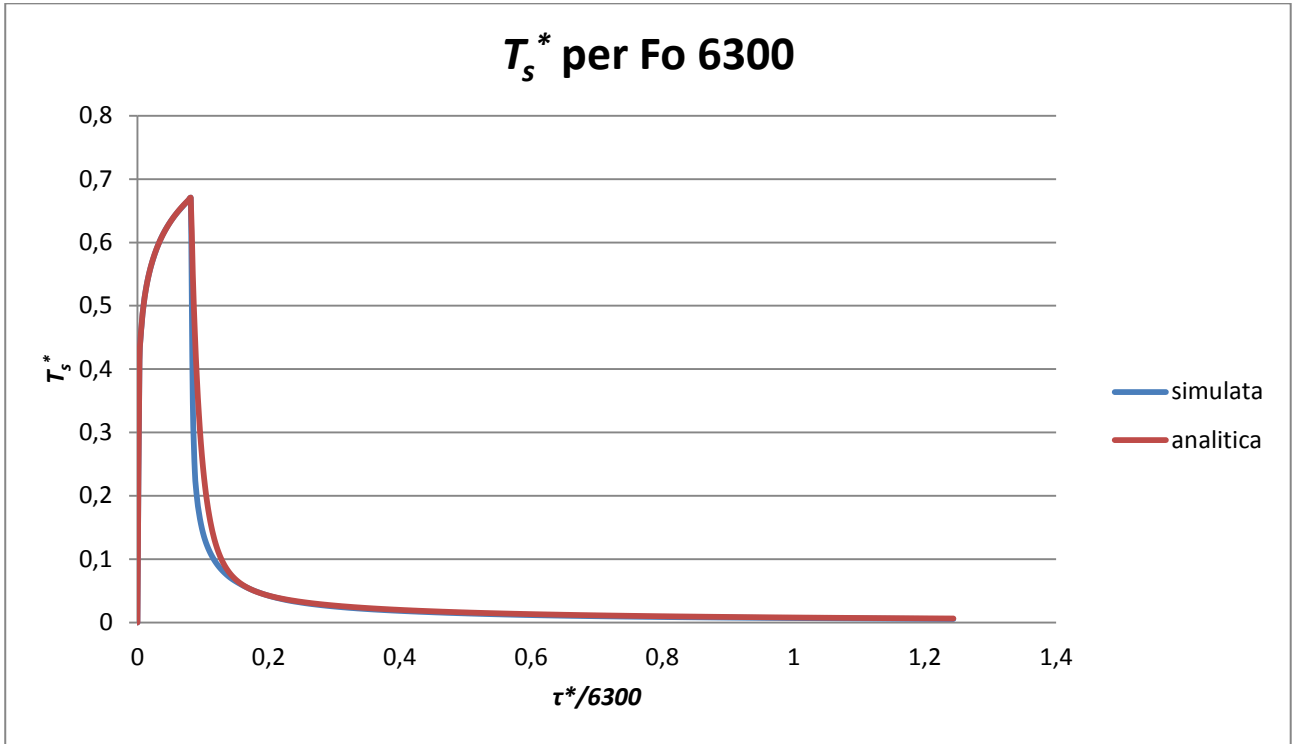
L^*	C_1	C_2	C_3
$Fo = 2500$			
40	0,00825	1,060	0,22
50	0,00800	1,065	0,323
60	0,00790	1,070	0,445
70	0,00777	1,071	0,586
80	0,00762	1,0711	0,738
90	0,00759	1,0712	0,92
100	0,00755	1,017	1,12
120	0,00751	1,017	1,60
140	0,00747	1,019	2,14
160	0,00746	1,019	2,75
$Fo = 4400$			
40	0,00940	1,065	0,15
50	0,00829	1,065	0,20
60	0,00798	1,066	0,27
70	0,00780	1,069	0,35
80	0,00735	1,055	0,42
90	0,00705	1,020	0,945
100	0,00700	1,010	0,60
120	0,00700	1,010	0,86
140	0,00700	1,003	1,155
160	0,00700	1,003	1,50
$Fo = 6300$			
40	0,0106	1,052	0,12
50	0,0095	1,053	0,16
60	0,0090	1,030	0,205
70	0,0084	1,015	0,25
80	0,0078	1,010	0,30
90	0,0072	1,004	0,347
100	0,0069	0,98	0,405
120	0,0066	0,94	0,549
140	0,0064	0,93	0,739
160	0,0062	0,92	0,952

Tabella 9: Costanti utilizzate per costruire la funzione interpolante T_3^* per i vari numeri di Fourier

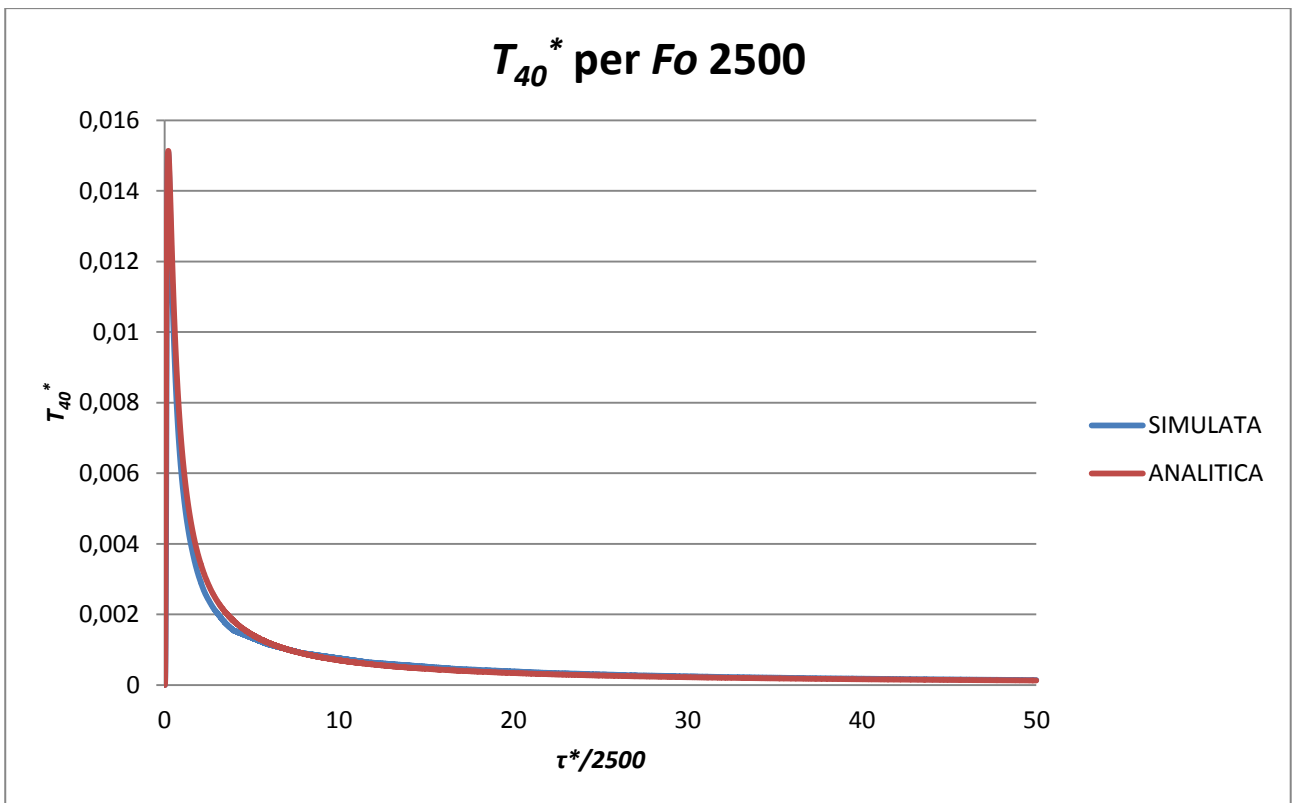
I risultati sono stati elaborati con il programma Microsoft Excel e sono stati ottenuti i seguenti grafici:

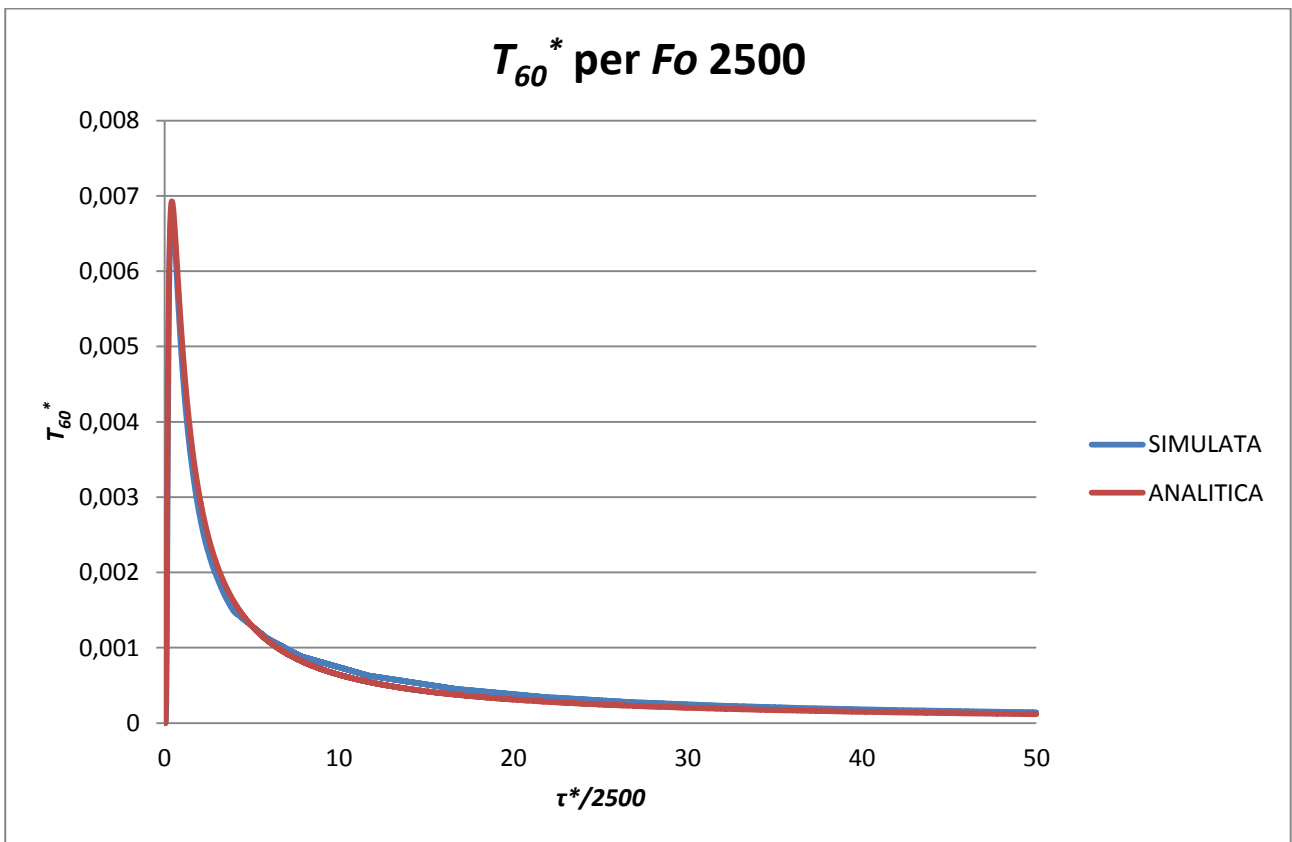
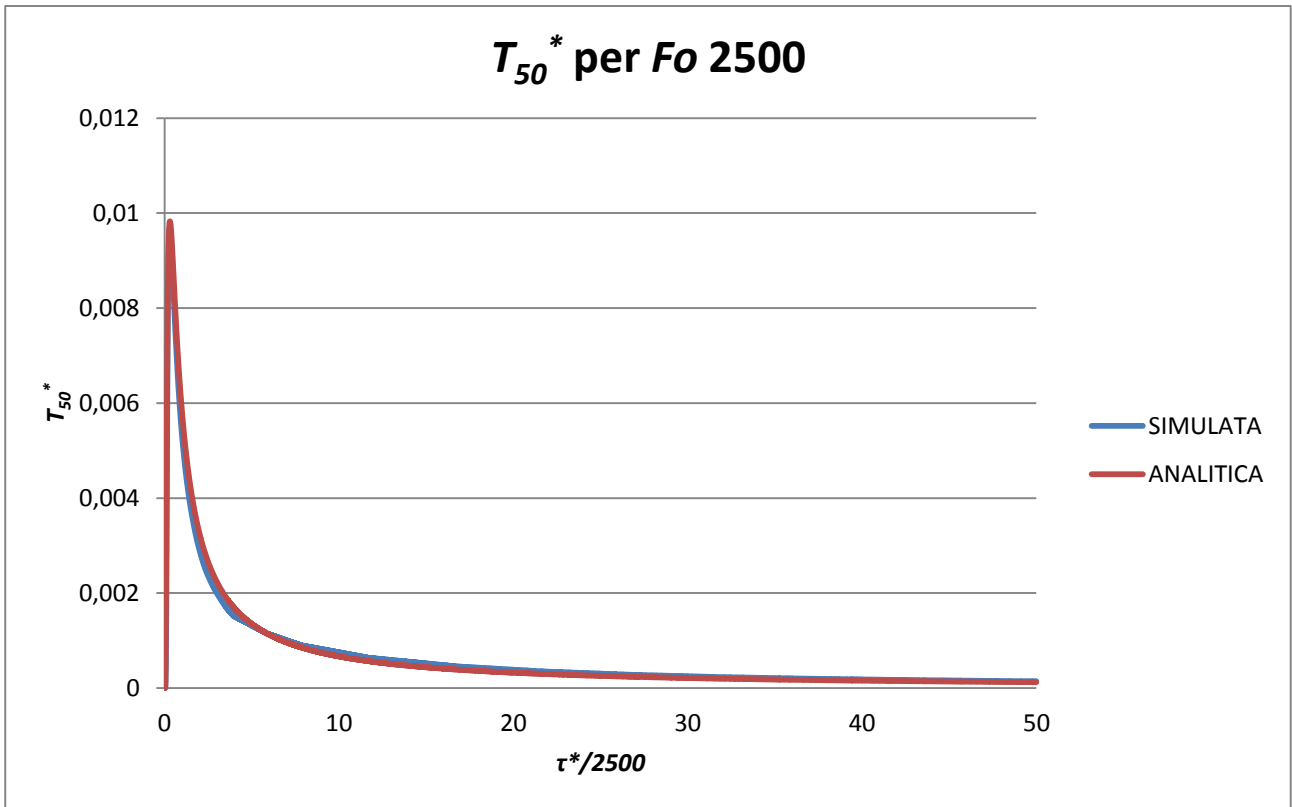
- Temperatura adimensionale in funzione del tempo adimensionale all'interfaccia tra sonda e terreno (per avere una visualizzazione migliore del comportamento delle due curve si è deciso di non utilizzare nei grafici tutti i 16000 valori ottenuti dalla simulazione, ma di mostrare solo i primi 400):

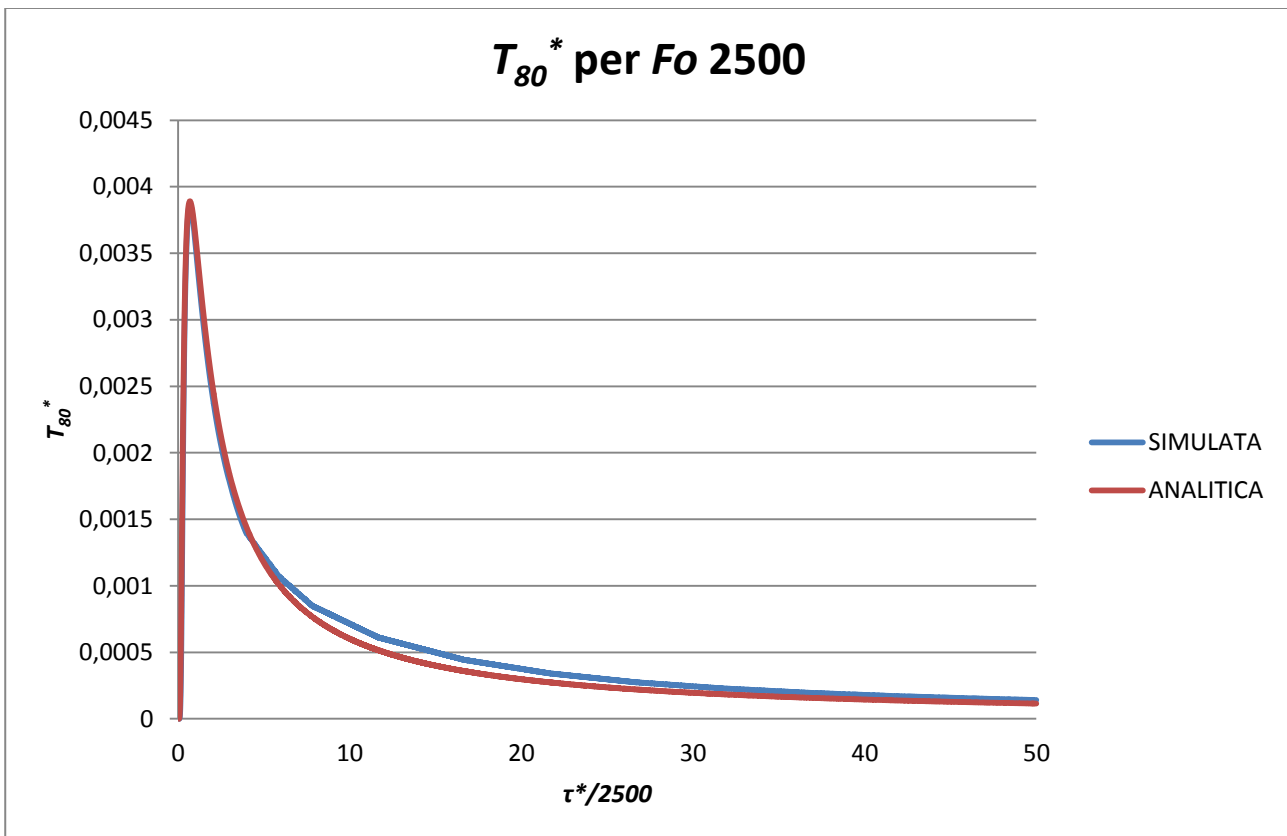
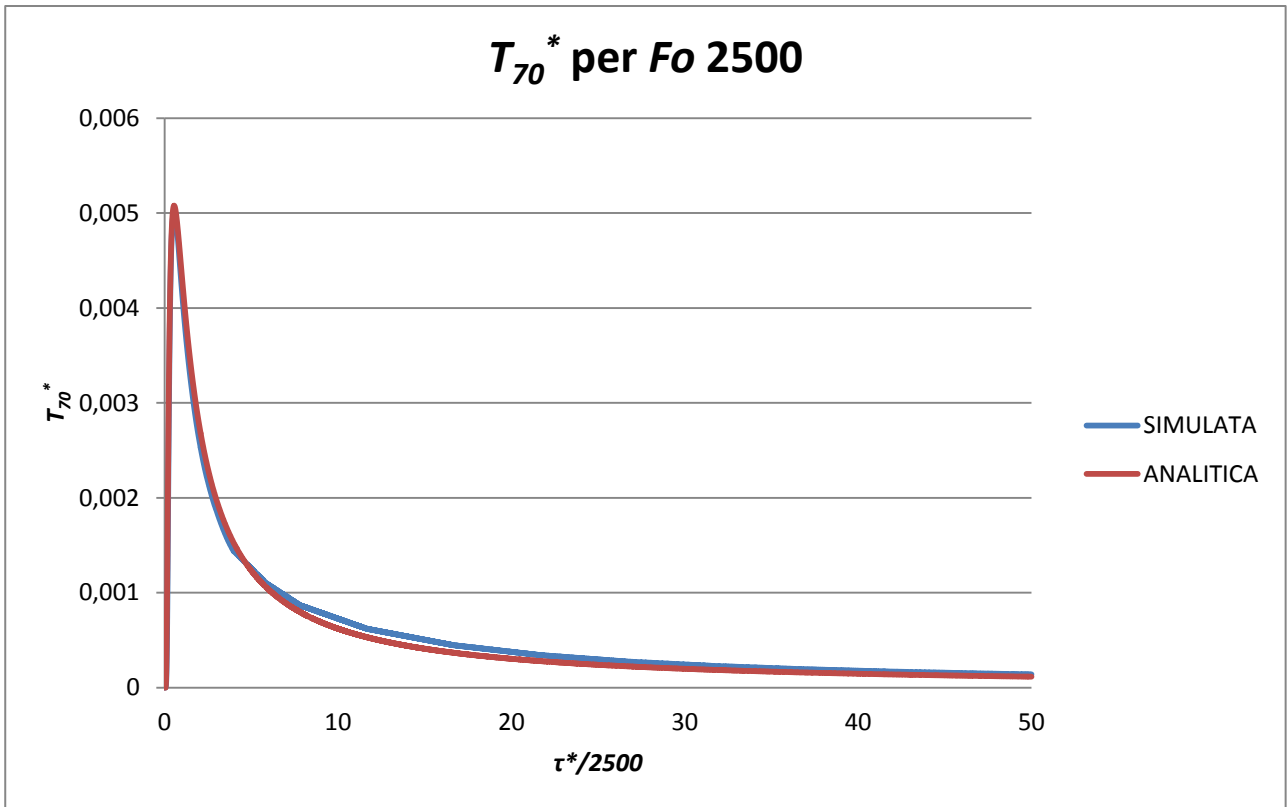


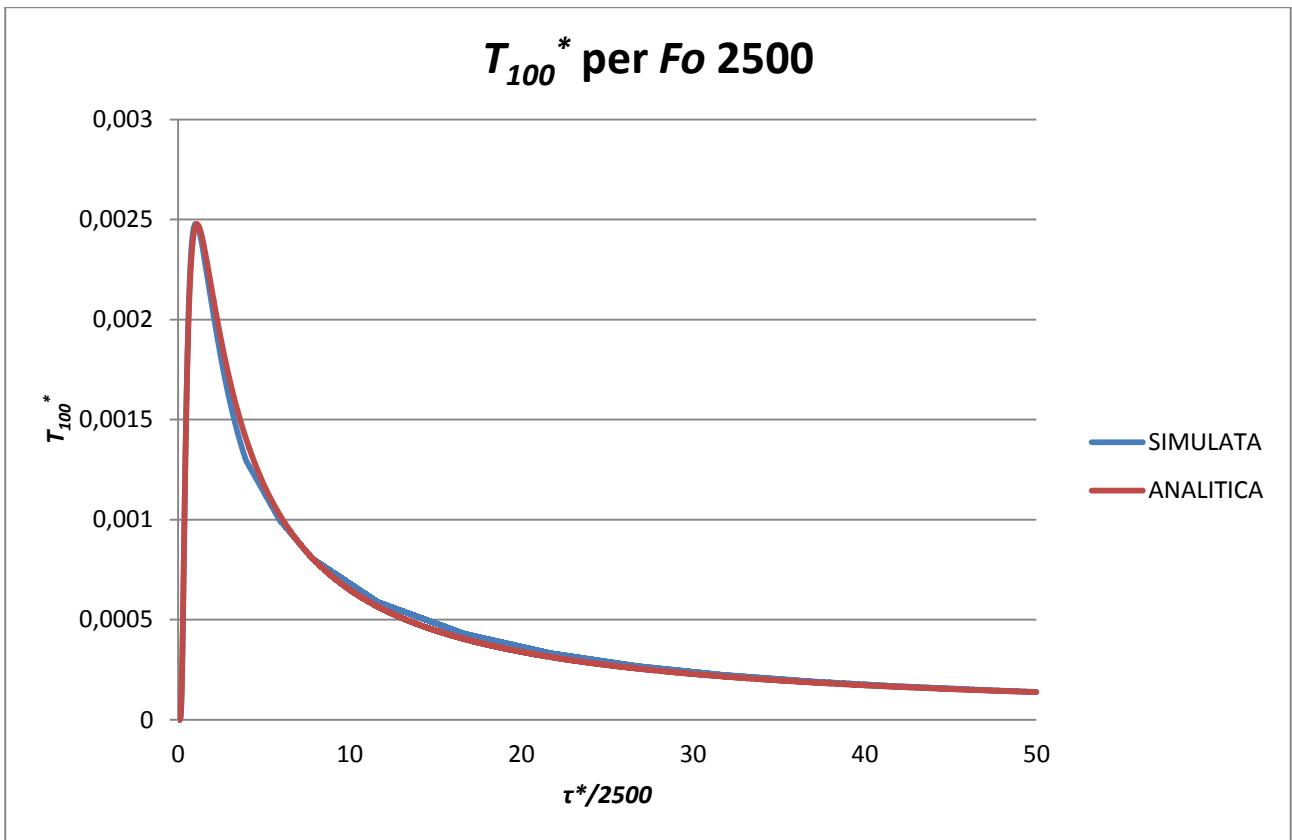
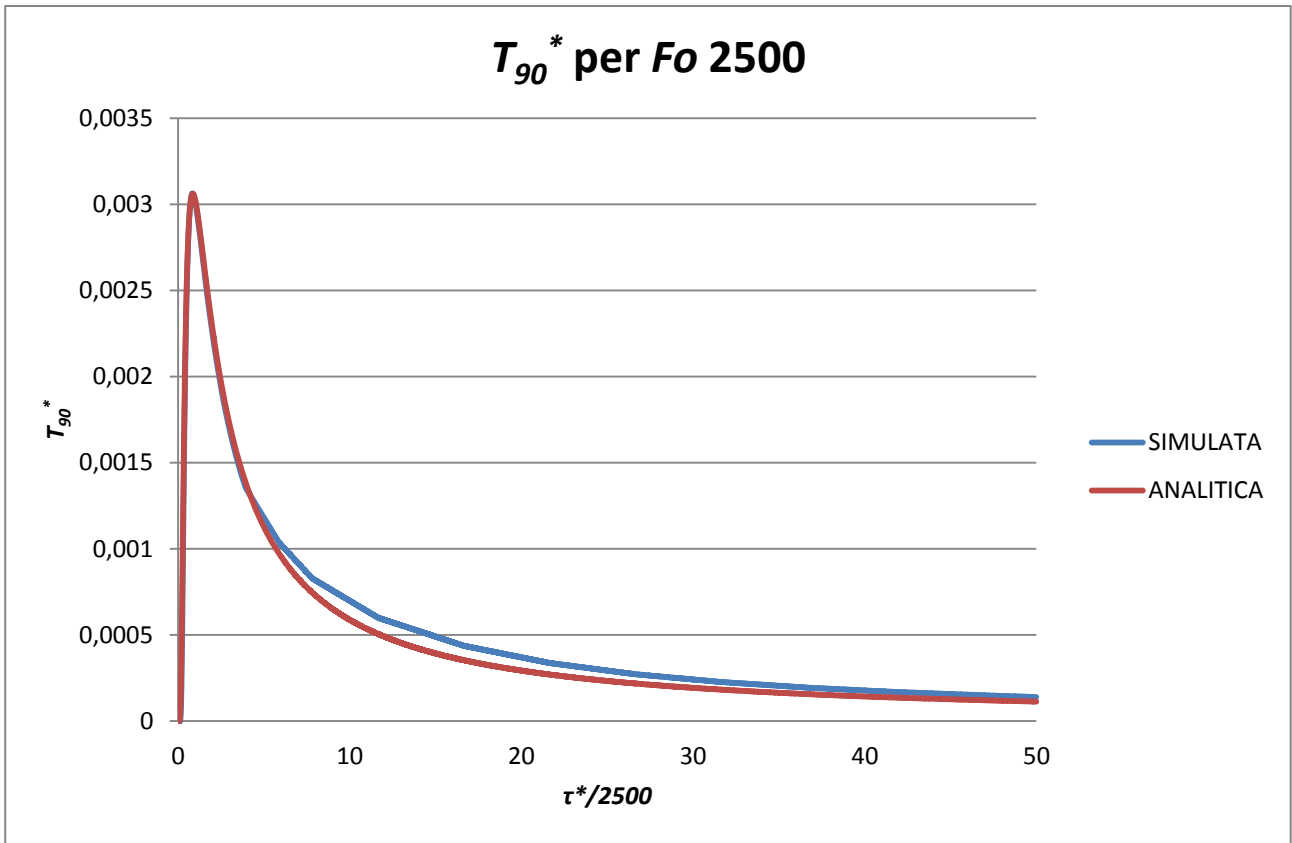


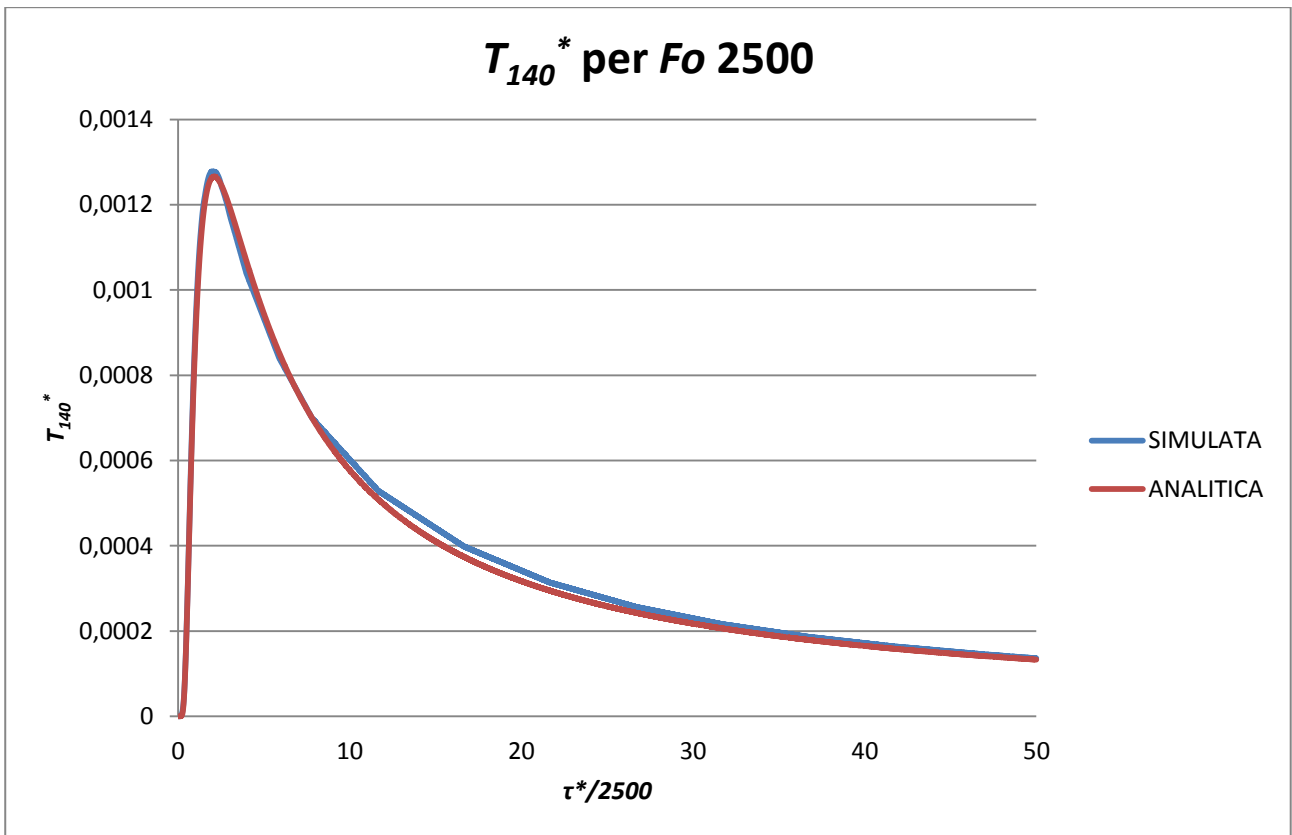
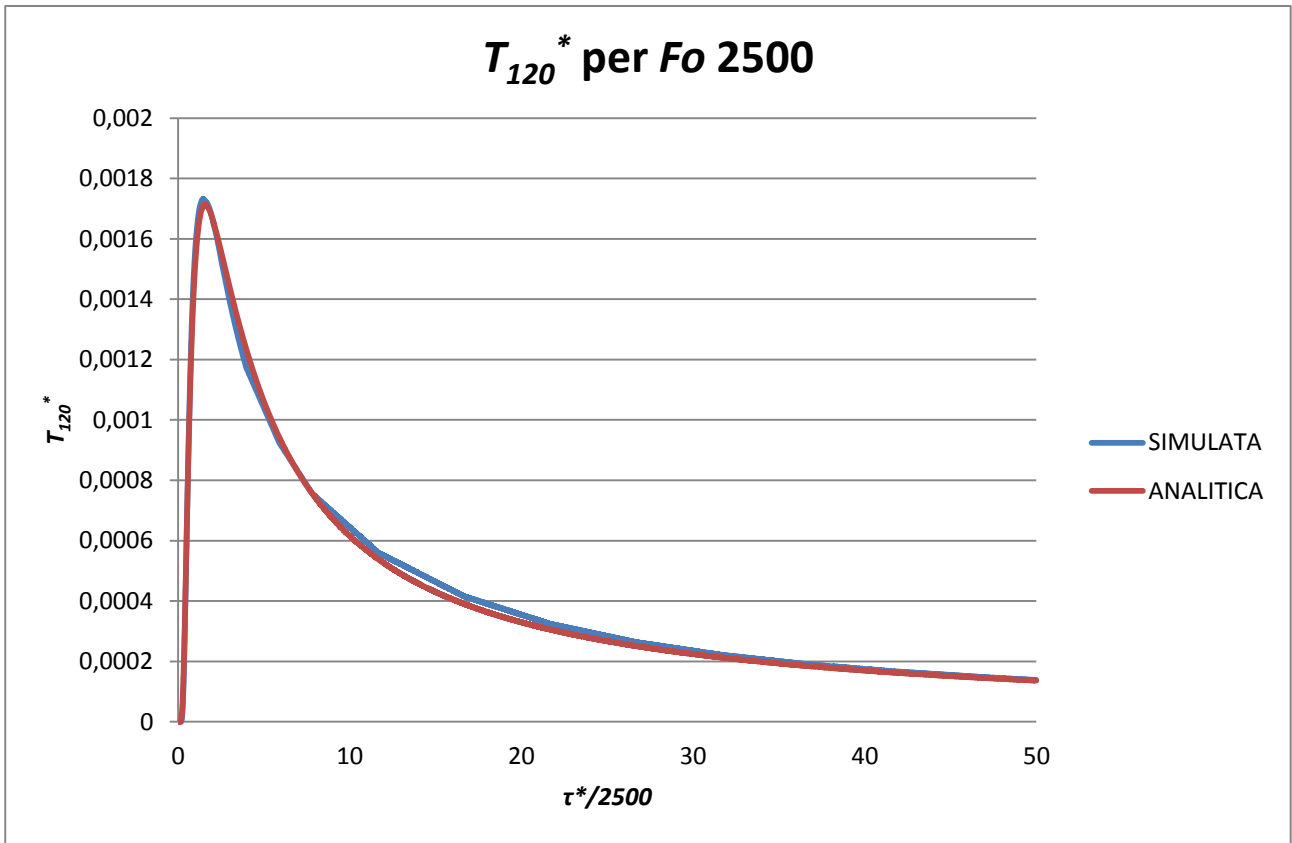
- Temperatura adimensionale in funzione del tempo adimensionale a varie distanze rispetto al centro della sonda (per i grafici in questo caso sono stati invece utilizzati tutti i 16000 valori).

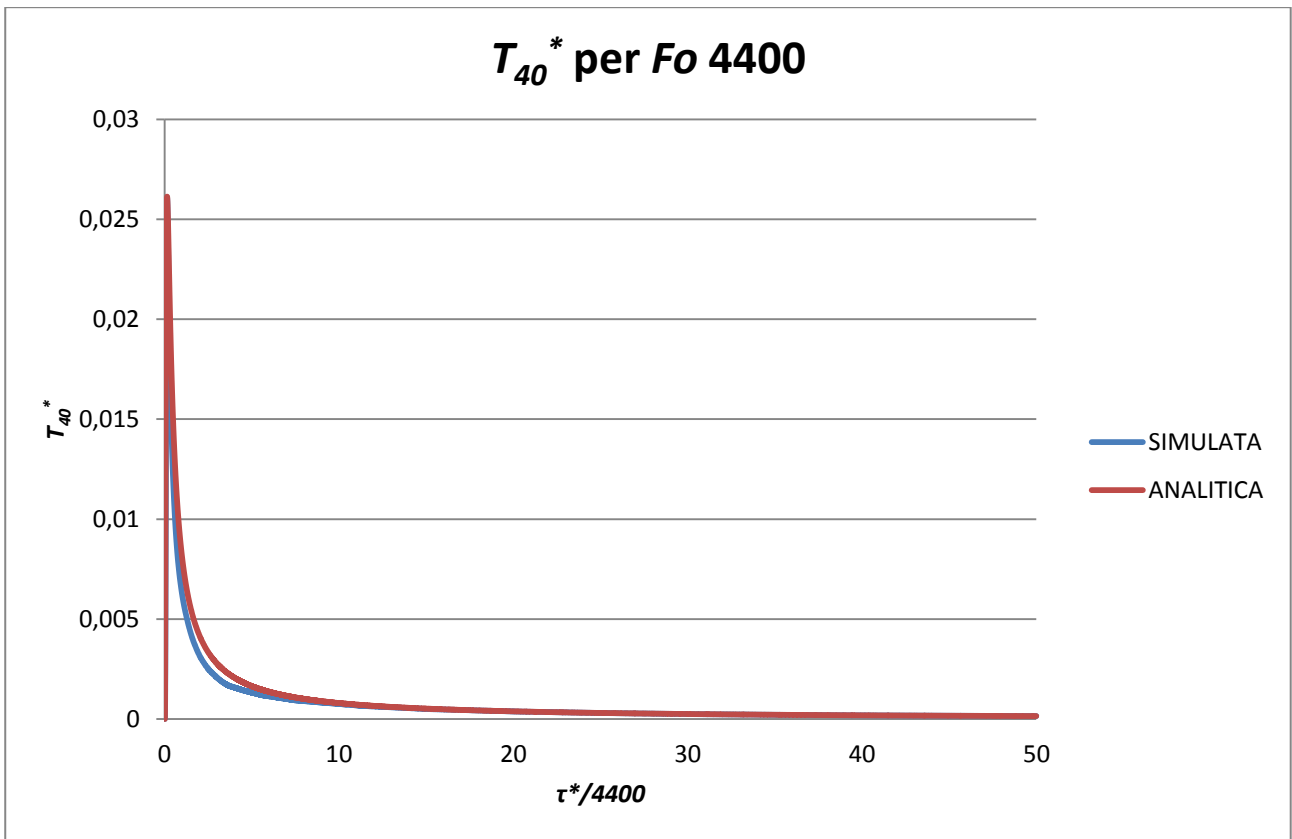
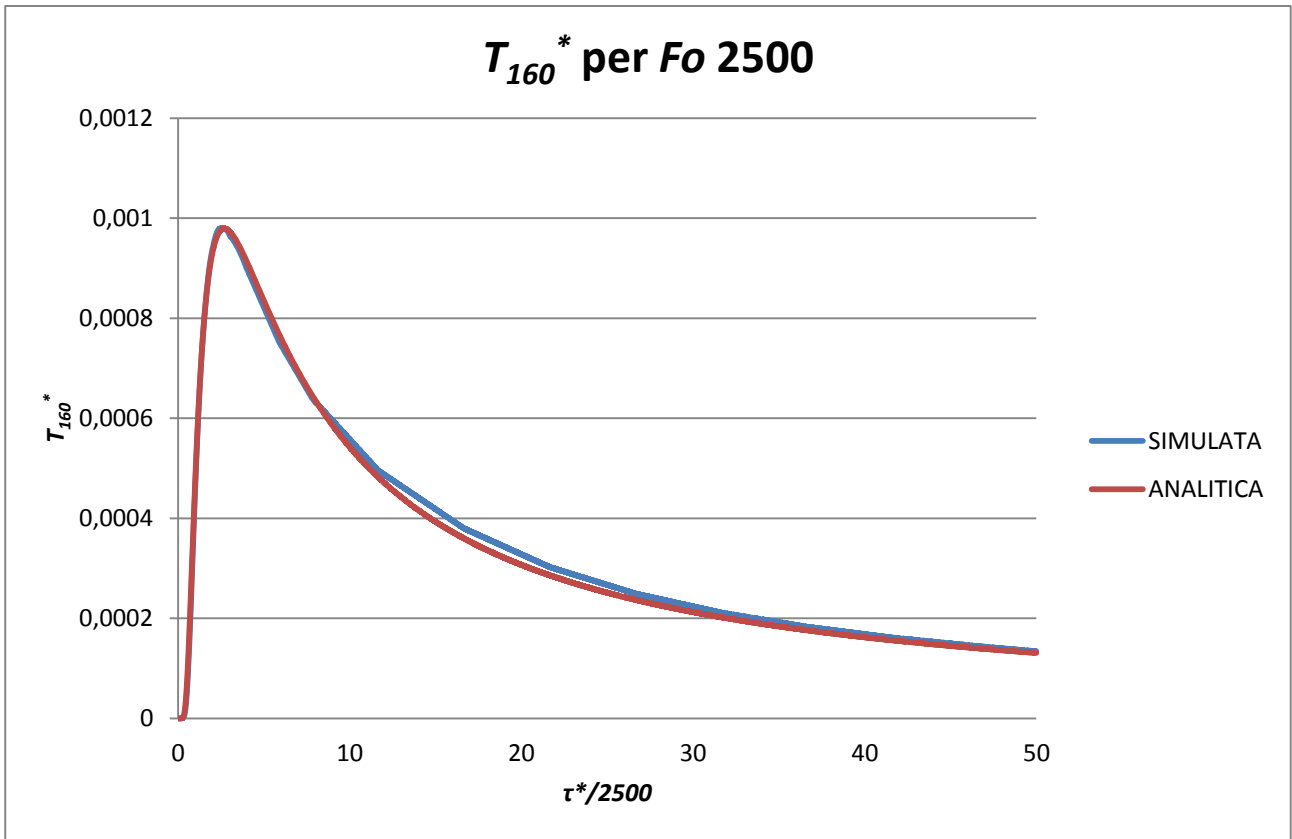


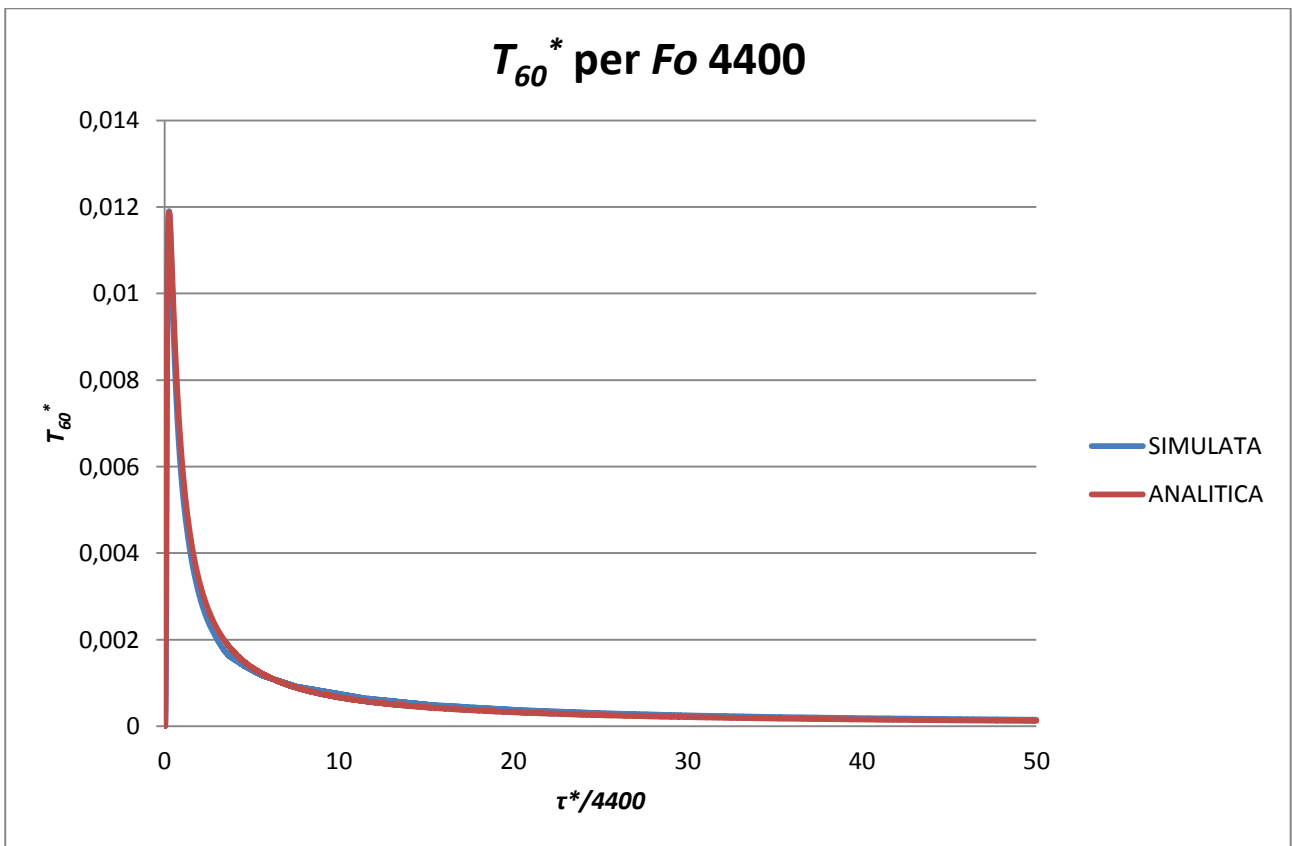
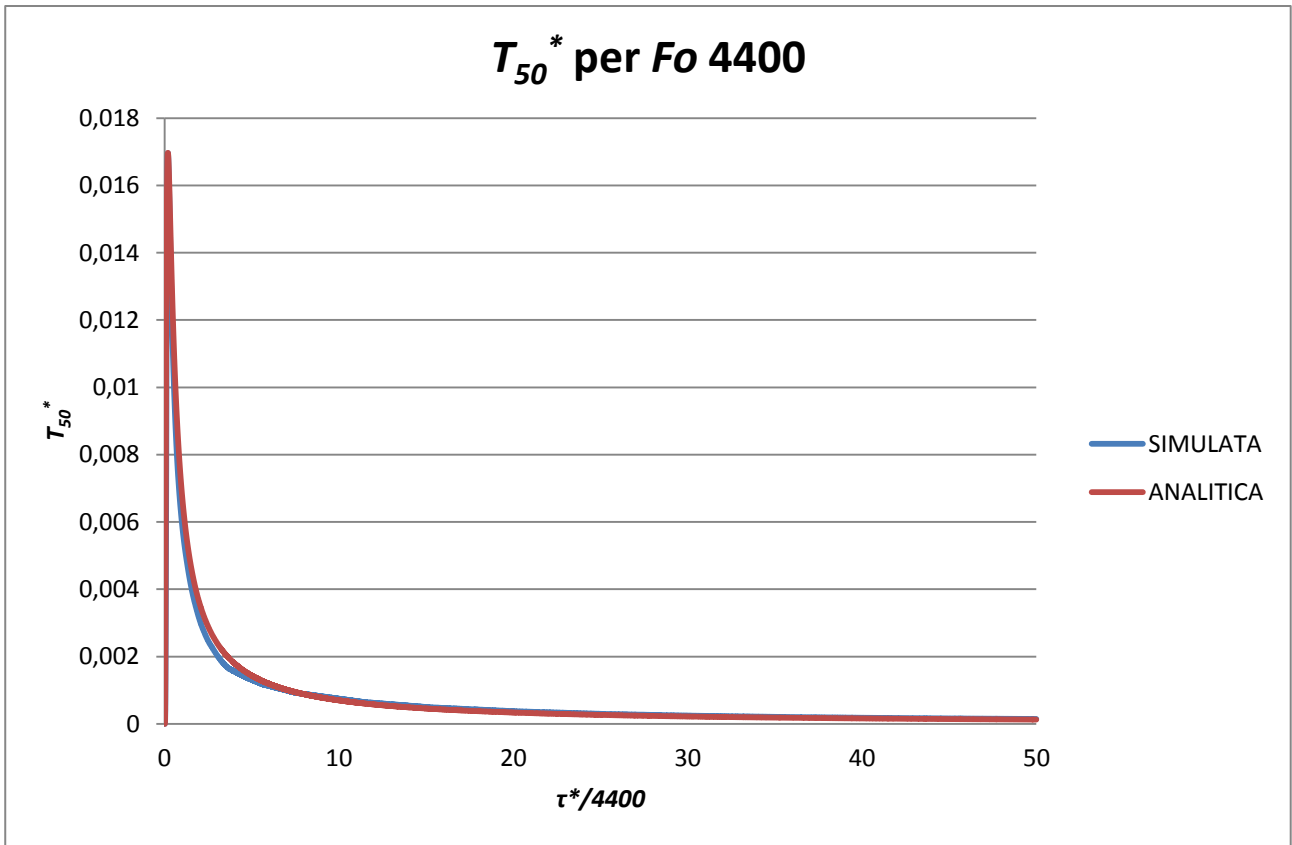




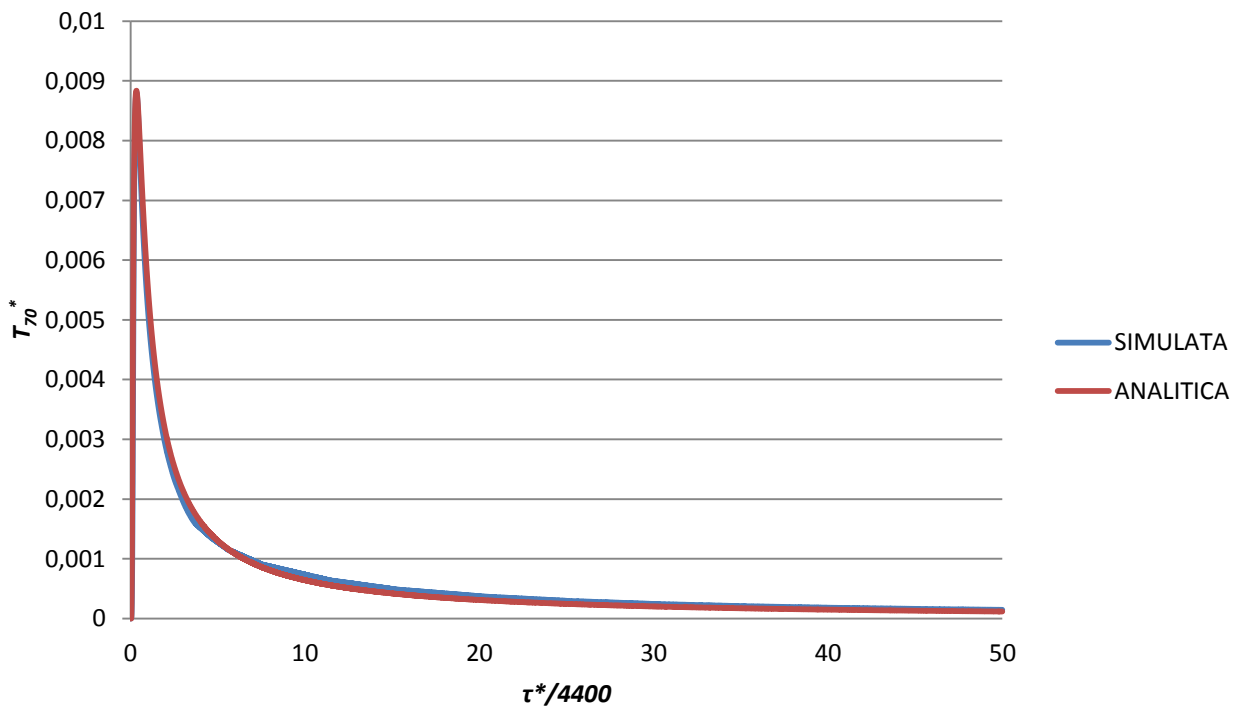




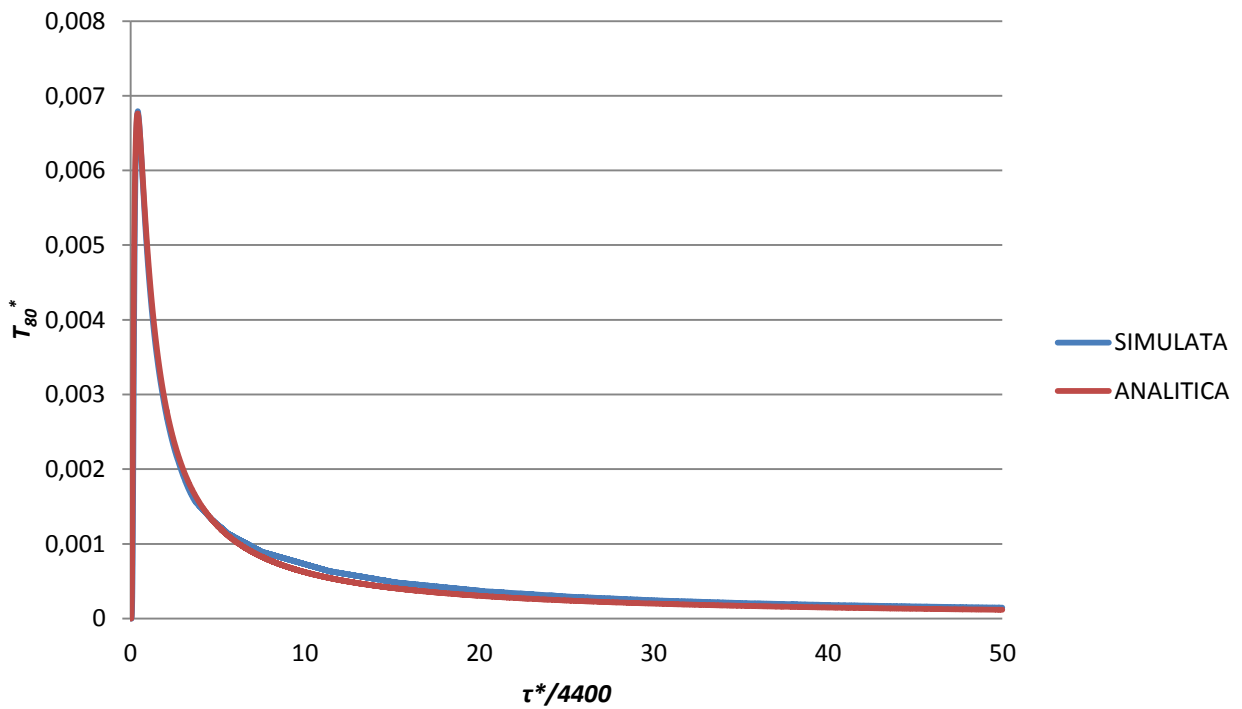


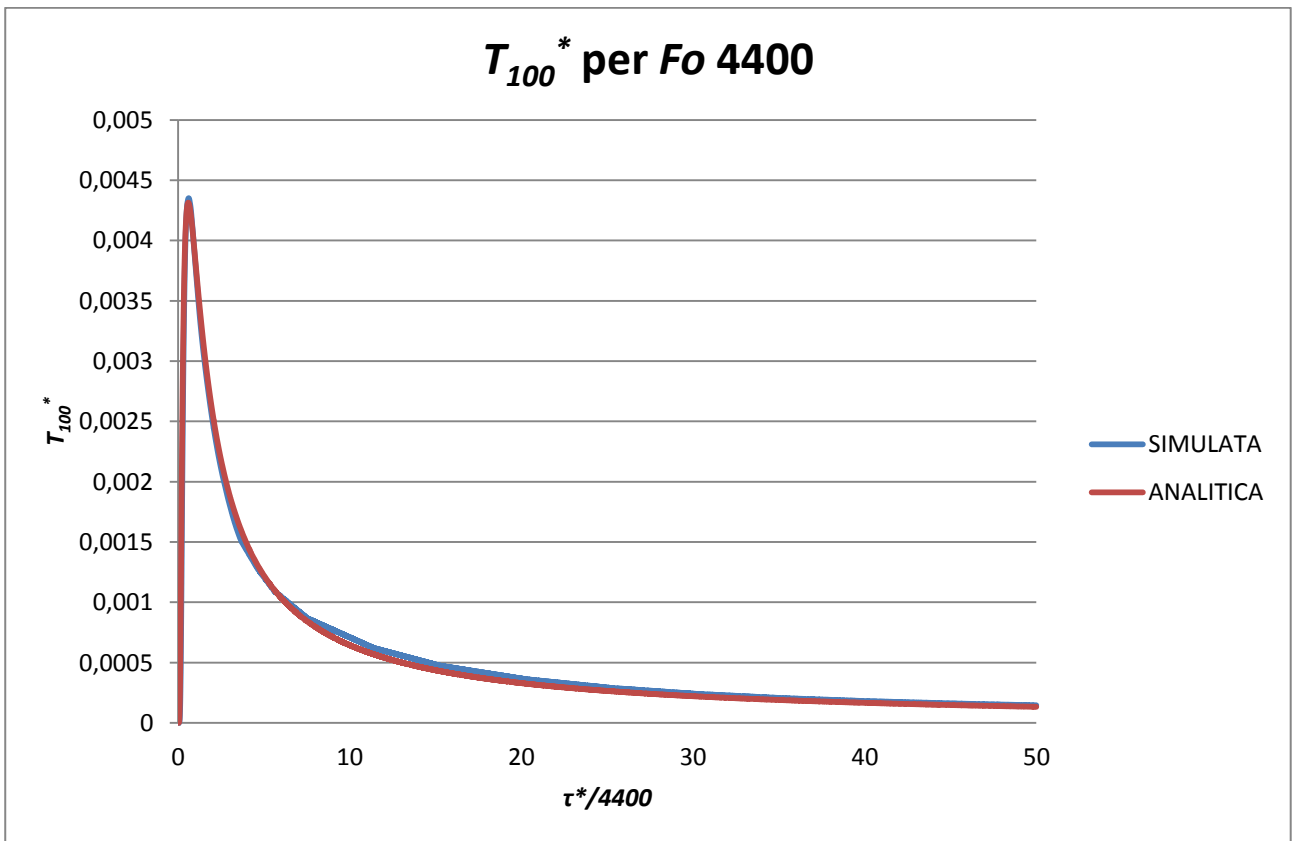
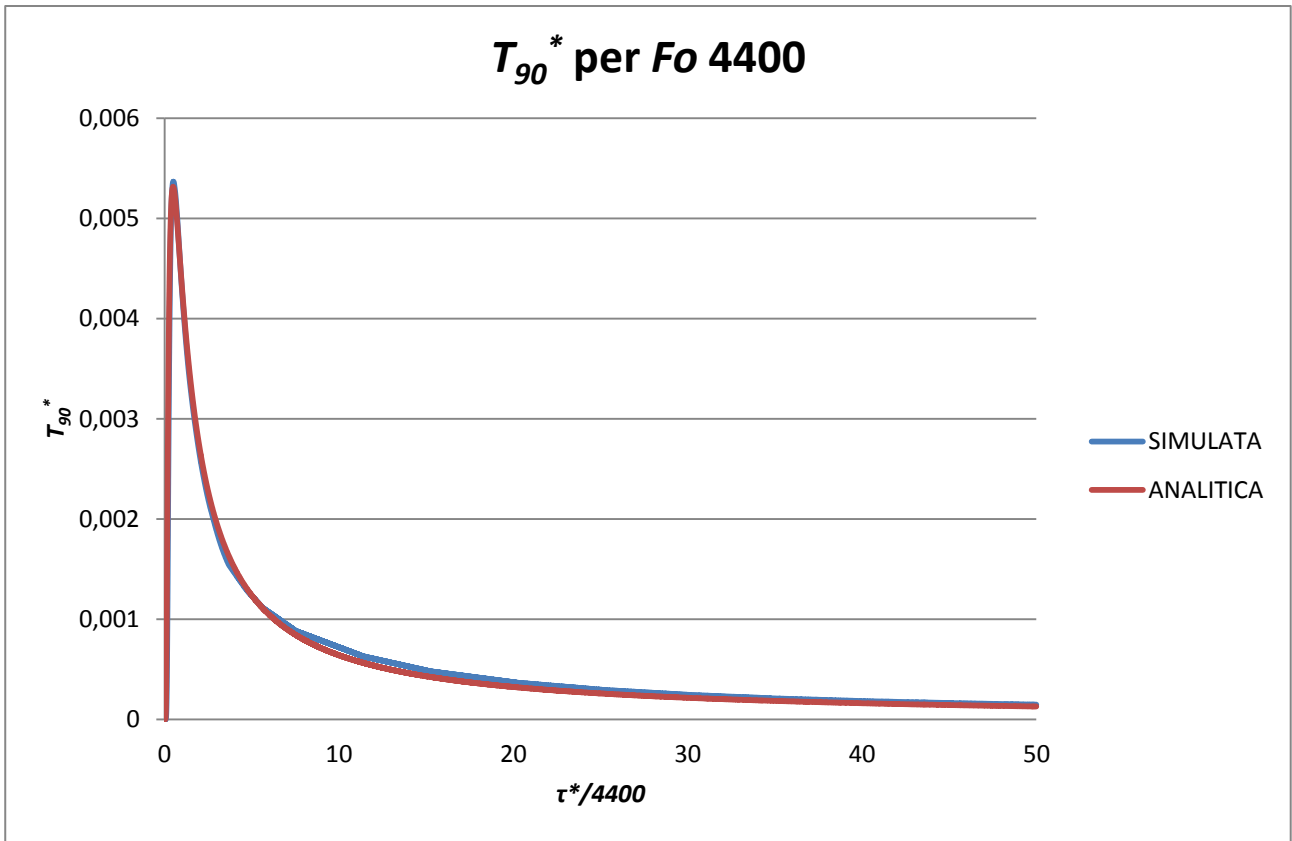


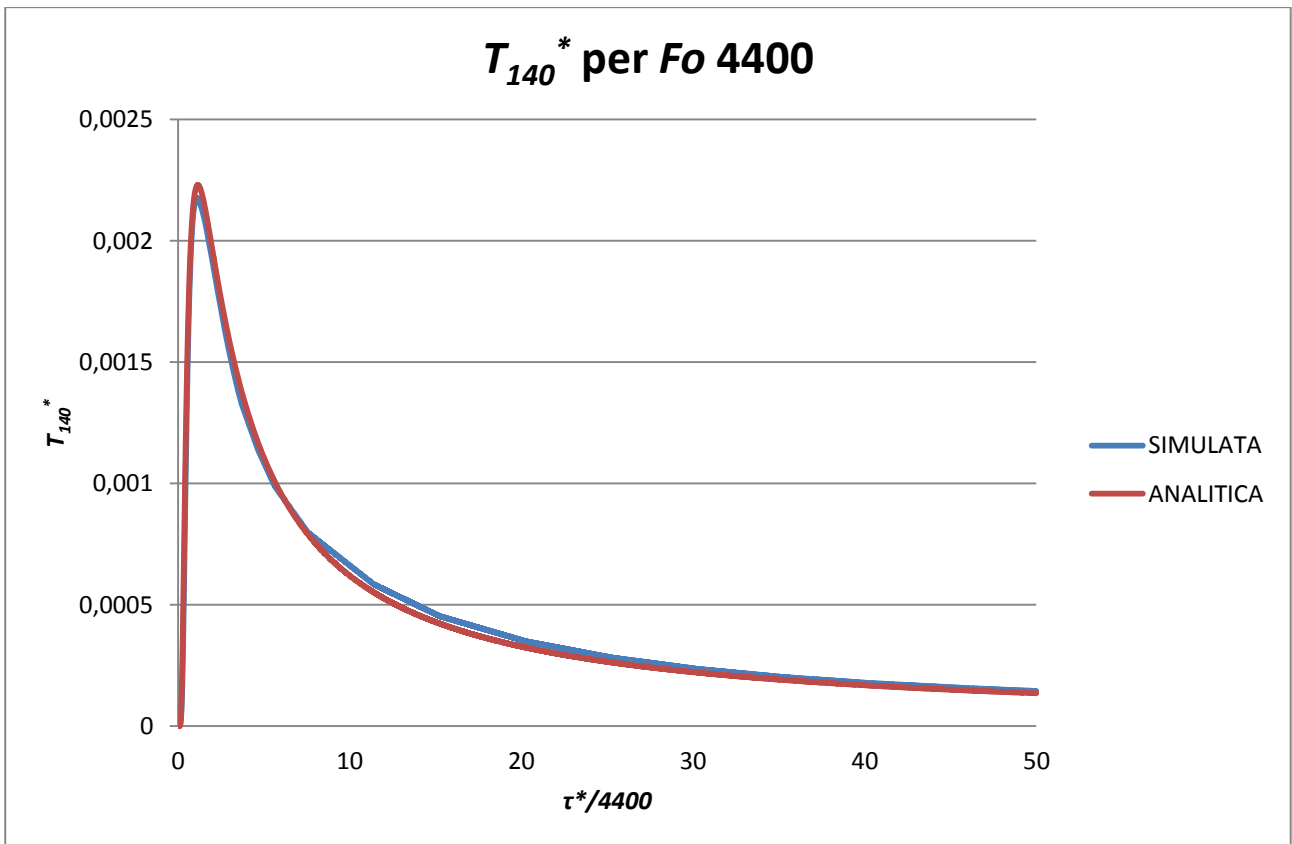
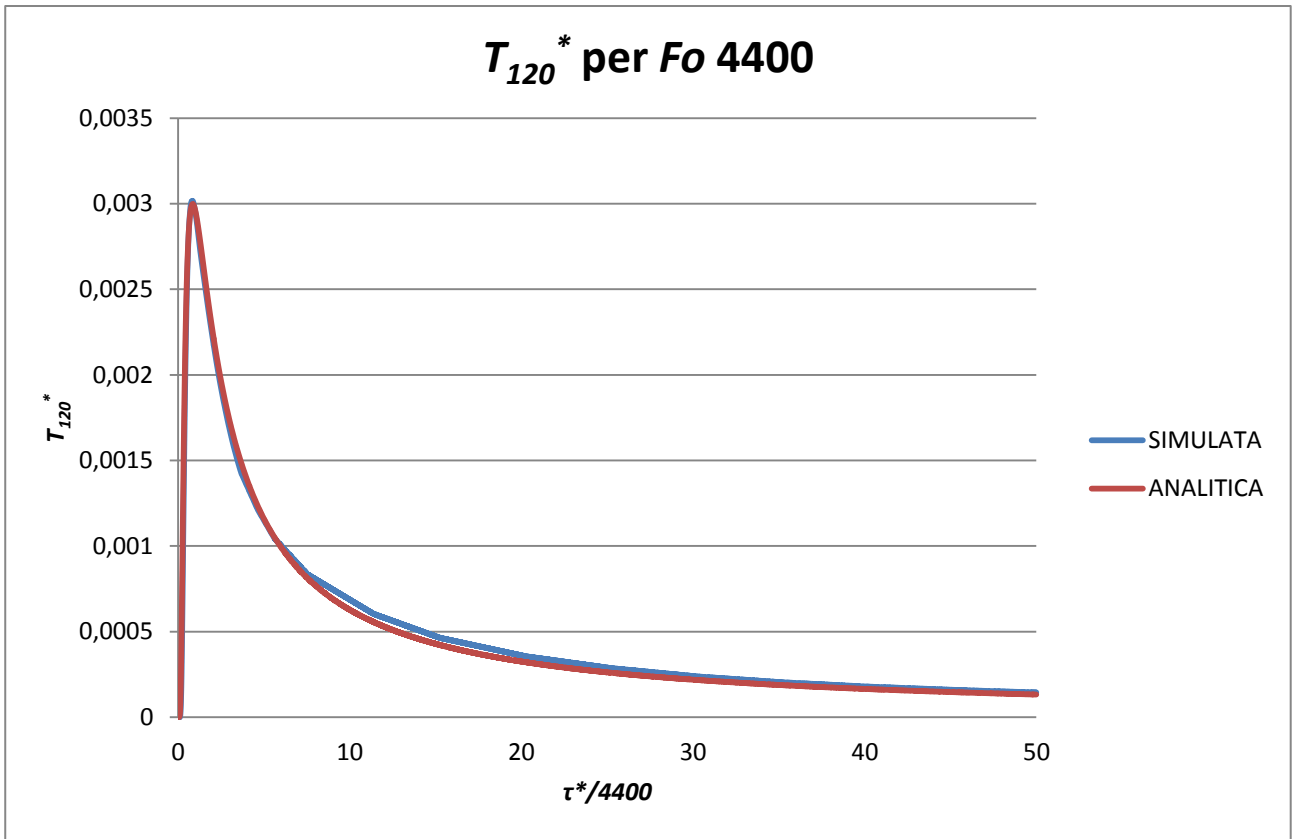
T_{70}^* per Fo 4400

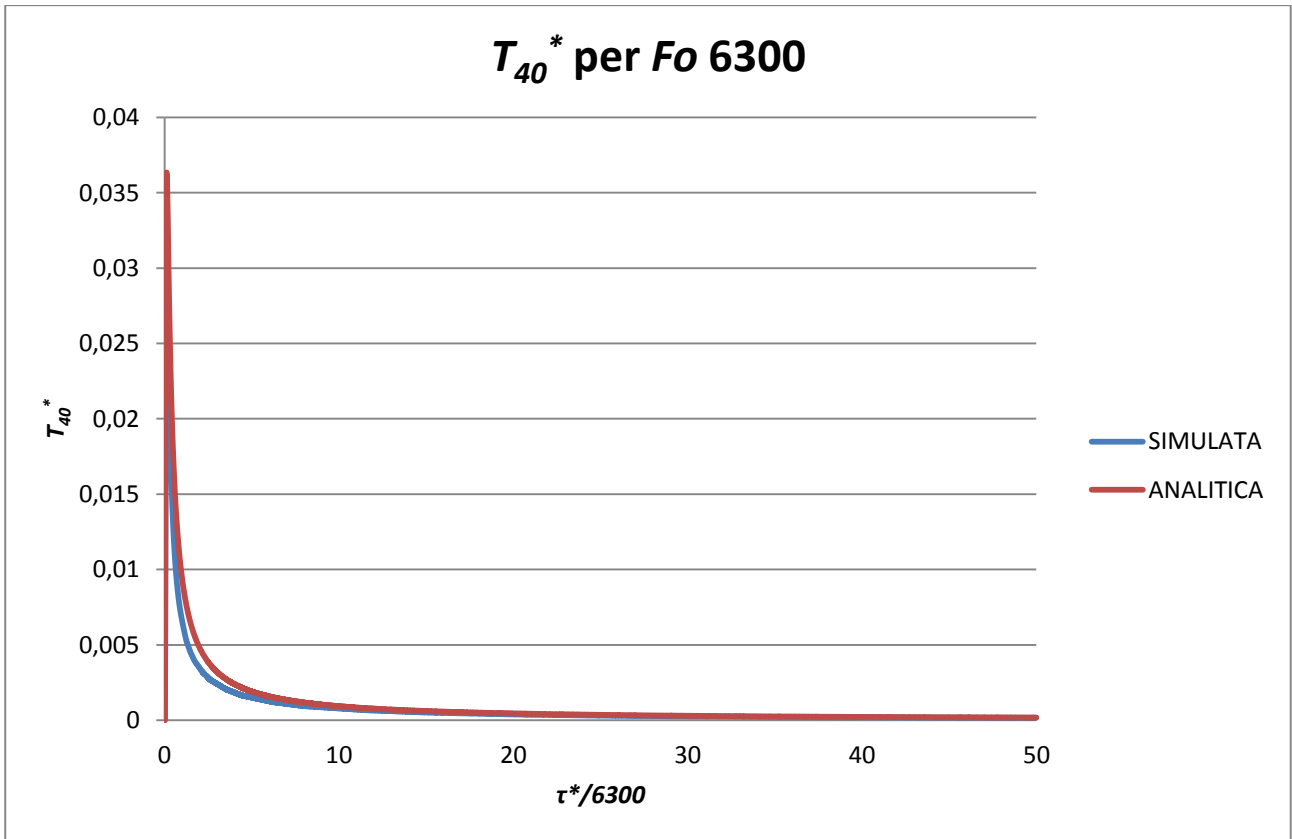
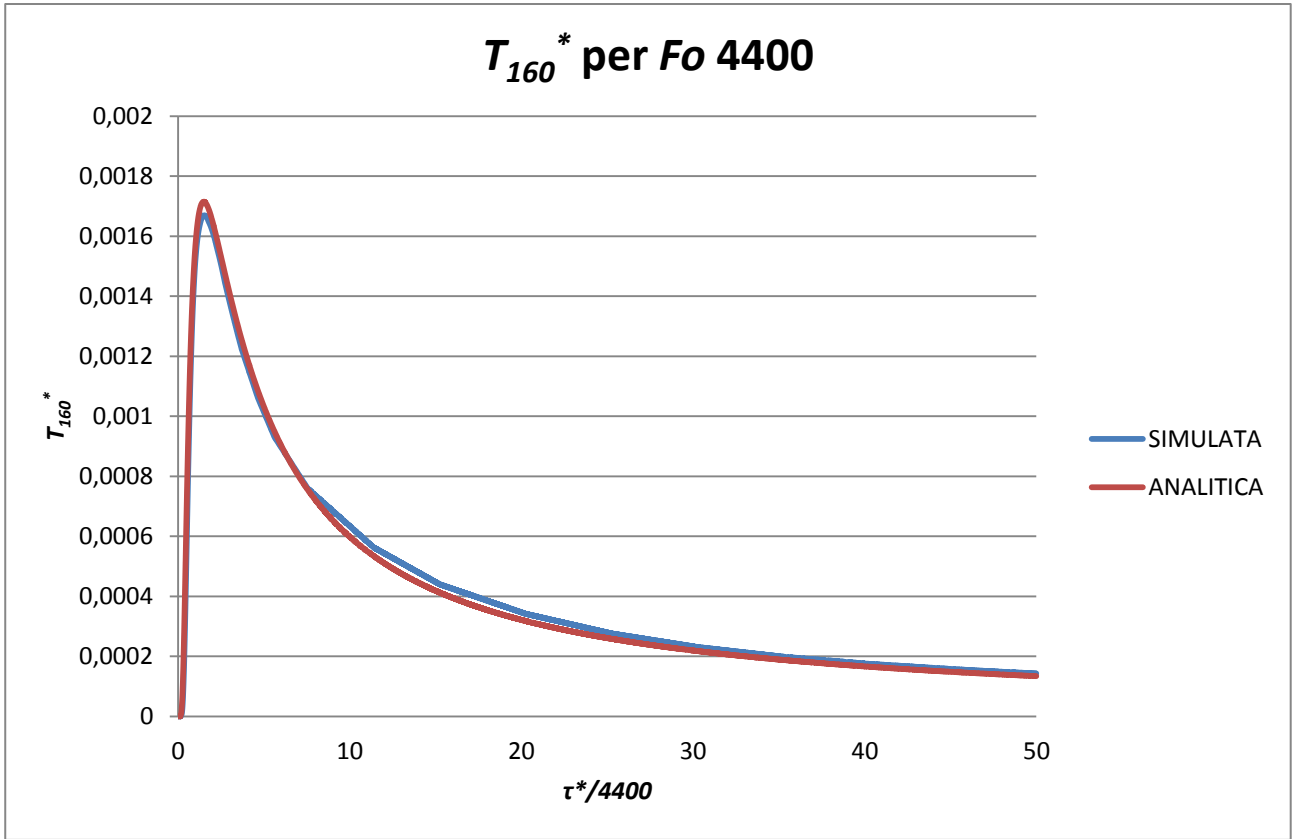


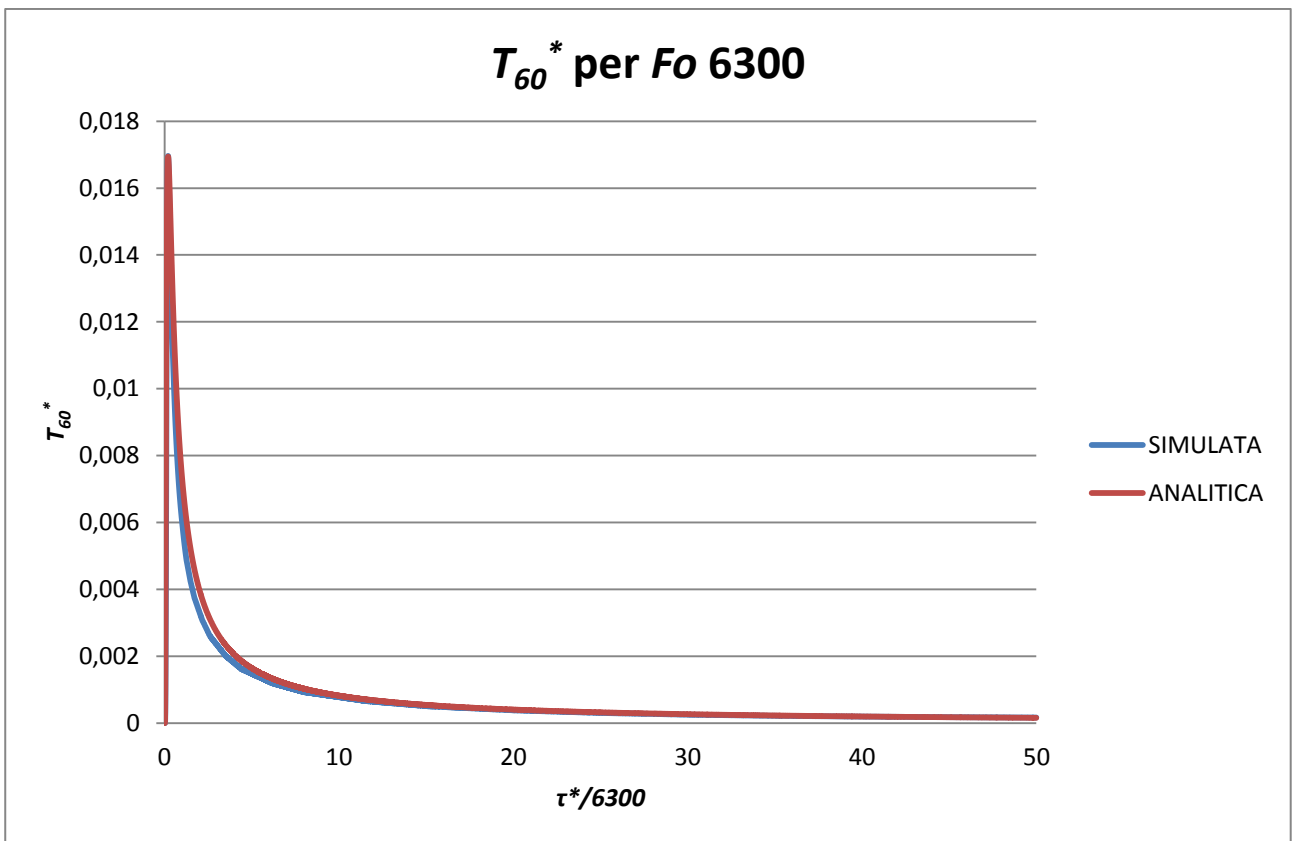
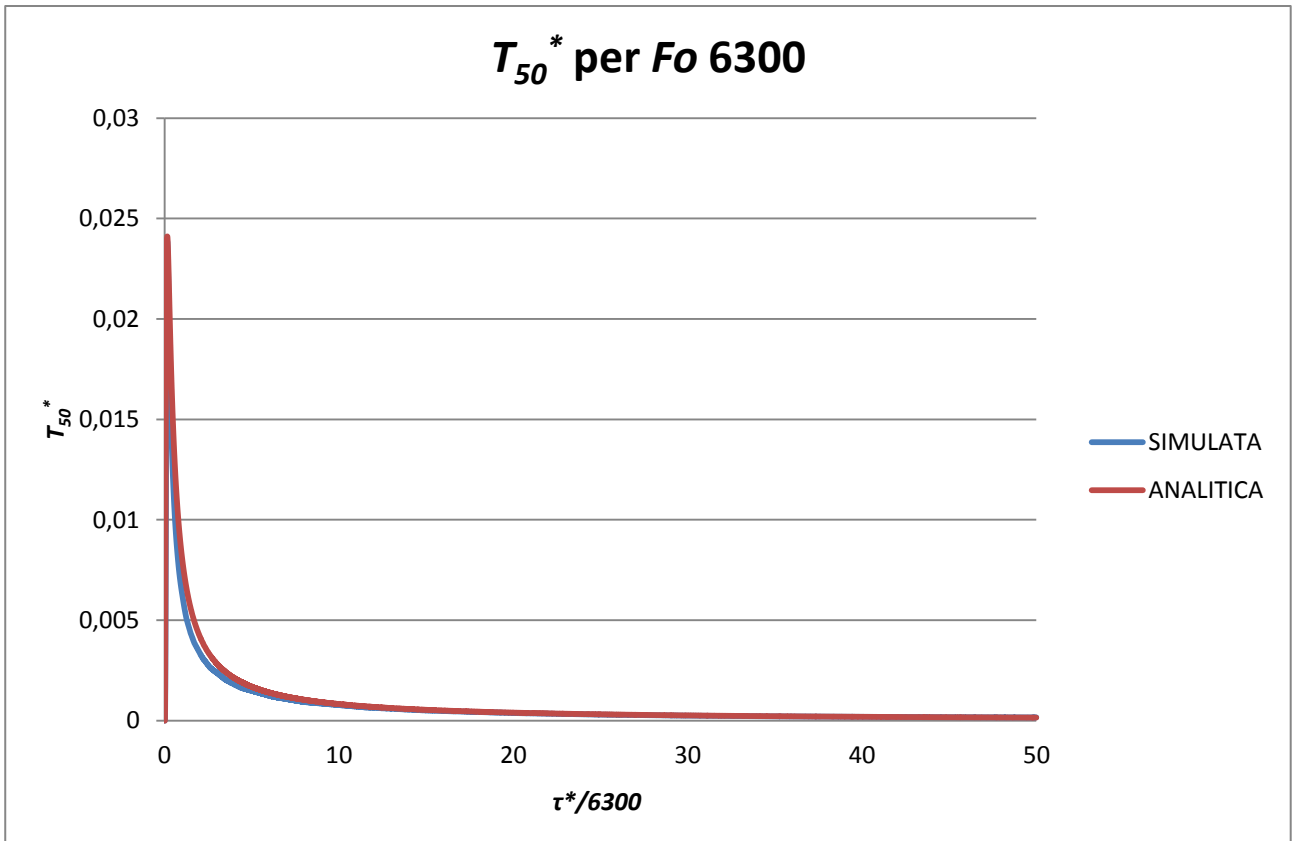
T_{80}^* per Fo 4400

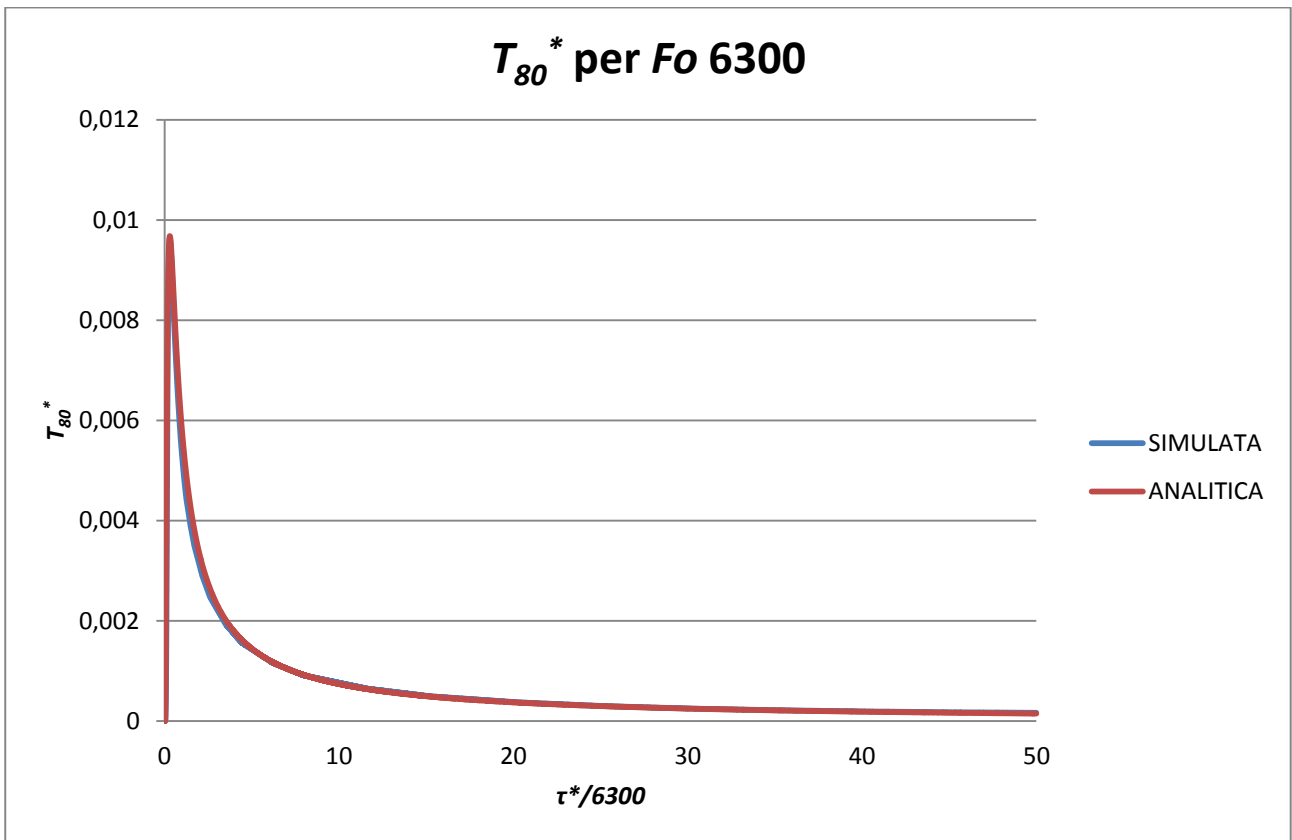
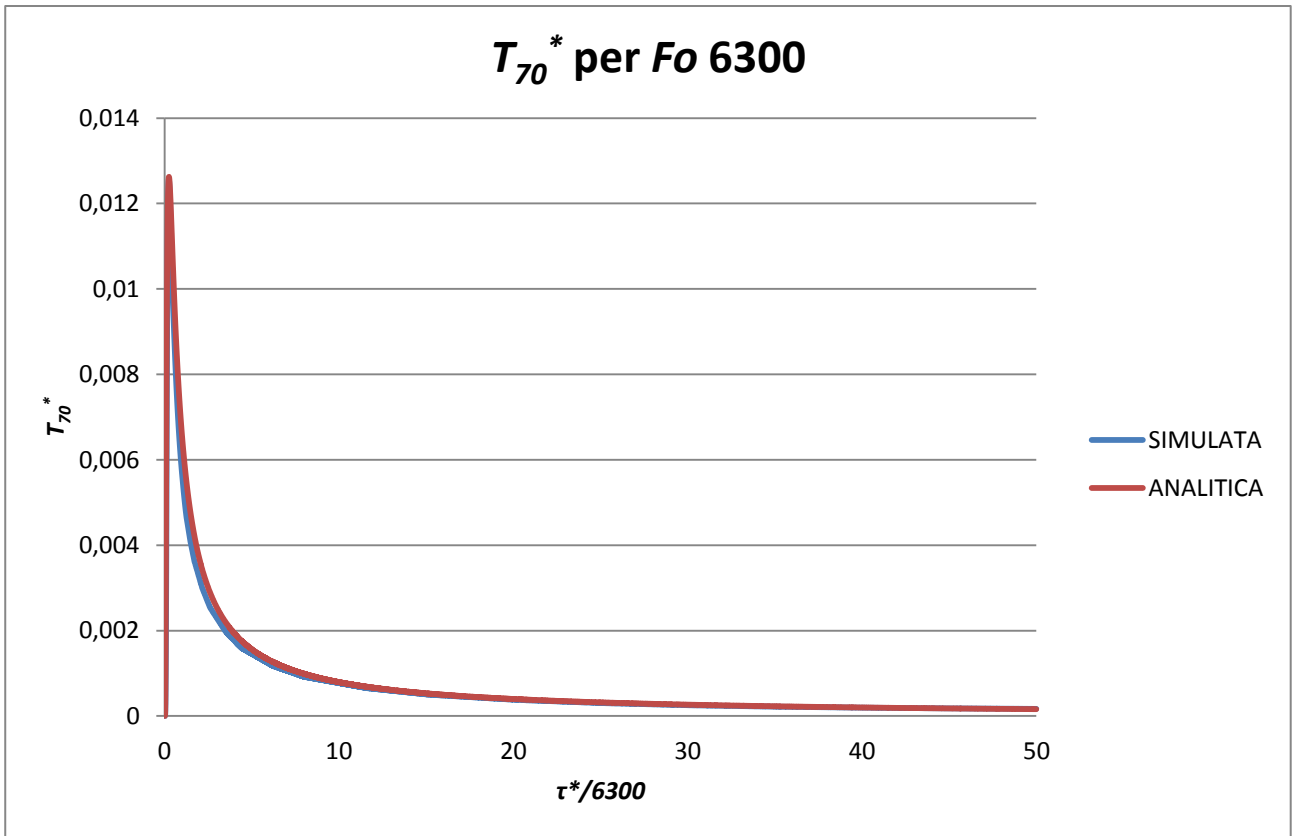


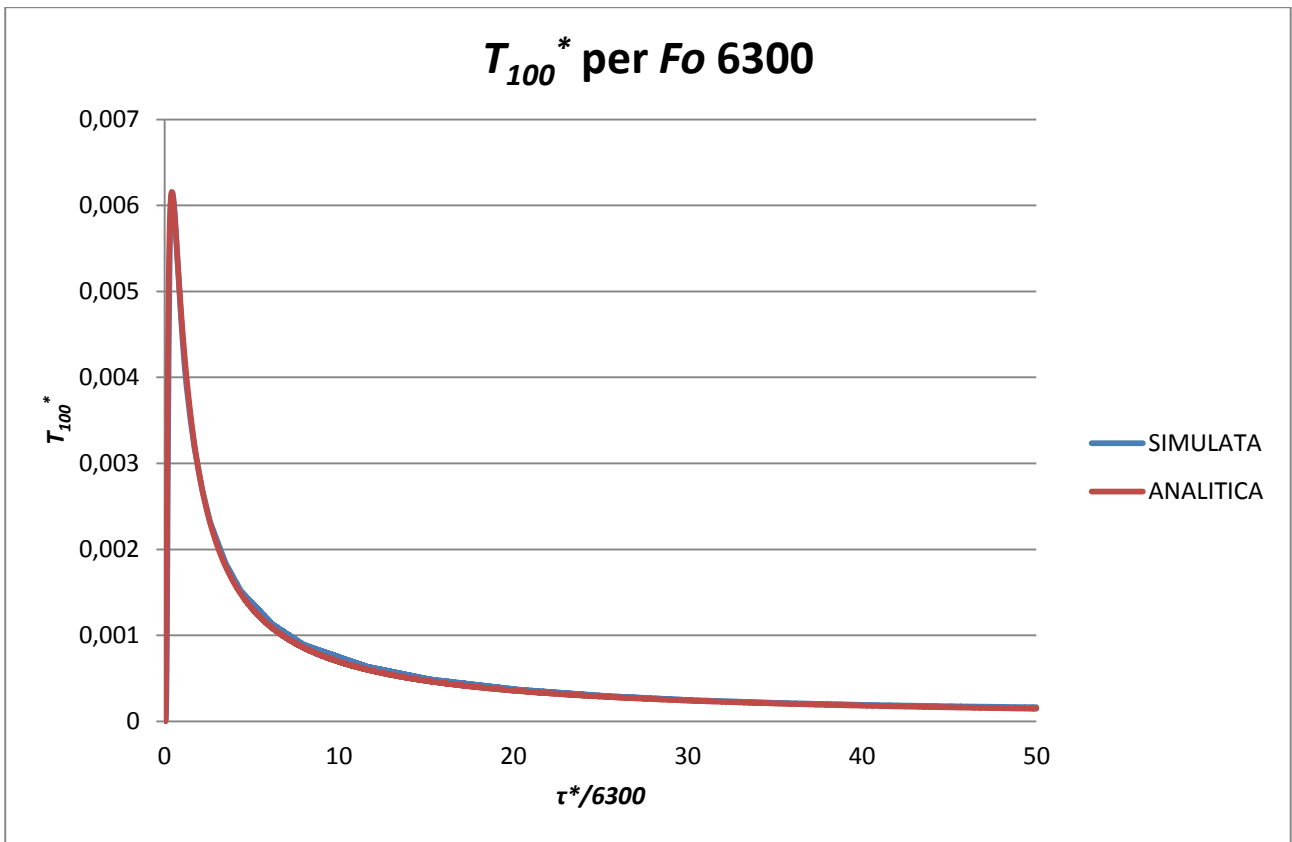
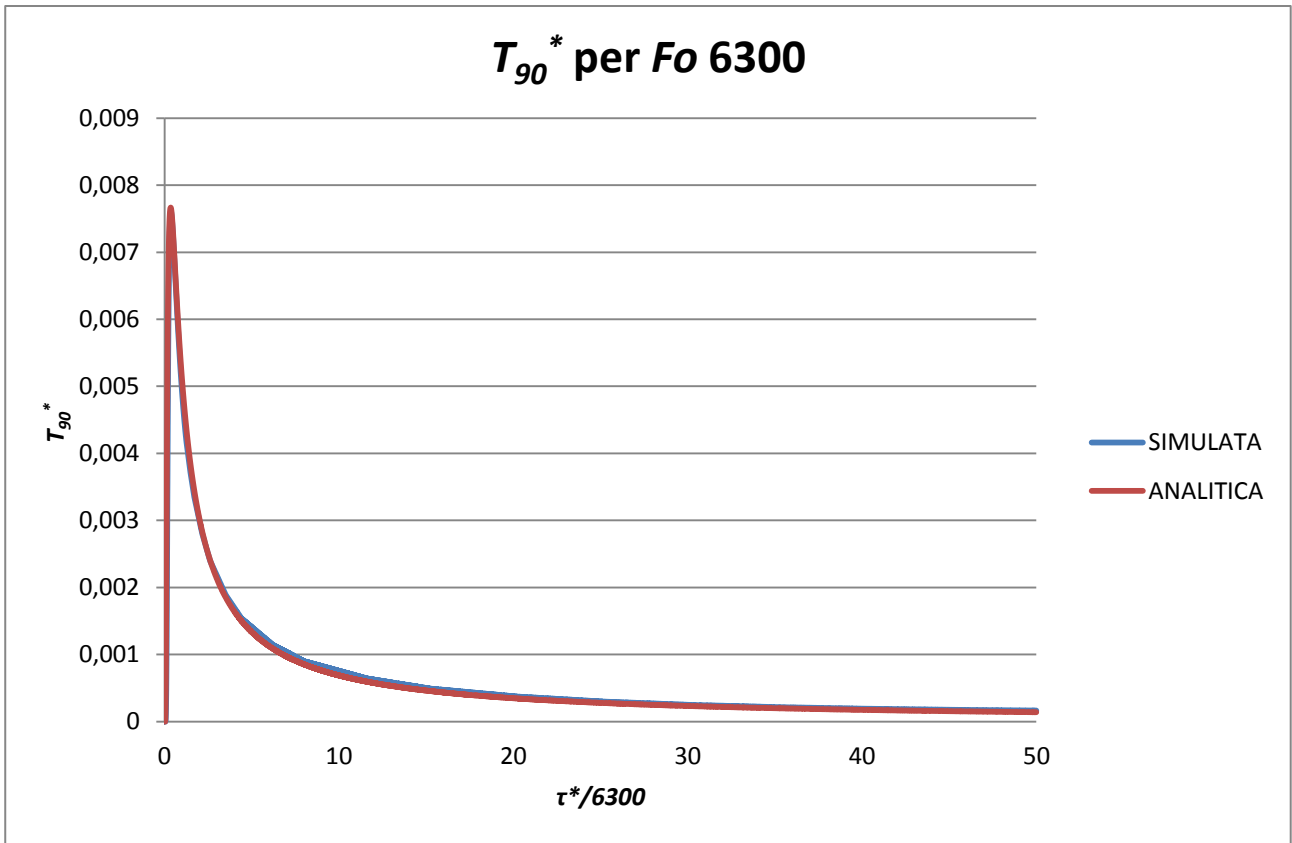


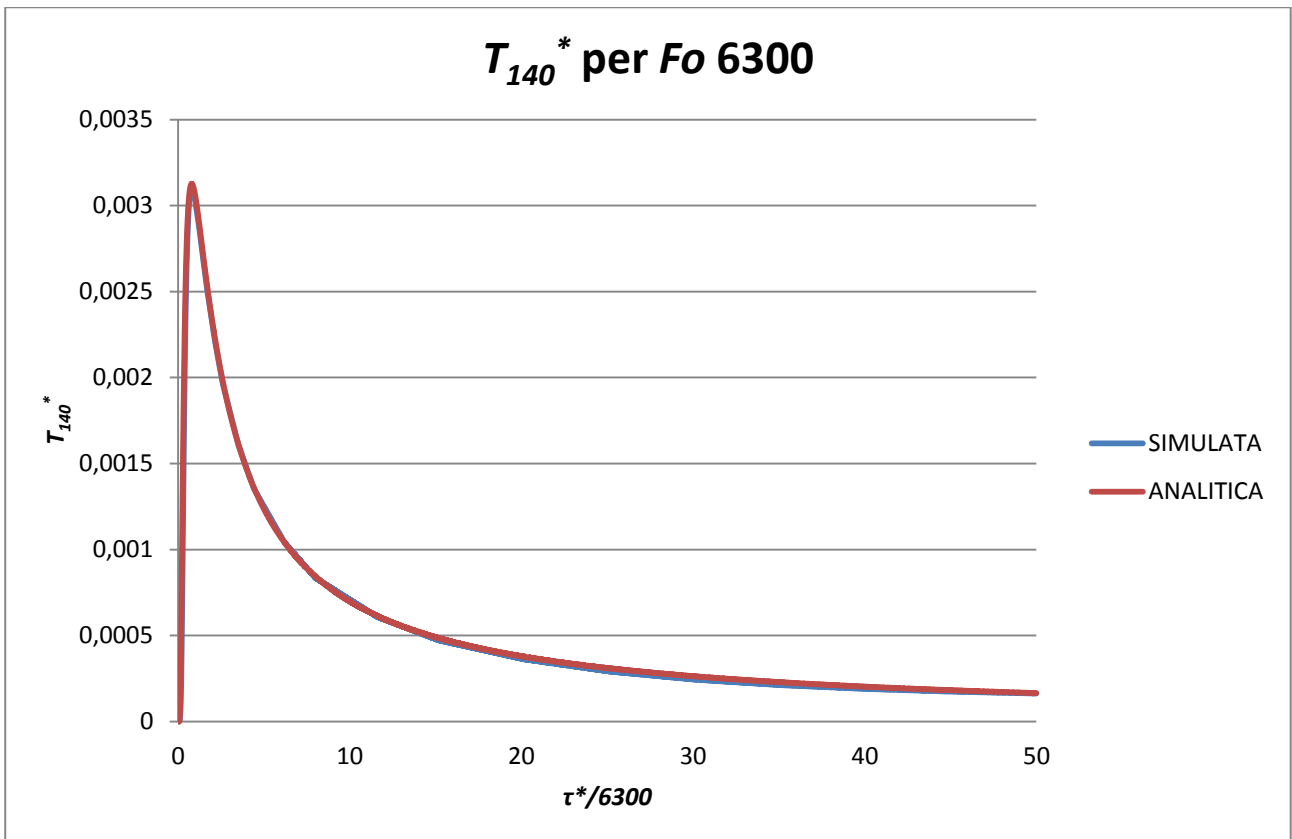
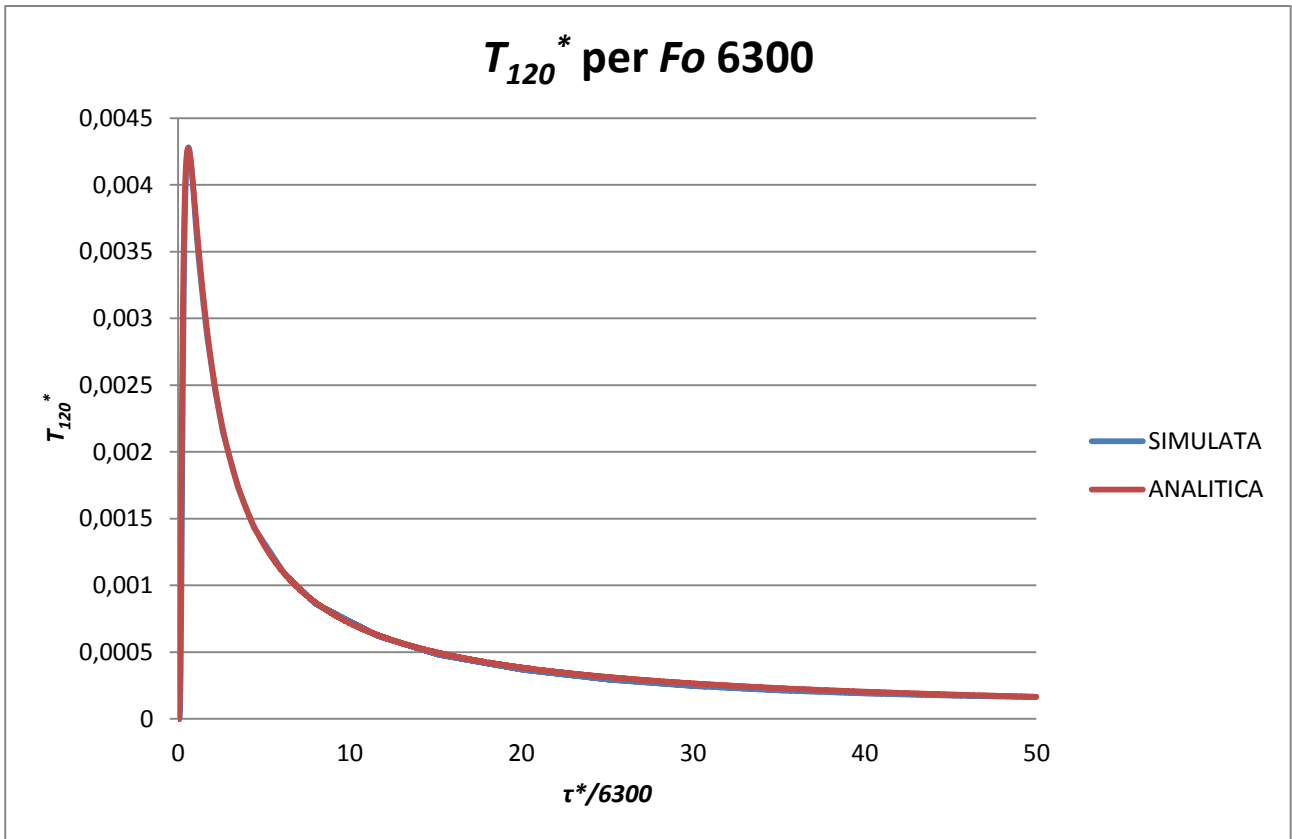


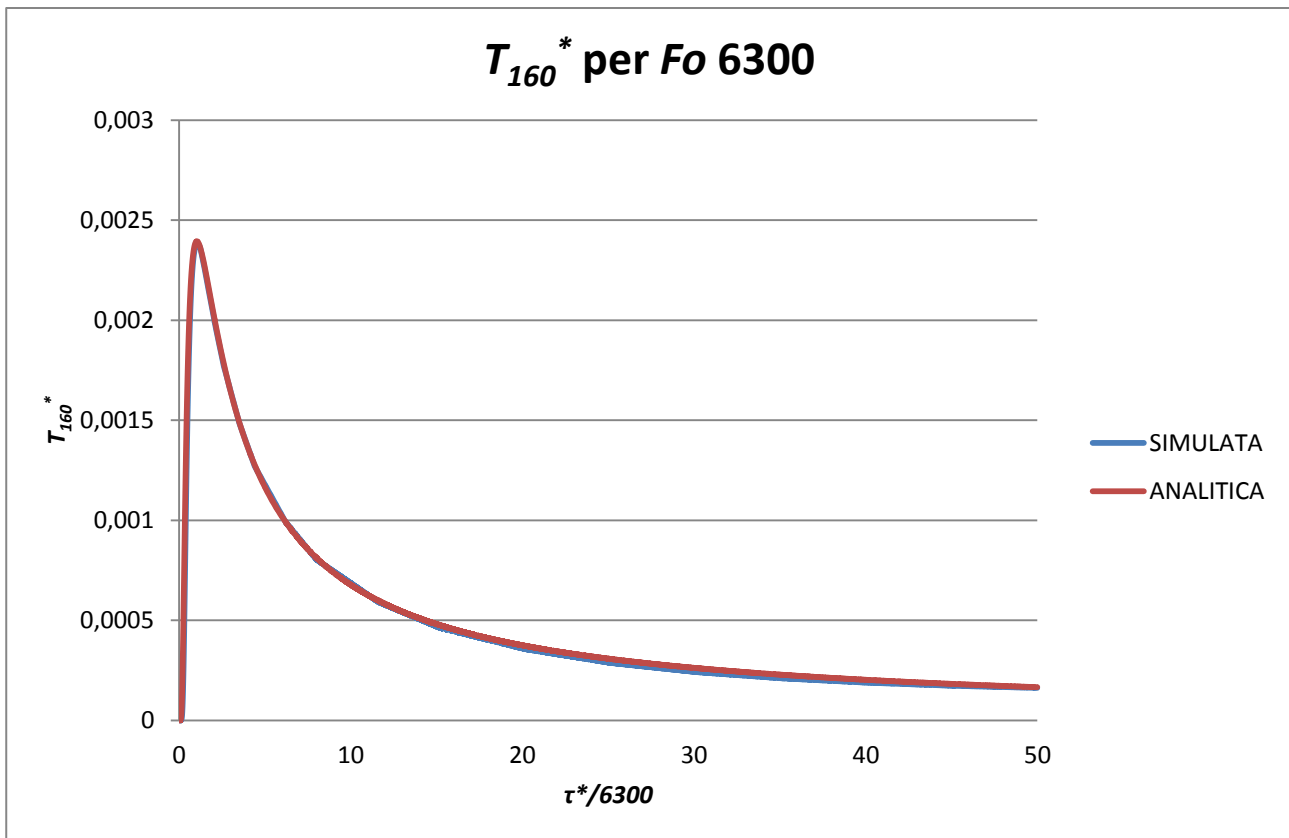












Per quanto riguarda l'interfaccia tra sonda e terreno, si nota che vi è buon accordo tra dati simulati e curve interpolanti sia nei tratti di salita che di smorzamento. Durante la fase di discesa si osservano invece le principali differenze. Inoltre le curve analitiche superano in tutti e tre i casi i valori simulati nei tratti discordi. Questo è un aspetto positivo in quanto significa che le curve interpolanti sovrastimano i dati e dunque se per valutare l'evoluzione della temperatura media all'interfaccia tra la sonda centrale del campo e il terreno si considerassero solo tali espressioni e si ottenesse che il sistema non raggiunge mai dei valori critici, allora anche per le simulazioni sicuramente non si evidenzerebbero dei problemi.

Se invece si guardano gli andamenti delle temperature valutate alle varie distanze questo non è più vero. I dati sono meno in accordo e in alcuni grafici la curva interpolante si trova al di sotto dei valori simulati. Una soluzione per cercare di migliorare la corrispondenza tra le due curve potrebbe essere quella di modificare per tentativi i coefficienti trovati per le curve interpolanti.

Analizzato il caso di singolo carico termico mensile, è stato successivamente visto l'effetto prodotto invece da un carico termico annuo. Esso è stato definito come enunciato dal modello, cioè mediante sovrapposizione temporale di dodici carichi di calore costanti di durata un mese ciascuno opportunamente pesati. Per questo studio è stato considerato il solo caso Fo 2500 e il carico termico adottato è stato di tipo parzialmente non bilanciato, con carico di calore prevalente invernale. Inoltre, invece di analizzare l'evoluzione della temperatura della sonda centrale a più distanze, si è scelto di valutare solo cosa succede alla posizione di interfaccia S .

I coefficienti di cui si è fatto uso per la somma pesata sono stati i seguenti:

$$A_0 = 1$$

$$A_1 = 0,725$$

- $A_2 = 0,374$
- $A_3 = 0,0872$
- $A_4 = -0,11$
- $A_5 = -0,225$
- $A_6 = -0,417$
- $A_7 = -0,319$
- $A_8 = -0,101$
- $A_9 = 0,0798$
- $A_{10} = 0,589$
- $A_{11} = 0,886$

Il carico annuo adimensionale risultante è stato il seguente (fig.29):

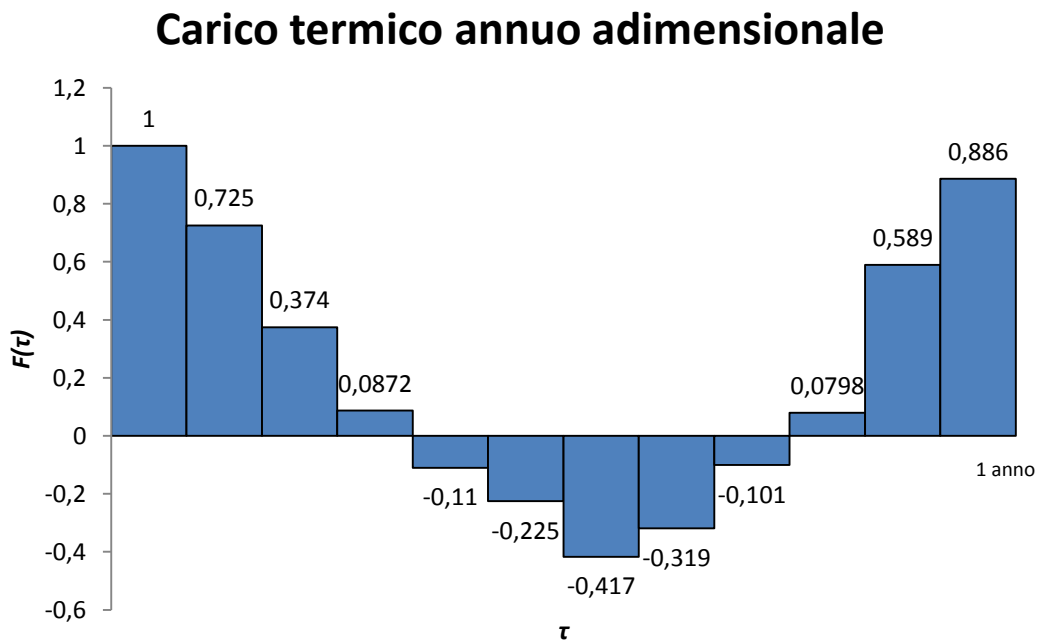


Fig.29 Carico termico annuo adimensionale parzialmente bilanciato

L'andamento della temperatura adimensionale all'interfaccia tra sonda e terreno prodotto da tale carico annuo in funzione del tempo adimensionale è stato il seguente (fig.30):

Evoluzione T_s^* durante un anno

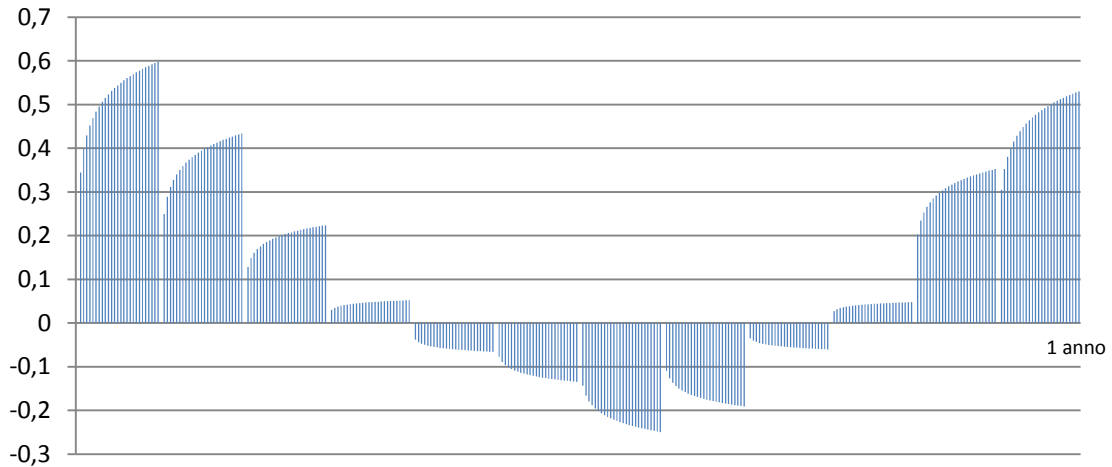


Fig.30 Evoluzione di T_s^* dovuta al carico adimensionale annuo parzialmente bilanciato imposto

Successivamente è stata analizzata l'evoluzione della temperatura media all'interfaccia tra sonda e terreno prodotta da un carico termico di durata cinquanta anni di tipo periodico, con periodo un anno, costruito come sovrapposizione temporale di cinquanta carichi termici annui uguali opportunamente pesati del tipo precedentemente descritto.

Sempre facendo riferimento al caso Fo 2500 e utilizzando i coefficienti precedentemente definiti per svolgere la somma pesata descritta dal modello, è stato ottenuto il seguente carico termico periodico di durata cinquanta anni (fig.31, nel grafico sono mostrati solo i primi tre anni):

Carico termico periodico adimensionale

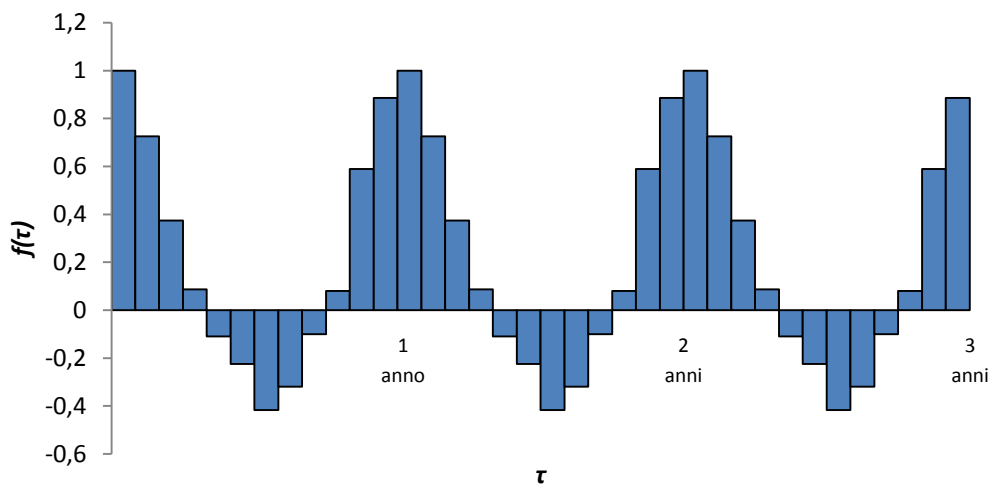


Fig.31 Carico termico adimensionale di periodo 1 anno

L'evoluzione della temperatura media adimensionale all'interfaccia tra sonda e terreno in funzione del tempo adimensionale dovuta a tale carico periodico è stata la seguente (fig.32):

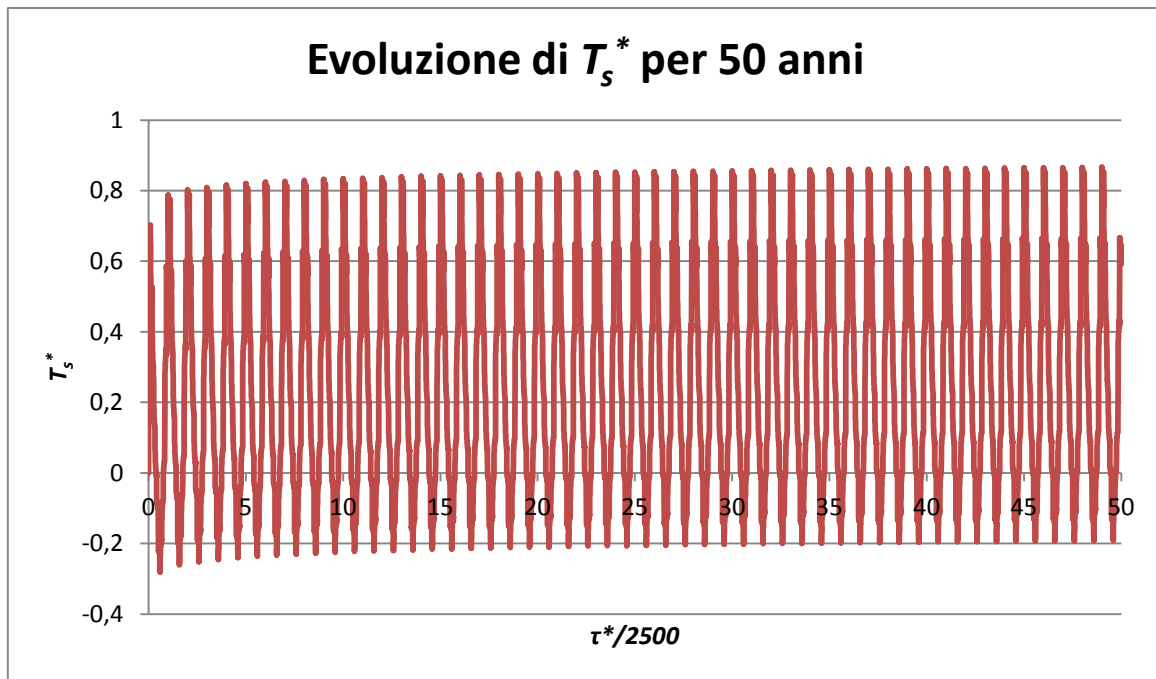


Fig.32 Evoluzione di T_s^* durante i 50 anni dovuta al carico periodico adimensionale imposto

La temperatura adimensionale oscilla tra valori massimi e minimi crescenti nel tempo. Dopo cinquanta anni si osserva che il valore dei massimi (e dei minimi) tende a diventare costante. Una volta eseguita l'analisi sulla sola sonda centrale del campo, devono essere valutati gli effetti prodotti dalla presenza delle altre sonde su tali andamenti di temperatura. Questo viene fatto considerando il principio di sovrapposizione degli effetti.

IV.5 Analisi degli effetti prodotti dalla presenza delle altre sonde sull'evoluzione della temperatura media della sonda centrale del campo

Analizzati gli effetti dei carichi termici mensili sulla sonda centrale del campo, devono essere valutate le variazioni di temperatura prodotte dalla presenza delle altre sonde che costituiscono il campo. Infatti la sonda centrale è quella che si trova ad operare in condizioni più critiche in quanto soggetta alle interferenze termiche generate dalle sonde che la circondano.

Possono essere studiate varie tipologie di campi. In genere però si considerano solo quelli con particolari simmetrie, in modo da rendere i calcoli più semplici.

Per trovare l'evoluzione della temperatura media adimensionale della sonda centrale del campo prodotta da carichi termici mensili tenendo in considerazione anche gli effetti dovuti alla presenza di tutte le altre sonde, il modello numerico fa uso del principio di sovrapposizione degli effetti. Infatti le equazioni su cui esso si basa sono lineari.

Il principio di sovrapposizione degli effetti implica che la variazione di temperatura prodotta in un punto da due o più sonde è uguale alla somma delle variazioni di temperatura prodotte dalle singole sonde considerate separatamente.

Poiché le sonde sono molto sottili rispetto alla loro distanza reciproca, si può assumere che la temperatura adimensionale media sulla superficie della sonda centrale ad un certo istante sia uguale alla somma della temperatura adimensionale prodotta da essa più la somma delle temperature

adimensionali prodotte dalle altre sonde, ciascuna considerata separatamente, ad una distanza pari a quella che intercorre fra il proprio asse e quello della sonda centrale.

Questo consente di progettare un campo di sonde eseguendo delle simulazioni sulla sola sonda centrale e sommando poi i contributi di temperatura adimensionale prodotti alle varie distanze dal suo asse.

L'andamento che si ottiene permette di fare poi delle valutazioni sul campo di sonde geotermiche in questione e di affermare se vi è sostenibilità oppure no.

IV.6 Esempio di analisi di un campo costituito da tre sonde disposte lungo una singola linea

Si consideri un campo costituito da tre sonde geotermiche disposte lungo una singola linea a quaranta diametri di distanza tra loro. Facendo riferimento al caso Fourier 2500 e utilizzando i risultati precedentemente illustrati ottenuti dalle funzioni interpolanti per descrivere le variazioni di temperatura prodotte dal carico termico mensile adimensionale $F(\tau)$ descritto dal modello, è stata valutata l'evoluzione della temperatura adimensionale prodotta da tale impulso all'interfaccia tra la sonda centrale del campo e il terreno considerando anche gli effetti dovuti alla presenza delle altre due sonde.

Per la geometria in considerazione e utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti, tale temperatura è data dalla seguente espressione:

$$T_{1 \times 3}^* = T_S^* + 2T_{40}^*$$

Imponendo dunque il carico termico mensile $F(\tau)$, è stato ottenuto il seguente andamento (fig.33, nel grafico sono mostrati solo i primi 400 valori, non tutti i 16000, per avere una visualizzazione migliore):

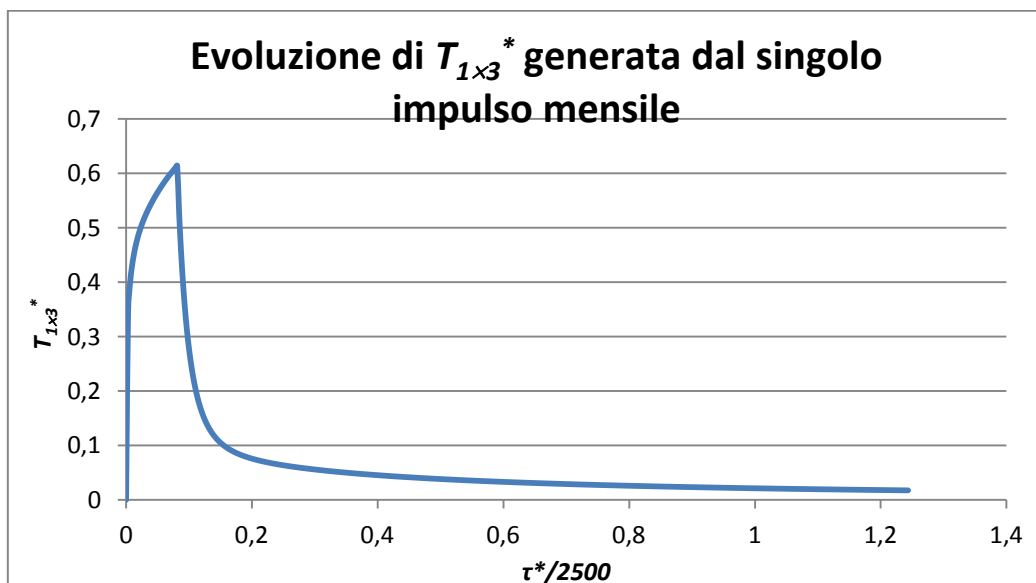


Fig.33 Evoluzione di $T_{1 \times 3}^*$ generata da un singolo impulso mensile

Sono stati poi valutati gli effetti prodotti da un carico termico annuo. Utilizzando gli stessi coefficienti A_0, \dots, A_{11} precedentemente definiti esso è stato costruito dalla somma pesata di dodici carichi di calore mensili costanti, come descritto dal modello. Il suo andamento è stato già illustrato (fig.29) e l'evoluzione di $T_{1 \times 3}^*$ da esso generata è stata la seguente (fig.34):

Evoluzione di $T_{1 \times 3}^*$ generata dal carico adimensionale annuo imposto

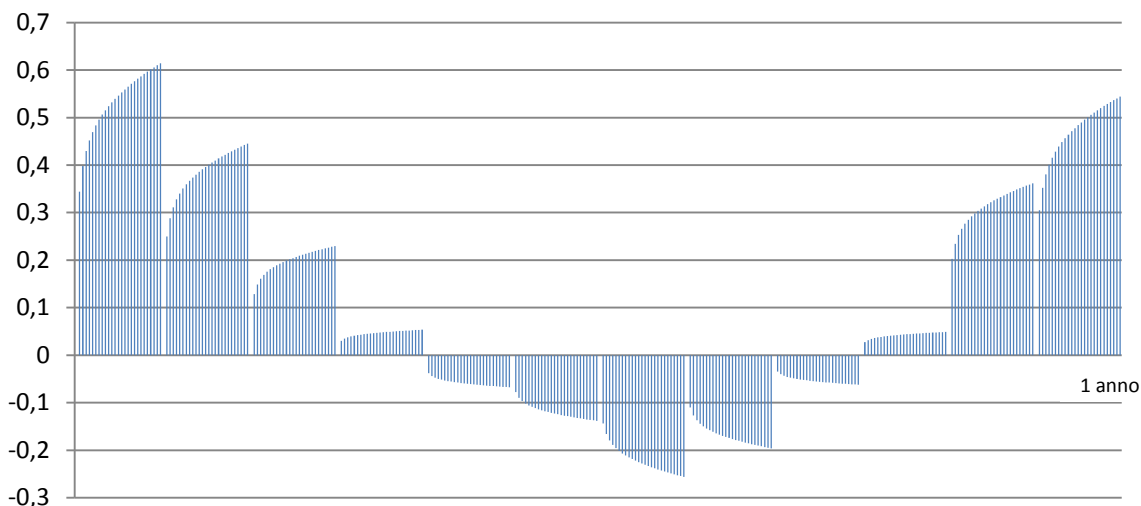


Fig.34 Evoluzione di $T_{1 \times 3}^*$ generata dal carico adimensionale annuo parzialmente bilanciato imposto

Successivamente è stato analizzato il caso di carico termico periodico di durata cinquanta anni. Utilizzando lo stesso carico di calore di periodo un anno precedentemente mostrato (fig.31), l'evoluzione di $T_{1 \times 3}^*$ nella posizione di interfaccia tra la sonda centrale del campo e il terreno è stata la seguente (fig.35):

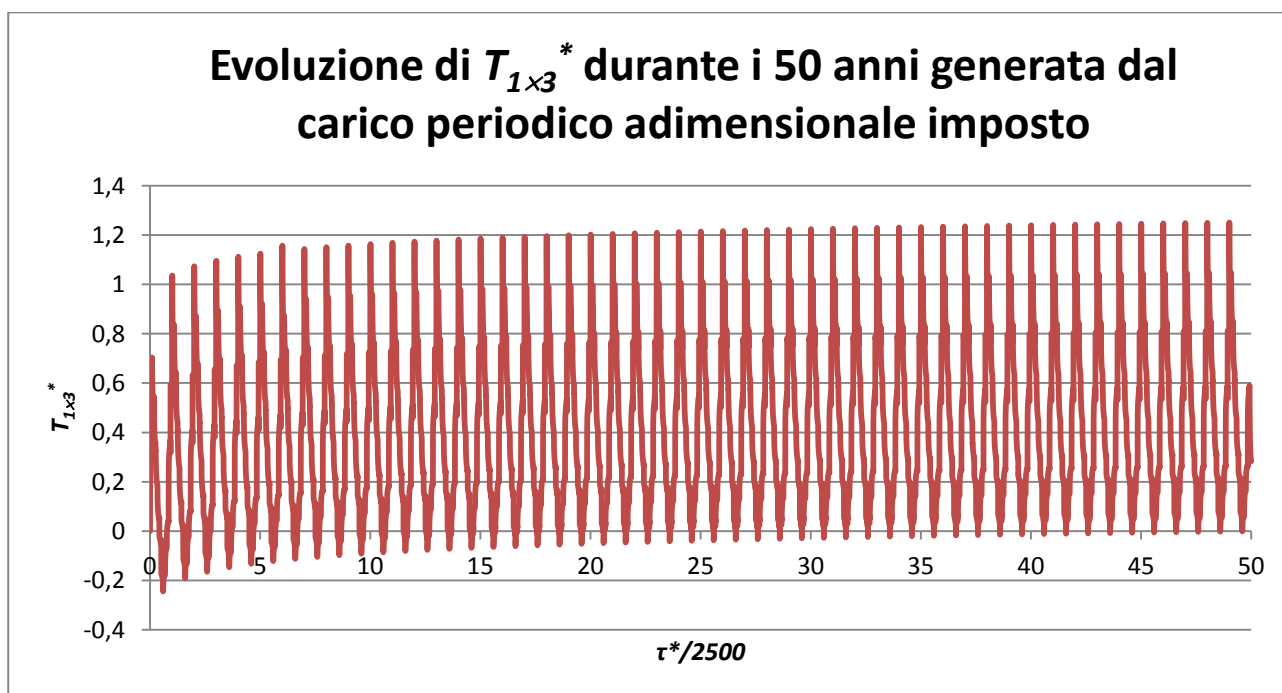


Fig.35 Evoluzione di $T_{1 \times 3}^*$ media durante i 50 anni generata dal carico adimensionale di periodo 1 anno imposto

Come per il caso di singola sonda, anche qui i valori massimi e minimi tra cui oscilla la temperatura adimensionale media della sonda centrale del campo in considerazione tendono a diventare costanti. Confrontando i risultati ottenuti nei due casi è possibile evidenziare quali sono gli effetti prodotti dalla presenza delle altre sonde del campo sulla temperatura di quella centrale (fig.36).

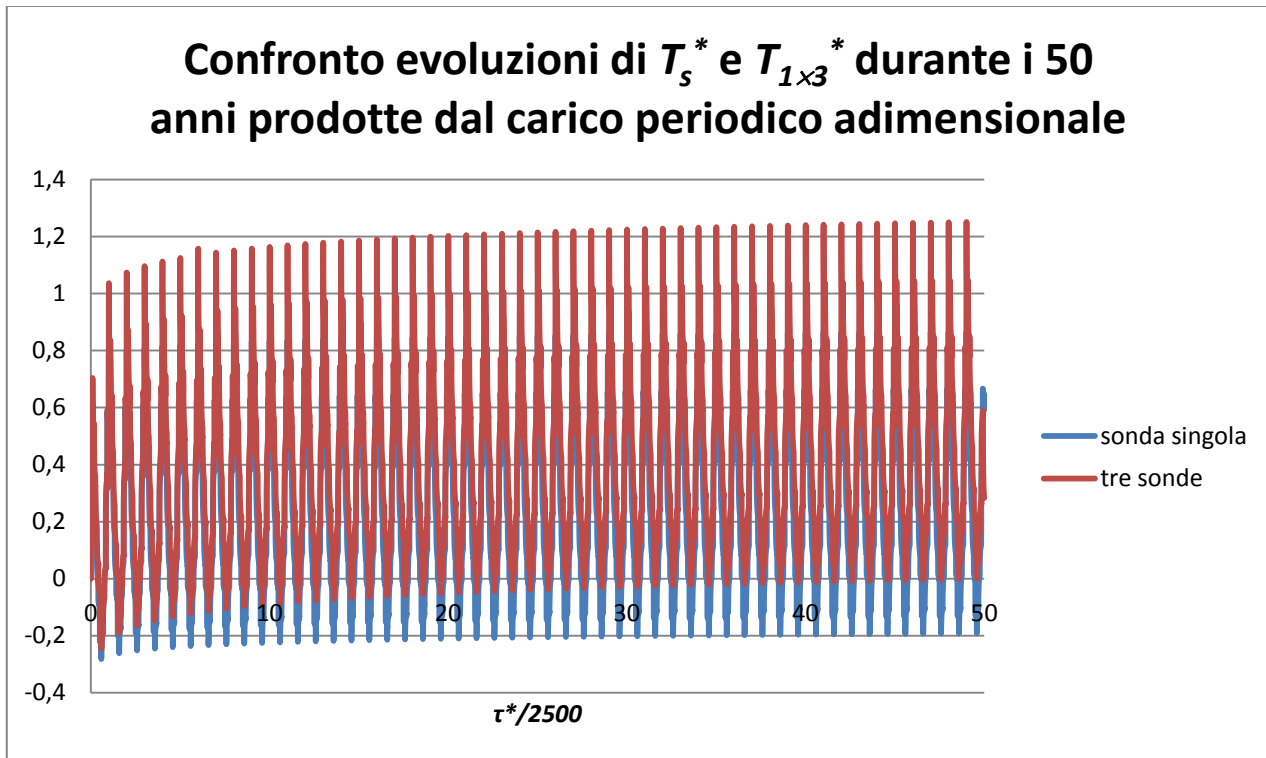


Fig.36 Confronto tra le evoluzioni di T_s^* e $T_{1 \times 3}^*$ durante 50 anni generate dal carico termico adimensionale di periodo 1 anno imposto

Come si nota, i valori tra cui oscilla la temperatura media della sonda centrale sono più alti se si considera la presenza delle altre sonde del campo. La temperatura media adimensionale per la singola sonda raggiunge il valore massimo di 0,66 dopo 49,92 anni, mentre nel caso delle tre sonde il valore massimo della temperatura adimensionale nei primi 50 anni è 1,25 e viene raggiunto dopo 49,0093 anni. L'incremento è del 47%.

Per valutare la sostenibilità dell'impianto che si sta analizzando è necessario poi trasformare la temperatura media T^* in forma dimensionale, mediante la relazione

$$T = \frac{T^* Q_0}{k_g} + T_g$$

e stabilire il valore limite di temperatura massimo (nel caso di prevalente carico estivo, $Q_0 > 0$) o minimo (nel caso di prevalente carico invernale, $Q_0 < 0$) che non devono essere oltrepassati.

IV.7 Criticità del metodo

Tutti i grafici che fin ora sono stati presentati sono stati elaborati con il programma Microsoft Excel, considerando gli intervalli di tempo come delle quantità discrete. Se però si utilizza un altro programma, come Mathematica, in cui essi sono invece continui, i grafici che si ottengono presentano andamenti in alcuni tratti discordi ai precedenti e problematici.

Se ad esempio si considera la variazione di temperatura adimensionale di interfaccia tra sonda e terreno prodotta dal carico annuo precedentemente definito nel caso di singola sonda, i risultati che si ottengono con Mathematica sono i seguenti (fig.37):

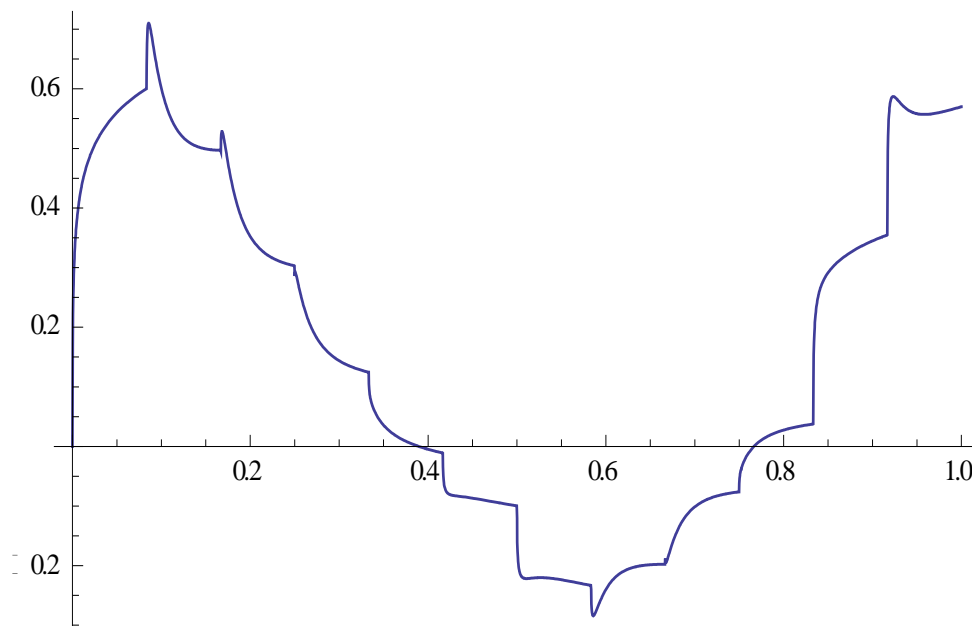


Fig.37 Evoluzione di T_s^* prodotta dal carico annuo adimensionale parzialmente bilanciato ottenuta con l'uso del programma Mathematica. In ordinata si ha T_s^* , in ascissa $\tau^*/2500$.

Confrontando questo andamento con quello precedentemente mostrato ottenuto con Microsoft Excel (fig.38), si nota che nel grafico ottenuto con il programma Mathematica, in prossimità delle cuspidi, ci sono degli errori di calcolo non trascurabili.

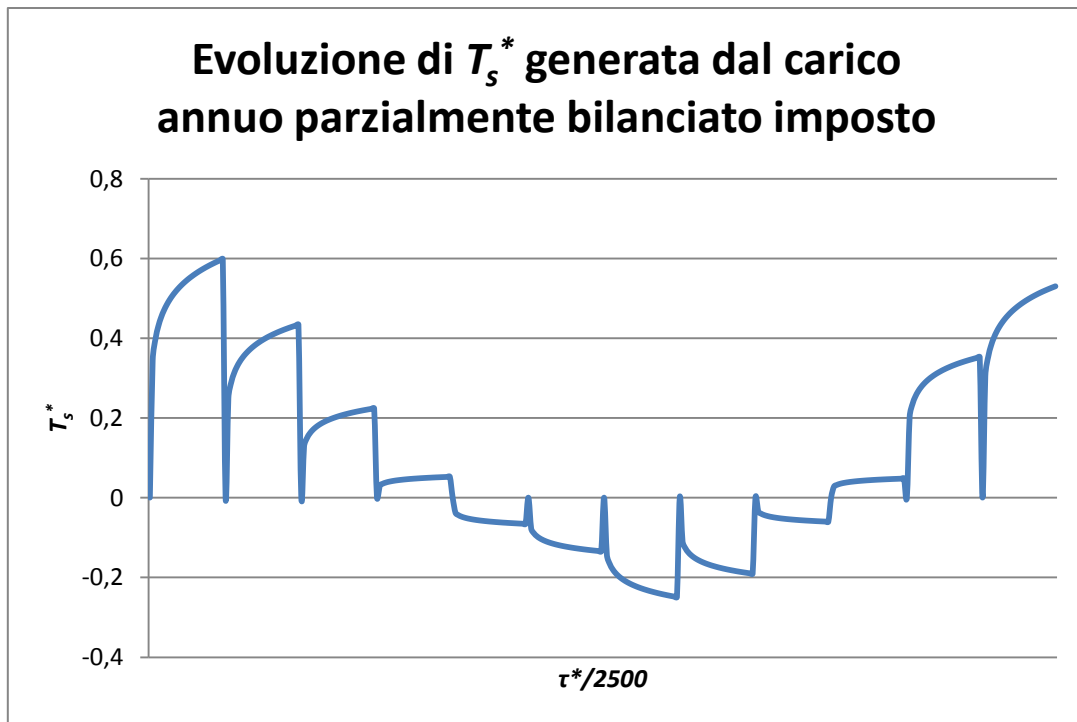


Fig.38 Evoluzione di T_s^* generata dal carico annuo adimensionale parzialmente bilanciato imposto

Poiché l'obiettivo è quello di fornire un modello numerico che dia dei risultati affidabili qualunque sia il programma che si decida di utilizzare per elaborare i dati, recentemente sono state apportate al modello fin qui esposto delle modifiche, creando un nuovo modello che permette di valutare la sostenibilità nel lungo termine dei campi di sonde geotermiche in assenza di movimento dell'acqua di falda con maggiore precisione e utilizzando codici di calcolo più rapidi di Excel.

CAPITOLO V

SOSTENIBILITA' NEL LUNGO PERIODO DI CAMPI DI SONDE GEOTERMICHE IN ASSENZA DI MOVIMENTO DELL'ACQUA DI FALDA: 2° METODO

Nel seguente capitolo verrà esposto il secondo metodo di studio di sostenibilità nel lungo termine di campi di sonde geotermiche. Tale modello numerico è stato formulato apportando al primo alcune modifiche con l'obiettivo di ottenere risultati affidabili e univoci indipendentemente dal programma utilizzato per elaborare i dati.

Analogamente al primo metodo, trascurando il movimento dell'acqua di falda, viene analizzata l'evoluzione temporale della temperatura media di interfaccia tra la sonda centrale del campo e il terreno, considerando un periodo di cinquanta anni, un carico termico costante per ciascun mese ma diverso fra i vari mesi dell'anno, e facendo uso del codice di calcolo agli elementi finiti COMSOL Multiphysics. Questa volta, il carico termico di ciascun mese non viene più rappresentato mediante un'onda quadra, ma come differenza fra due carichi costanti di uguale valore, sfalsati di un mese. In questo modo si ottengono due vantaggi:

- le funzioni interpolanti si riferiscono a un carico costante nel tempo, e hanno un andamento più regolare;
- poiché il carico termico base considerato nelle simulazioni numeriche è una costante, non è più necessario considerare il periodo τ_0 nella definizione del tempo adimensionale, e quindi i risultati non dipendono più da questo parametro.

V.1 Il modello e le equazioni che lo compongono

Come già spiegato nel precedente capitolo, quando si vuol analizzare il comportamento nel tempo di un campo di sonde geotermiche e quindi verificare se le condizioni in cui esso si troverebbe ad operare possano garantirne la sostenibilità nel lungo termine, particolare attenzione deve essere posta sulla sonda centrale di tale campo, che è quella che si trova a lavorare in condizioni più critiche a causa delle interferenze termiche prodotte da tutte le altre sonde. In questo modo è infatti possibile capire prima della progettazione se le prestazioni dell'impianto geotermico in considerazione possono mantenersi stabili nel tempo oppure subire bruschi cali.

Analogamente al primo, anche questo secondo modello numerico studia come varia la temperatura media di interfaccia tra la sonda centrale del campo in considerazione e il terreno per un periodo di cinquanta anni, trascurando il movimento dell'acqua di falda. Imponendo un carico termico di tipo costante, l'evoluzione di tale temperatura viene simulata mediante il software COMSOL Multiphysics, trascurando i gradienti termici che si sviluppano in direzione assiale, ipotizzando che la trasmissione del calore avvenga per pura conduzione e formulando il problema in forma monodimensionale.

Inizialmente l'analisi viene svolta sulla sola sonda centrale, trascurando la presenza di tutte le altre, in modo tale da poter valutare gli effetti prodotti dal solo carico termico imposto. Le interferenze termiche prodotte dalle altre sonde vengono valutate invece in un secondo momento facendo uso del principio di sovrapposizione degli effetti.

Pensando alla sonda centrale reale come una sorgente termica di forma circolare posta in un solido infinito di proprietà termofisiche costanti e uniformi, il modello permette di studiare in modo semplice campi che presentano particolari simmetrie centrali e assiali, rendendo i calcoli meno laboriosi. Schematizzando poi il tutto in forma monodimensionale, il dominio computazionale si riduce ad un segmento che si estende dal punto di interfaccia tra sonda e terreno, dove si ha la generazione del flusso di calore, fino alla lunghezza arbitrariamente scelta per il terreno stesso. All'istante iniziale $\tau = 0$ la temperatura è supposta essere uniforme e pari alla temperatura di terreno indisturbato T_g . Per $\tau > 0$ si ha invece un flusso termico per unità di area costante e uniforme descritto dall'espressione:

$$q = \frac{Q_0}{\pi D}$$

dove Q_0 (carico termico lineare di modulo massimo) è una costante, positiva per carico termico uscente dalla sonda (funzionamento estivo), negativa per carico termico entrante nella sonda (funzionamento invernale) e D è il diametro della sonda.

Utilizzando le coordinate cilindriche per descrivere il problema e supponendo che l'origine coincida con il centro della sonda, l'equazione differenziale da risolvere, nell'ipotesi che ci sia pura conduzione, è:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha_g \nabla^2 T$$

con $\nabla^2 T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$ e α_g diffusività termica del terreno.

Alla superficie di interfaccia S tra sonda e terreno si imposta la seguente condizione al contorno:

$$-k_g (\nabla T \cdot \vec{n})|_S = \frac{Q_0}{\pi D}$$

dove k_g rappresenta la conducibilità termica del terreno e \vec{n} un vettore unitario diretto dall'interno all'esterno della sonda, mentre la superficie esterna di confine del dominio (rappresentata dal secondo estremo del segmento) è supposta adiabatica.

Il modello pone poi tutte le equazioni fin qui mostrate in forma adimensionale, considerando il diametro della sonda D come unità di lunghezza di riferimento e introducendo le seguenti grandezze:

$$\nabla^{2*} = D^2 \nabla^2 = D^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right)$$

$$r^* = \frac{r}{D}$$

$$\tau^* = \frac{\alpha_g \tau}{D^2}$$

$$T^* = k_g \frac{T - T_g}{Q_0}$$

In tal modo le equazioni precedentemente illustrate si riducono alle seguenti espressioni:

$$\frac{\partial T^*}{\partial \tau^*} = \nabla^{*2} T^*$$

$$-(\nabla^* T^* \cdot \vec{n})|_S = \frac{1}{\pi}$$

$$T^* = 0$$

Il modello considera inizialmente il campo costituito da una sola sonda, quella centrale, e analizza gli effetti prodotti dal solo carico imposto lasciando ad un secondo momento lo studio delle interferenze termiche generate dalle altre sonde che la circondano.

Nel primo modello il generico carico mensile era rappresentato mediante uno step unitario e costante di durata un mese mentre il carico annuo veniva descritto dalla somma di dodici carichi di calore mensili opportunamente pesati. In questo modo veniva così imposto alla sonda un carico termico di periodo un anno che si ripeteva per tutto l'arco di tempo in esame. Nel precedente capitolo però, elaborando i dati ottenuti con due programmi diversi, è stato osservato che i risultati cui si giunge non sono univoci. Quando infatti si considera una suddivisione del tempo in intervalli, la discretizzazione fa sì che gli errori numerici, se presenti, siano nascosti mentre vengono evidenziati quando il tempo rappresenta una variabile continua. Lo scopo con cui questo nuovo modello è stato formulato è proprio quello di evitare questo problema, in modo da ottenere risultati affidabili a prescindere dal tipo di programma usato per elaborare i dati.

Il carico termico base adimensionale $Q^*(\tau)$ per unità di lunghezza a cui la sonda viene sottoposta in questo secondo modello è costante e unitario, a partire da un istante iniziale prefissato, cioè è descritto dalla funzione gradino di Heaviside $H(\tau)$:

$$H(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{se } \tau \geq 0 \\ 0 & \text{se } \tau < 0 \end{cases}$$

Il corrispondente carico adimensionale per unità di area applicato alla sonda è dato da:

$$q^* = \frac{H(\tau)}{\pi}$$

La funzione $H(\tau)$ ha il seguente andamento (fig.39):

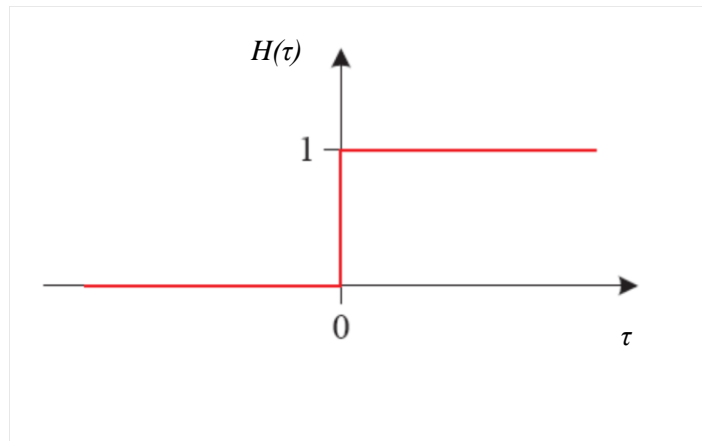


Fig.39 Funzione gradino di Heaviside

Il carico unitario mensile di durata τ_1 si ottiene sottraendo all'area totale sottesa dalla funzione $H(\tau)$ la parte di area che si trova dopo τ_1 , cioè mediante la funzione

$$H(\tau) - H(\tau - \tau_1)$$

Così facendo si ritrova lo step unitario $Q^*(\tau)$ di durata τ_1 che si aveva anche nel precedente metodo (fig.40):

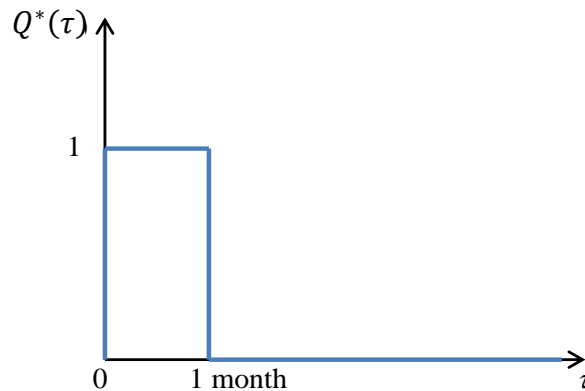


Fig.40 Step mensile unitario che descrive il carico mensile

Procedendo in modo analogo si ricavano allora tutti i carichi mensili, per 50 anni, espressi nel modo seguente

$$Q_0^*(\tau) = H(\tau) - H(\tau - \tau_1)$$

$$Q_1^*(\tau) = H(\tau - \tau_1) - H(\tau - 2\tau_1)$$

.....

$$Q_i^*(\tau) = H(\tau - i\tau_1) - H(\tau - (i + 1)\tau_1)$$

E' opportuno introdurre il tempo adimensionale

$$\tau^* = \frac{\alpha_g \tau}{D^2}$$

Il tempo adimensionale τ_1^* corrispondente ad un mese (30 giorni) si ottiene dall'equazione precedente ponendo $\tau = \tau_1 = 2,592 \times 10^6$.

In forma adimensionale, si ha

$$\begin{aligned} Q_0^*(\tau^*) &= H(\tau^*) - H(\tau^* - \tau_1^*) \\ Q_1^*(\tau^*) &= H(\tau^* - \tau_1^*) - H(\tau^* - 2\tau_1^*) \\ &\dots \\ Q_i^*(\tau^*) &= H(\tau^* - i\tau_1^*) - H(\tau^* - (i+1)\tau_1^*) \end{aligned}$$

I carichi mensili vengono poi modulati attraverso i coefficienti adimensionali $A_0, A_1, \dots, A_{11}, \dots, A_{599}$, dove solo i primi 12 coefficienti sono diversi fra loro, poi $A_{12} = A_0, A_{13} = A_1$, ecc. La formula ricorsiva per i coefficienti A_i è

$$A_{i+12} = A_i; \quad i = 0, 1, 2, \dots, 587$$

Il carico termico adimensionale per i primi 50 anni è quindi dato dalla relazione

$$Q^*(\tau^*) = \sum_{i=0}^{599} A_i Q_i^*(\tau^*)$$

Utilizzando il principio della sovrapposizione degli effetti, si può ricavare il campo di temperatura $T^*(r^*, \tau^*)$ dovuto al carico $Q^*(\tau^*)$ sopra indicato come sovrapposizione dei campi di temperatura dovuti ai singoli carichi mensili $Q_i^*(\tau^*)$.

Indicando con $T_i^*(r^*, \tau^*)$ il campo di temperatura adimensionale prodotto dal carico adimensionale $H(\tau^* - i\tau_1^*)$, si ha

$$T^*(r^*, \tau^*) = \sum_{i=0}^{599} A_i [T_i^*(r^*, \tau^*) - T_{i+1}^*(r^*, \tau^*)]$$

La funzione $T_i^*(r^*, \tau^*)$ si trova traslando in avanti nel tempo la funzione $T_0^*(r^*, \tau^*)$, come segue

$$T_i^*(r^*, \tau^*) = T_0^*(r^*, \tau^* - i\tau_1^*)$$

V.2 Implementazione del modello ed espressioni analitiche della temperatura adimensionale prodotta dal carico lineare unitario costante $H(\tau^*)$

Attraverso il codice di calcolo agli elementi finiti COMSOL Multiphysics è stata ricreata la geometria del problema, schematizzando la sonda centrale del campo e il terreno che la circonda in forma monodimensionale (fig.41), trascurando la presenza di tutte le altre sonde. Scegliendo il diametro della sonda D pari a uno e per il terreno una lunghezza di $2000D$, cioè 2000, e proprietà termofisiche costanti e unitarie, sono state definite la condizione iniziale, le condizioni al contorno e l'equazione da risolvere adimensionali che compongono il modello.

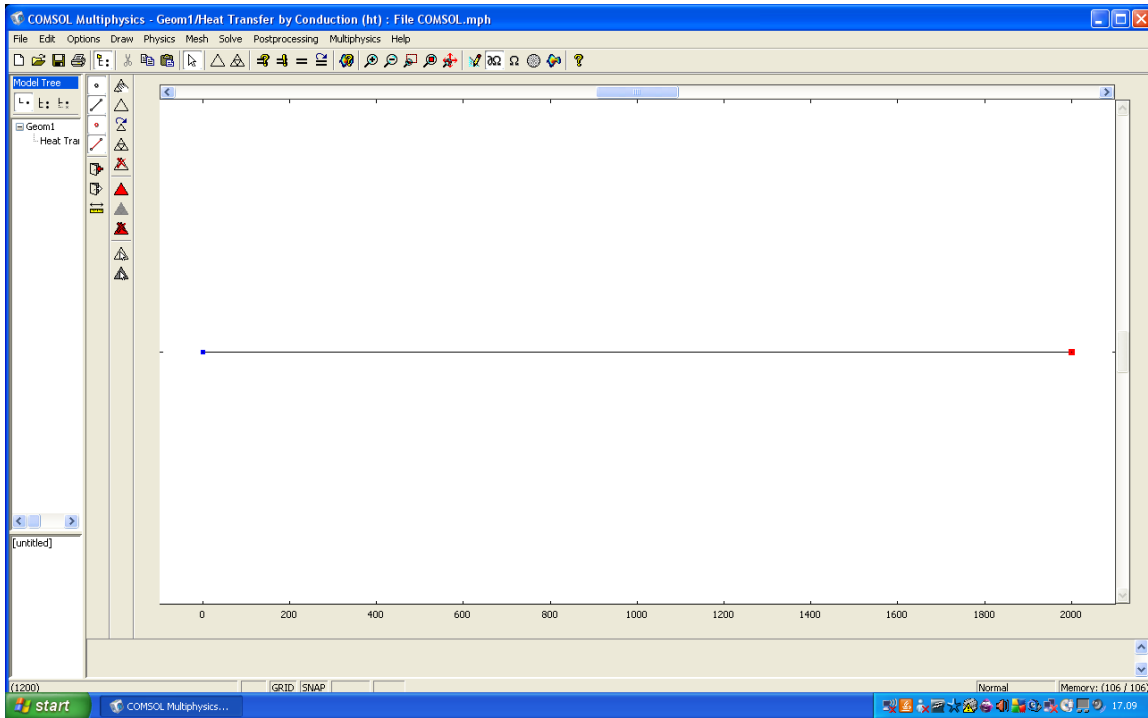


Fig.41 Ricostruzione del problema in forma monodimensionale tramite COMSOL Multiphysics

In questo modo è stato dunque impostato nel software il dominio computazionale su cui svolgere le simulazioni, il quale si estende dal punto di interfaccia tra sonda e terreno (0,5) fino al termine del segmento (2000).

Implementando questo modello sono stati determinati numericamente i valori della funzione $T_0^*(r^*, \tau^*)$ per diversi valori di r^* , e precisamente,

$$r^* = 0,5; 30; 40; 50; 60; 80; 100; 120; 170; 200; 230; 260; 300$$

La posizione $r^* = 0,5$ corrisponde alla superficie della sonda. Per determinare le espressioni analitiche della funzione $T_0^*(r^*, \tau^*)$, per i valori di r^* sopra indicati, si è proceduto mediante interpolazioni, ponendo il tempo in forma logaritmica $\text{Log}(\tau^*)$.

Si è considerato l'intervallo temporale, in forma adimensionale, $10^{-4} \leq \tau^* \leq 10^6$, cioè $-4 \leq \text{Log}(\tau^*) \leq 6$, con la scansione temporale in scala logaritmica avente passi di $\text{Log}(\tau^*)$ pari a 0,002 (5000 passi).

Le espressioni analitiche della funzione $T_0^*(r^*, \tau^*)$ ottenute, per i valori di r^* sopra indicati, sono riportate nel seguito, dove, per semplicità di notazione, si è posto $x = \text{Log}(\tau^*)$.

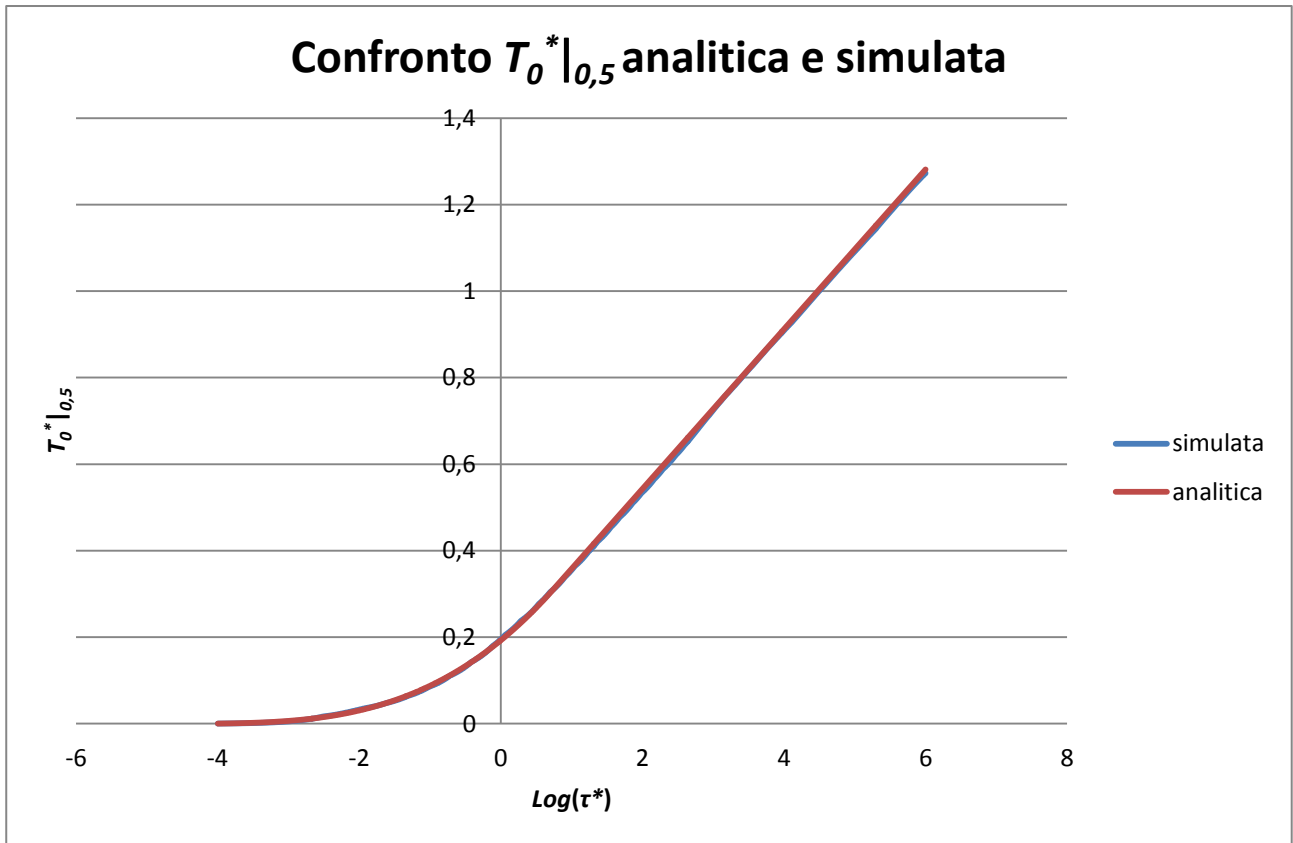
$$T_0^*|_{0,5} = \begin{cases} 0,0025x^3 + 0,0315x^2 + 0,1342x + 0,1926 & \text{se } -4 \leq x < 0,75 \\ 0,1847x + 0,1734 & \text{se } 0,75 \leq x \leq 6 \end{cases}$$

$$T_0^*|_{30} = \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 1,56 \\ -0,01969x^4 + 0,19725x^3 - 0,66461x^2 + 0,94049x - 0,482 & \text{se } 1,56 \leq x < 3,5 \\ 0,18092x - 0,4626 & \text{se } 3,5 \leq x \leq 6 \end{cases}$$

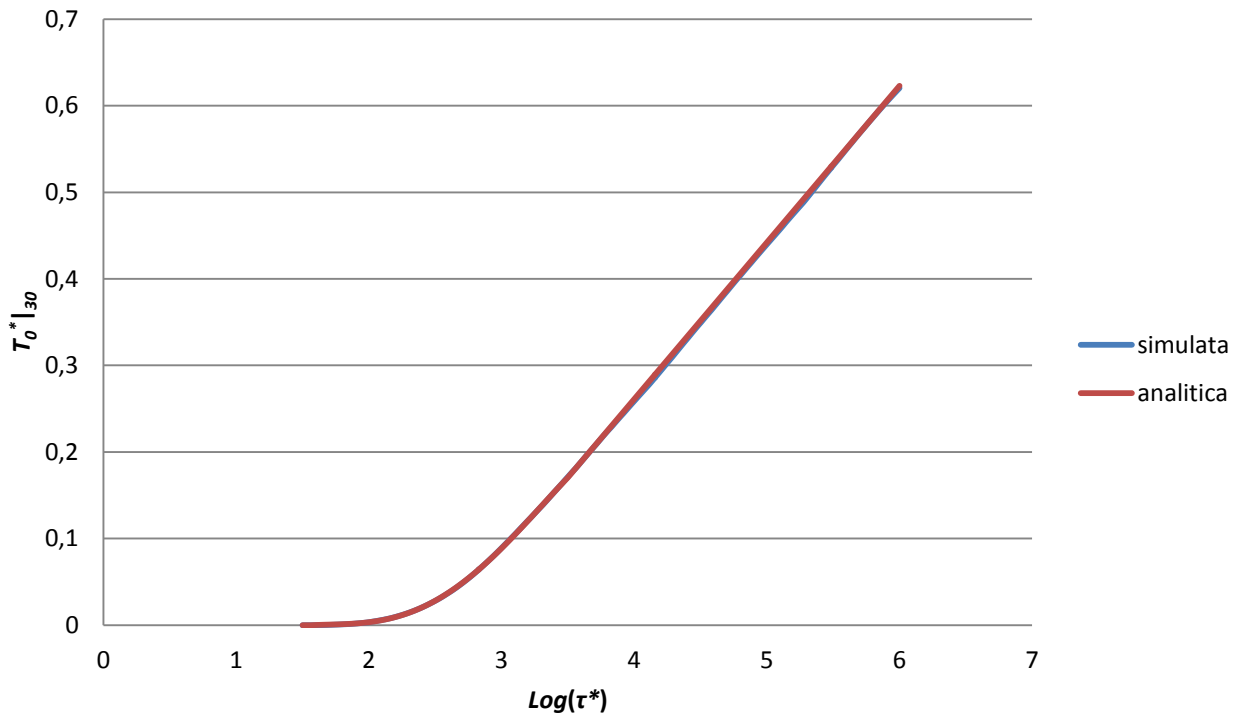
$$\begin{aligned}
T_0^*|_{40} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 1,80 \\ -0,01832x^4 + 0,20108x^3 - 0,7525x^2 + 1,18737x - 0,67944 & \text{se } 1,80 \leq x < 3,8 \\ 0,18095x - 0,507 & \text{se } 3,8 \leq x \leq 6 \end{cases} \\
T_0^*|_{50} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 2 \\ -0,01936x^4 + 0,22656x^3 - 0,91868x^2 + 1,581x - 0,98997 & \text{se } 2 \leq x < 4 \\ 0,18087x - 0,5445 & \text{se } 4 \leq x \leq 6 \end{cases} \\
T_0^*|_{60} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 2,5 \\ -0,02039x^4 + 0,25038x^3 - 1,07665x^2 + 1,9738x - 1,3193 & \text{se } 2,5 \leq x < 4,15 \\ 0,1805x - 0,5722 & \text{se } 4,15 \leq x \leq 6 \end{cases} \\
T_0^*|_{80} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 2,35 \\ -0,01912x^4 + 0,25251x^3 - 1,17548x^2 + 2,33772x - 1,6957 & \text{se } 2,35 \leq x < 4,35 \\ 0,1797x - 0,6127 & \text{se } 4,35 \leq x \leq 6 \end{cases} \\
T_0^*|_{100} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 2,45 \\ -0,01991x^4 + 0,27687x^3 - 1,36831x^2 + 2,90035x - 2,24689 & \text{se } 2,45 \leq x < 4,40 \\ 0,17854x - 0,639 & \text{se } 4,40 \leq x \leq 6 \end{cases} \\
T_0^*|_{120} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 2,604 \\ -0,02008x^4 + 0,29171x^3 - 1,51336x^2 + 3,3761x - 2,75706 & \text{se } 2,604 \leq x < 4,50 \\ 0,17768x - 0,662 & \text{se } 4,50 \leq x \leq 6 \end{cases} \\
T_0^*|_{140} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 3 \\ -0,02334x^4 + 0,3508x^3 - 1,90007x^2 + 4,44945x - 3,82876 & \text{se } 3 \leq x < 4,60 \\ 0,17692x - 0,68552 & \text{se } 4,60 \leq x \leq 6 \end{cases} \\
T_0^*|_{170} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 3,09 \\ -0,02493x^4 + 0,39063x^3 - 2,21763x^2 + 5,46121x - 4,9532 & \text{se } 3,09 \leq x < 4,70 \\ 0,17556x - 0,7068 & \text{se } 4,70 \leq x \leq 6 \end{cases} \\
T_0^*|_{200} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 3,15 \\ -0,0264x^4 + 0,42694x^3 - 2,51081x^2 + 6,42042x - 6,05595 & \text{se } 3,15 \leq x < 4,70 \\ 0,173x - 0,7133 & \text{se } 4,70 \leq x \leq 6 \end{cases} \\
T_0^*|_{230} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 3,302 \\ -0,0237x^4 + 0,396x^3 - 2,40429x^2 + 6,34287x - 6,16888 & \text{se } 3,302 \leq x < 4,90 \\ 0,17337x - 0,7395 & \text{se } 4,90 \leq x \leq 6 \end{cases} \\
T_0^*|_{260} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 3,502 \\ -0,02213x^4 + 0,38016x^3 - 2,37325x^2 + 6,43757x - 6,43766 & \text{se } 3,502 \leq x < 5,20 \\ 0,17503x - 0,772 & \text{se } 5,20 \leq x \leq 6 \end{cases} \\
T_0^*|_{300} &= \begin{cases} 0 & \text{se } -4 \leq x < 3,672 \\ -0,02448x^4 + 0,43132x^3 - 2,77248x^2 + 7,76351x - 8,0294 & \text{se } 3,672 \leq x < 5,20 \\ 0,17214x - 0,774 & \text{se } 5,20 \leq x \leq 6 \end{cases}
\end{aligned}$$

Gli andamenti della temperatura adimensionale $T_0^*(r^*, \tau^*)$ forniti dalle espressioni interpolanti sono stati confrontati con i risultati numerici forniti dal modello, per valutare la precisione delle interpolazioni. Graficamente, le curve di $T_0^*(r^*, \tau^*)$ in funzione di $\text{Log}(\tau^*)$ ottenute mediante le funzioni interpolanti sono praticamente indistinguibili da quelle ottenute mediante i valori numerici, come è mostrato dalle figure seguenti.

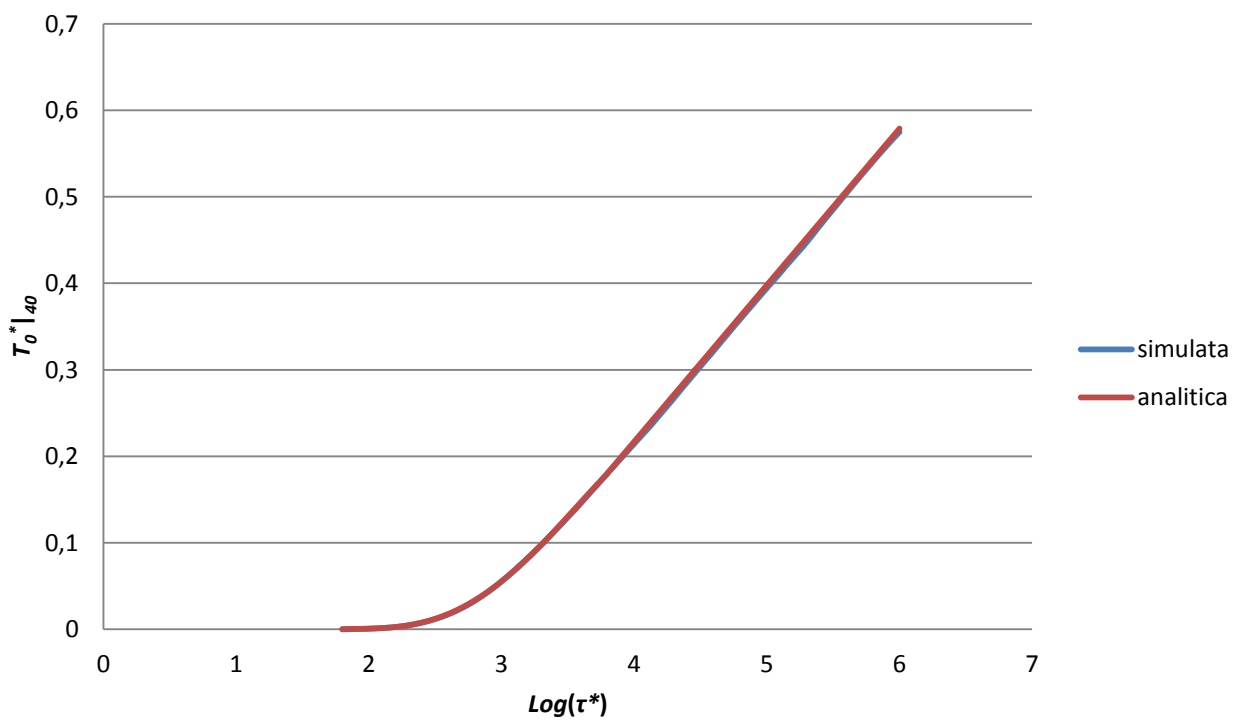
Mentre per la $T_0^*|_{0,5}$ di interfaccia le due curve sono state rappresentate nel grafico a partire da $\text{Log}(\tau^*) = -4$, per le altre distanze è stato scelto come punto di partenza $\text{Log}(\tau^*) = 0$, perché la funzione $T_0^*(r^*, \tau^*)$ a distanza dalla superficie della sonda resta praticamente zero per un tempo piuttosto lungo, che aumenta all'aumentare della distanza. I grafici sono stati ottenuti tramite il programma Microsoft Excel.



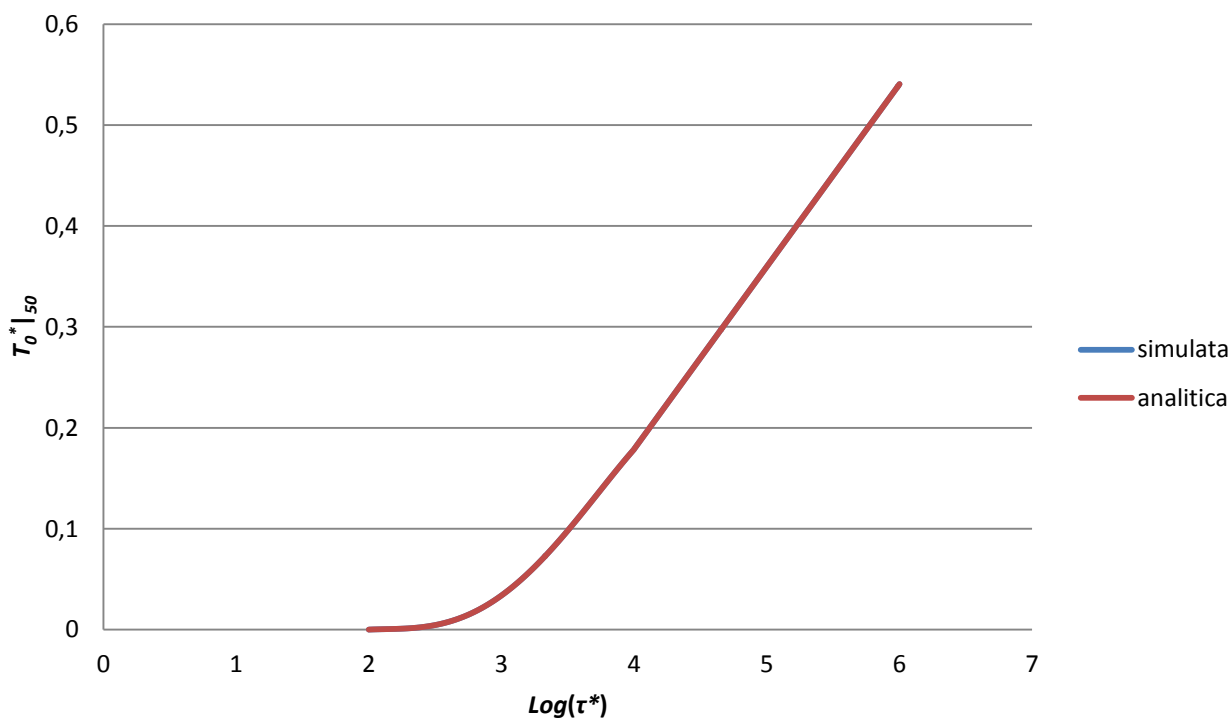
Confronto $T_0^* |_{30}$ analitica e simulata



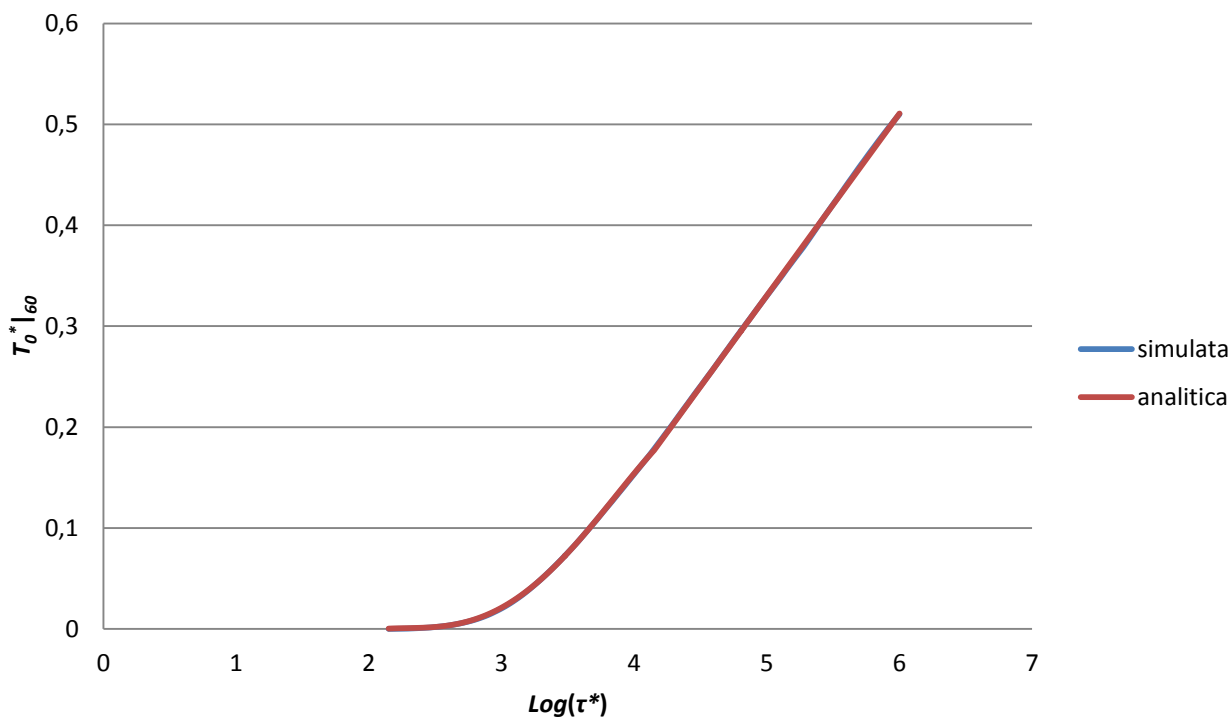
Confronto $T_0^* |_{40}$ analitica e simulata



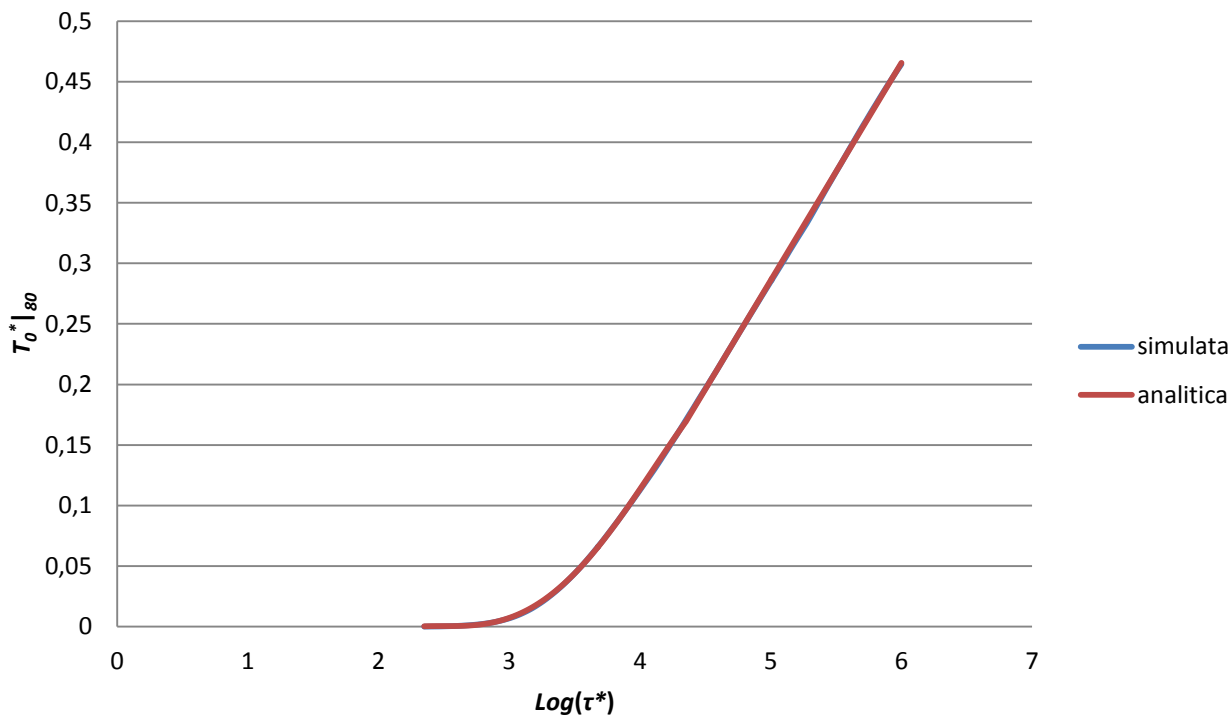
Confronto $T_0^*|_{50}$ analitica e simulata



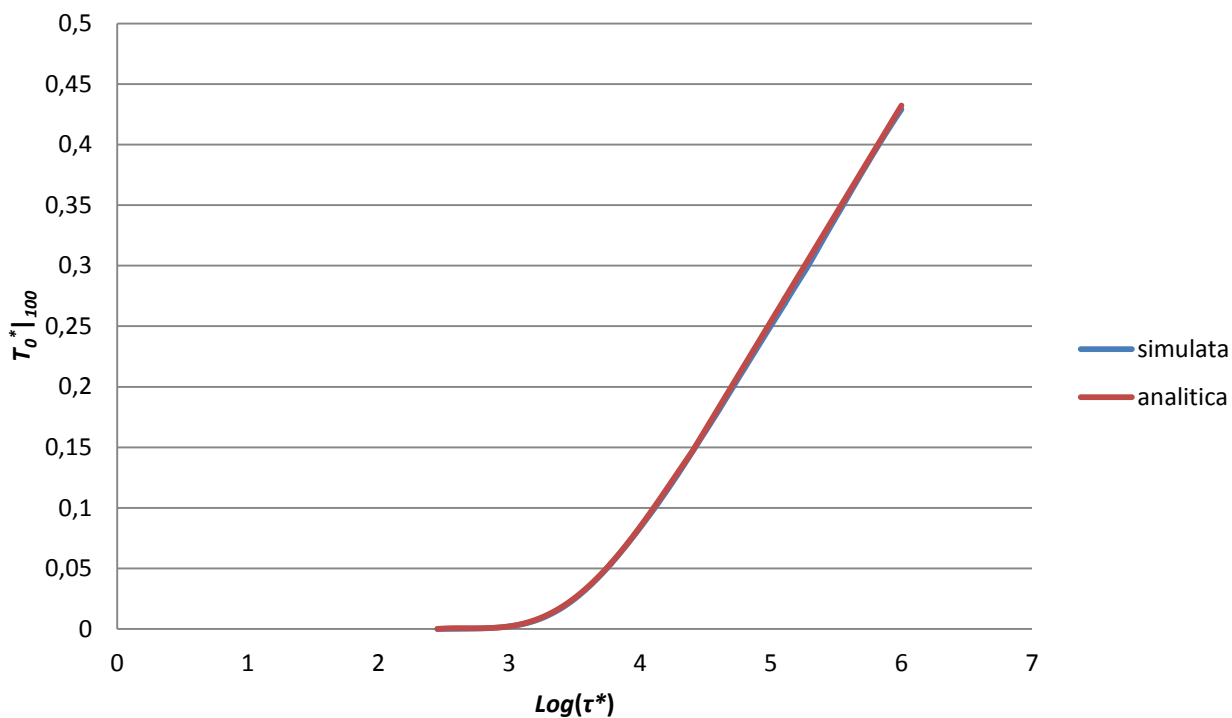
Confronto $T_0^*|_{60}$ analitica e simulata



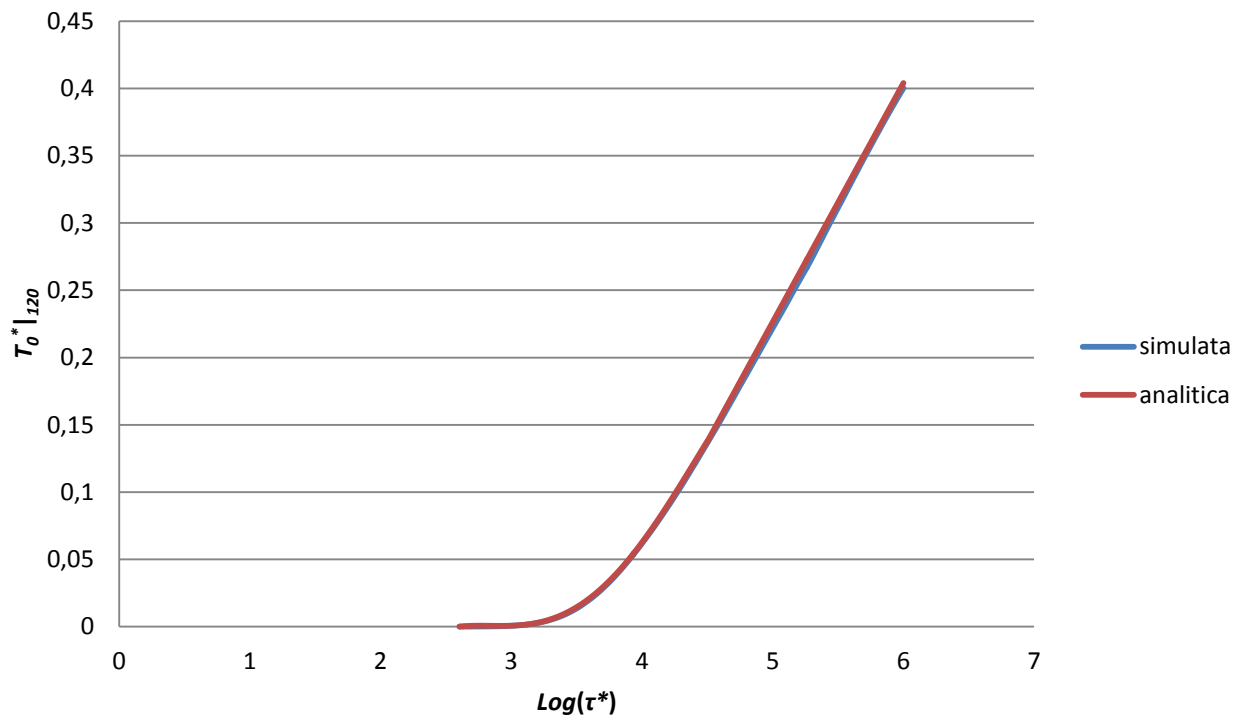
Confronto $T_0^*|_{80}$ analitica e simulata



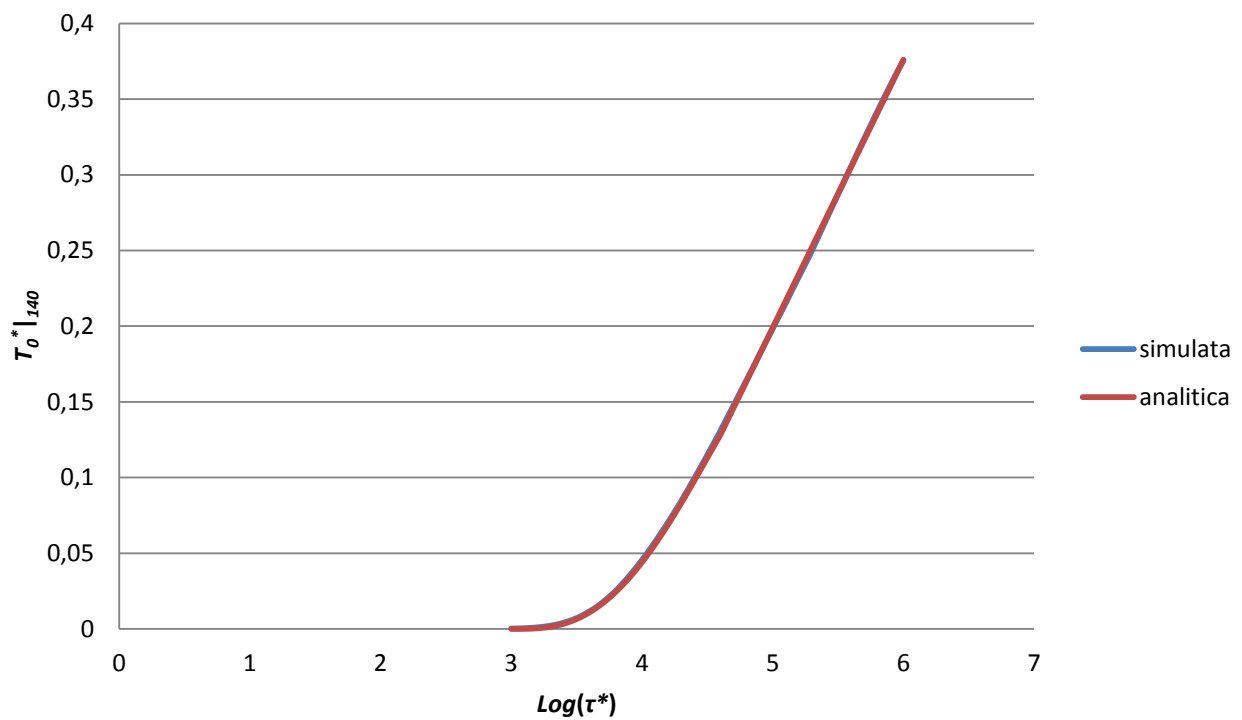
Confronto $T_0^*|_{100}$ analitica e simulata



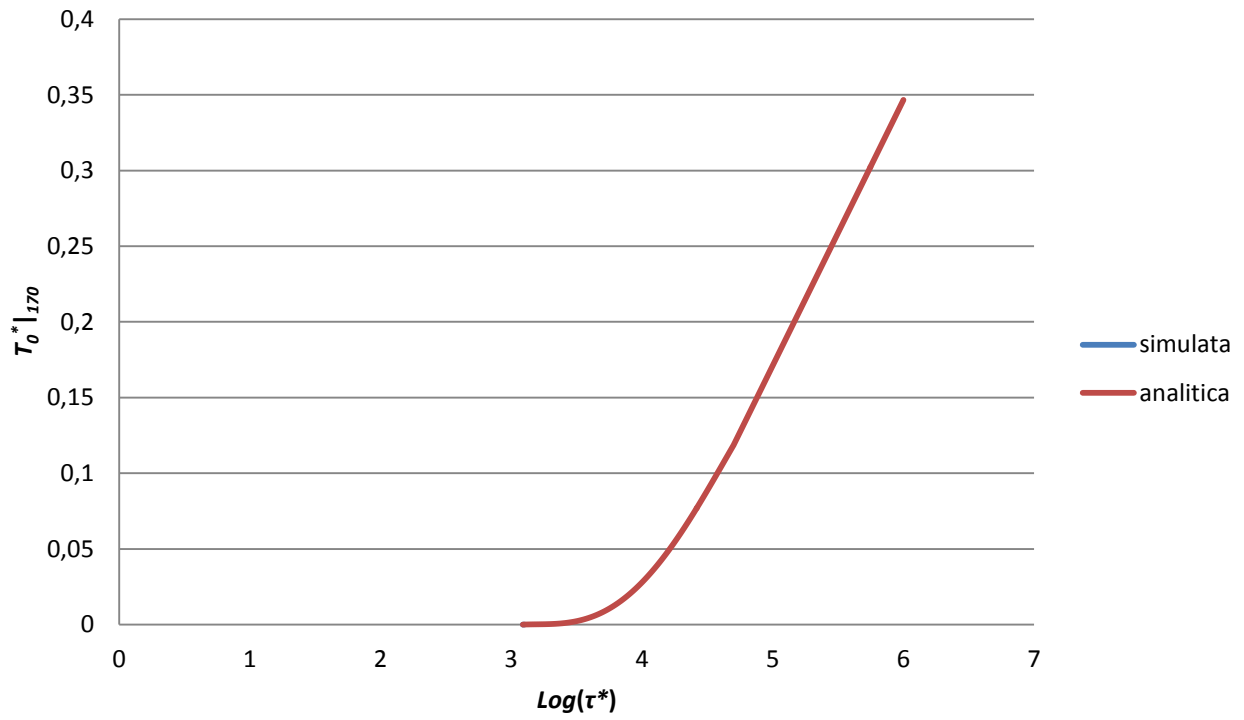
Confronto $T_0^* |_{120}$ analitica e simulata



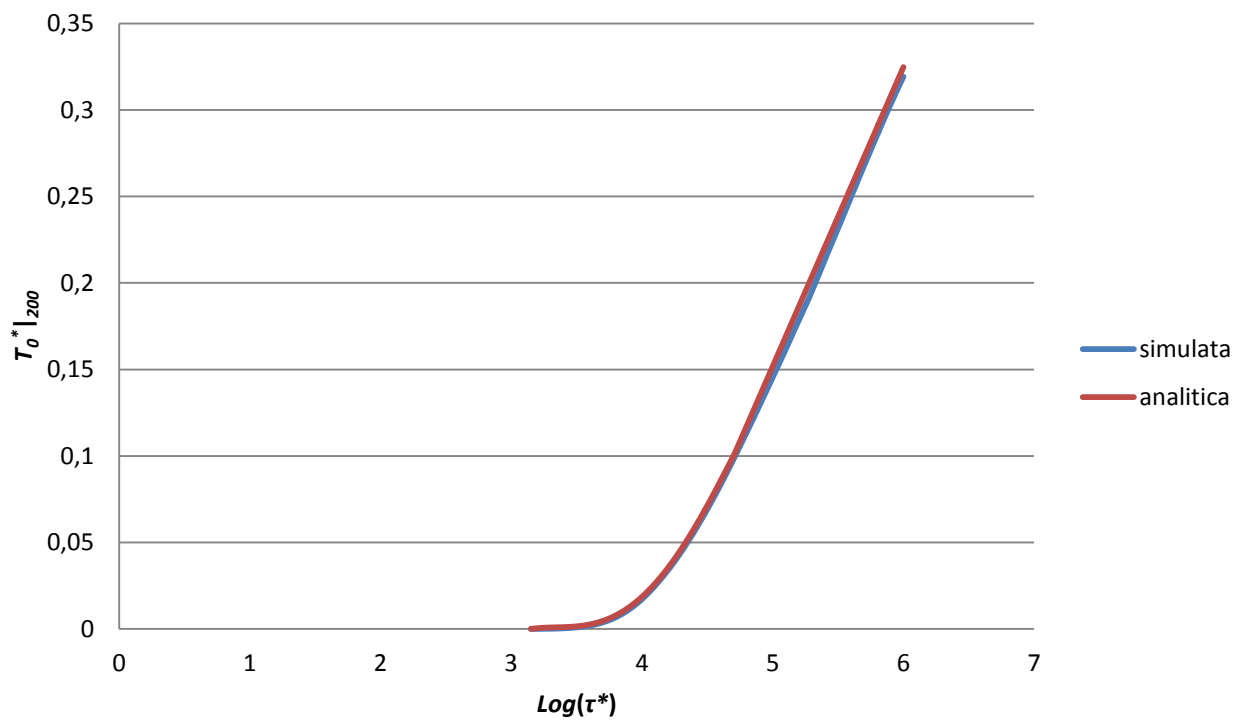
Confronto $T_0^* |_{140}$ analitica e simulata



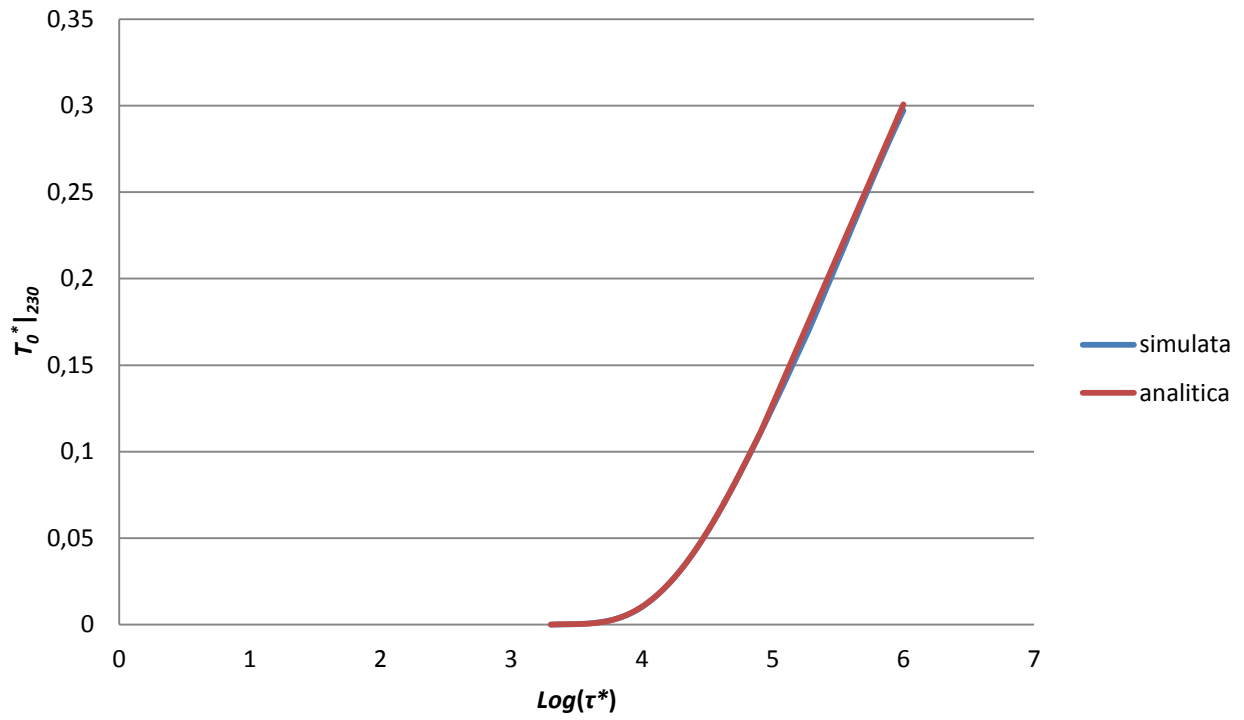
Confronto $T_0^* |_{170}$ analitica e simulata



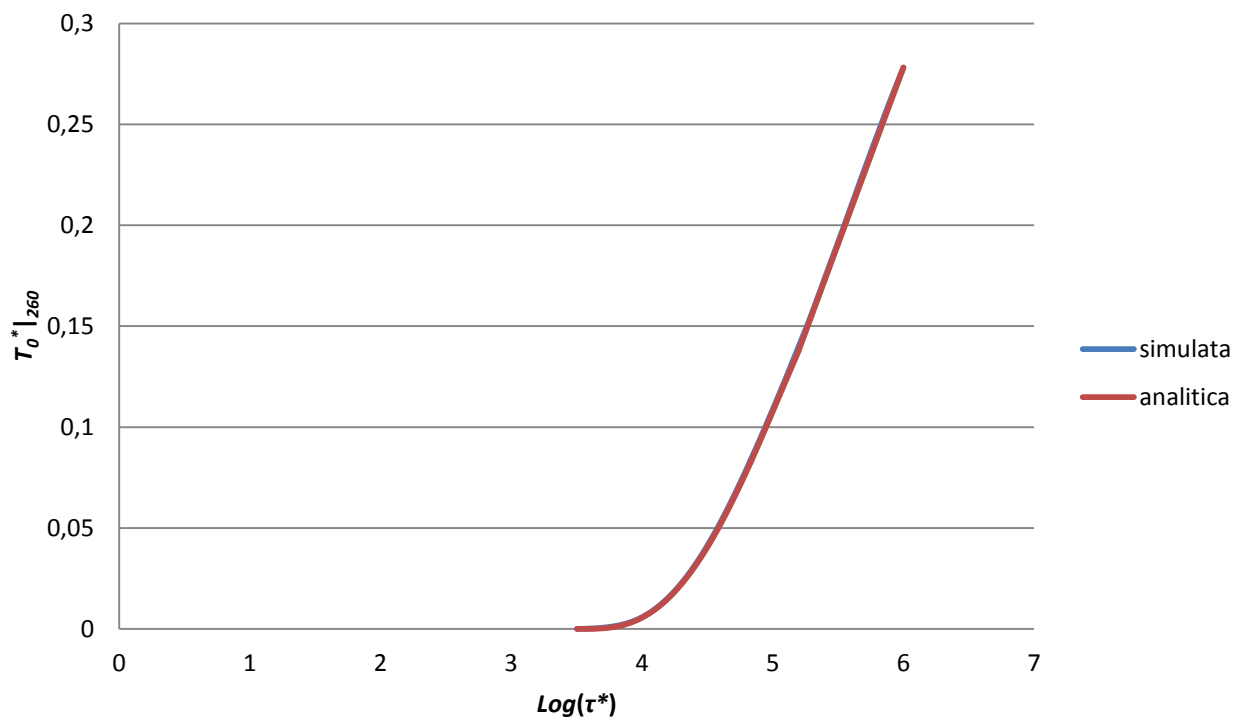
Confronto $T_0^* |_{200}$ analitica e simulata

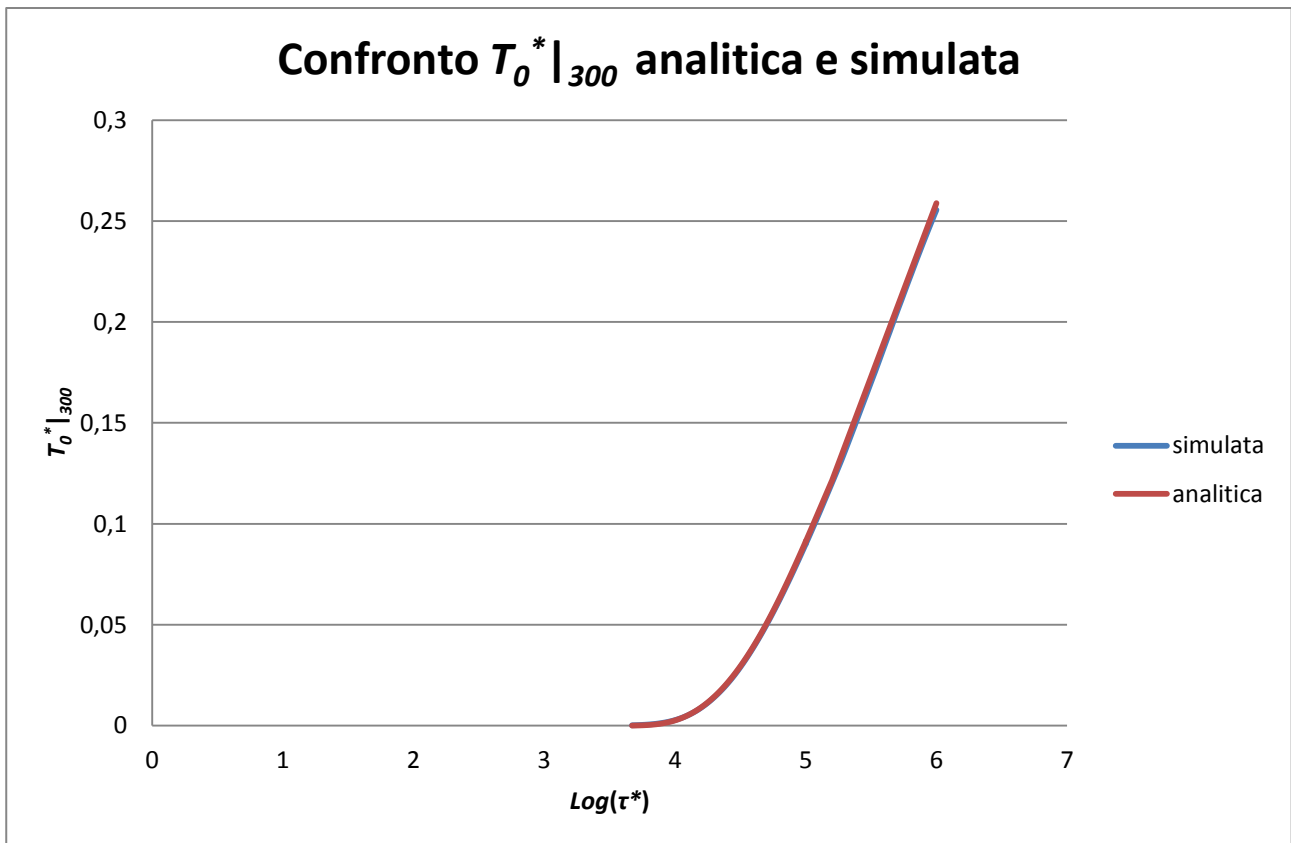


Confronto $T_0^* |_{230}$ analitica e simulata



Confronto $T_0^* |_{260}$ analitica e simulata





I diagrammi sopra riportati mostrano che la precisione delle curve interpolanti è molto elevata.

V.3 Temperatura adimensionale prodotta da un carico termico costante per ciascun mese, ma diverso per i vari mesi: sonda singola

Considerando tutti i mesi uguali e di trenta giorni, per definire il τ_1^* , cioè la durata di un mese in forma adimensionale, sono state fatte le seguenti scelte:

- $\alpha_g = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$: in questo modo non si fa riferimento a un particolare tipo di terreno, ma utilizzando tale valore standard si troverà un generico τ_1^* ;
- $\tau = 2,592 \times 10^6 \text{ s}$: secondi in un mese;
- $D = 0,15 \text{ m}$: diametro delle sonde più utilizzate per progettare i campi.

In tal modo si è ottenuto $\tau_1^* = 115,2$ che, per comodità, è stato arrotondato a 100.

Considerando il carico annuo definito dal modello, è necessario scegliere i valori delle costanti che rappresentano l'energia termica scambiata tra sonda e terreno in ciascun mese dell'anno. Adottando un carico termico di tipo parzialmente non bilanciato, in cui la maggior parte dello scambio di calore avviene nel periodo invernale, i coefficienti utilizzati per costruire la somma pesata sono stati i seguenti:

$$A_0 = 1$$

$$A_1 = 0,725$$

$$A_2 = 0,374$$

$$A_3 = 0,0872$$

$A_4 = -0,11$
 $A_5 = -0,225$
 $A_6 = -0,417$
 $A_7 = -0,319$
 $A_8 = -0,101$
 $A_9 = 0,0798$
 $A_{10} = 0,589$
 $A_{11} = 0,886$

Il carico adimensionale $Q^*(\tau^*)$ per un anno è rappresentato nella figura seguente (fig.42):

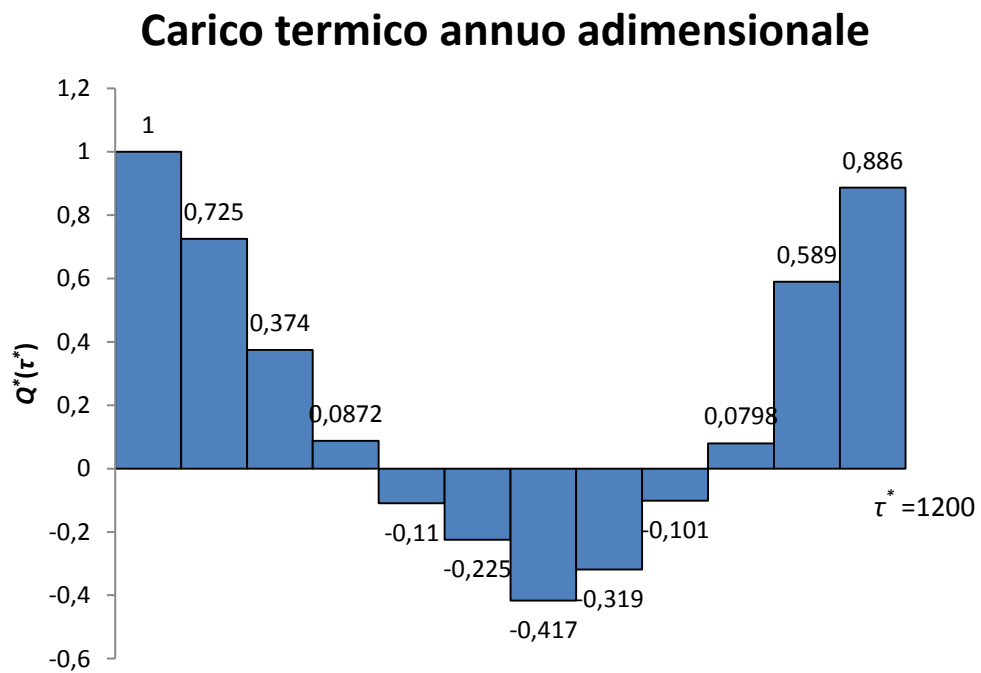


Fig.42 Carico termico adimensionale parzialmente bilanciato applicato

Il carico adimensionale $Q^*(\tau^*)$ per tre anni è rappresentato nella figura seguente (fig.43):

Carico termico adimensionale di periodo 1 anno

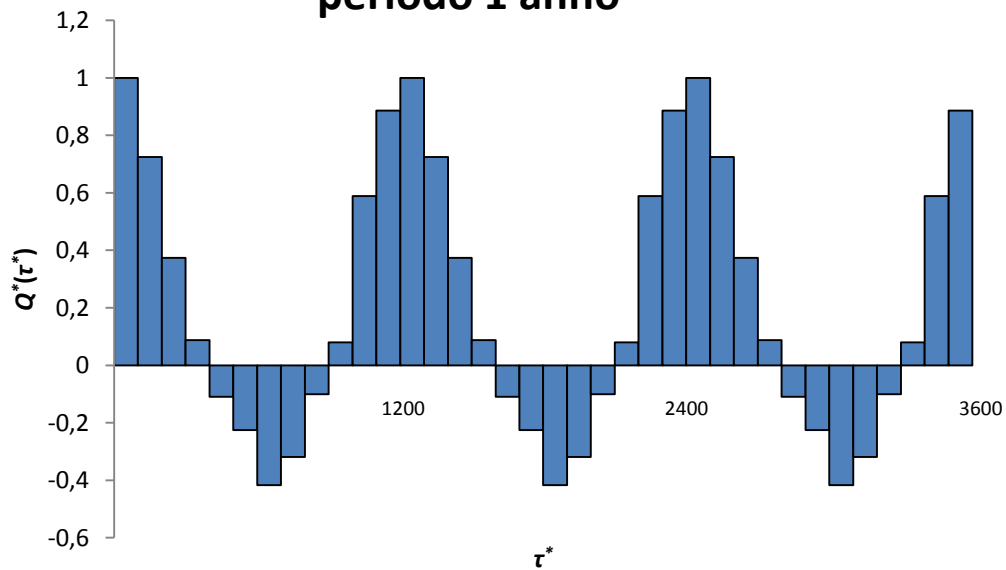


Fig.43 Carico termico adimensionale di periodo un anno applicato

L'andamento della temperatura adimensionale che il carico adimensionale per unità di lunghezza $Q^*(\tau^*)$ produce nel punto di interfaccia tra sonda e terreno, sempre considerando la singola sonda centrale, è illustrato, per i primi 3 anni, nella figura seguente (fig.44). Il grafico è stato eseguito mediante il programma Mathematica.

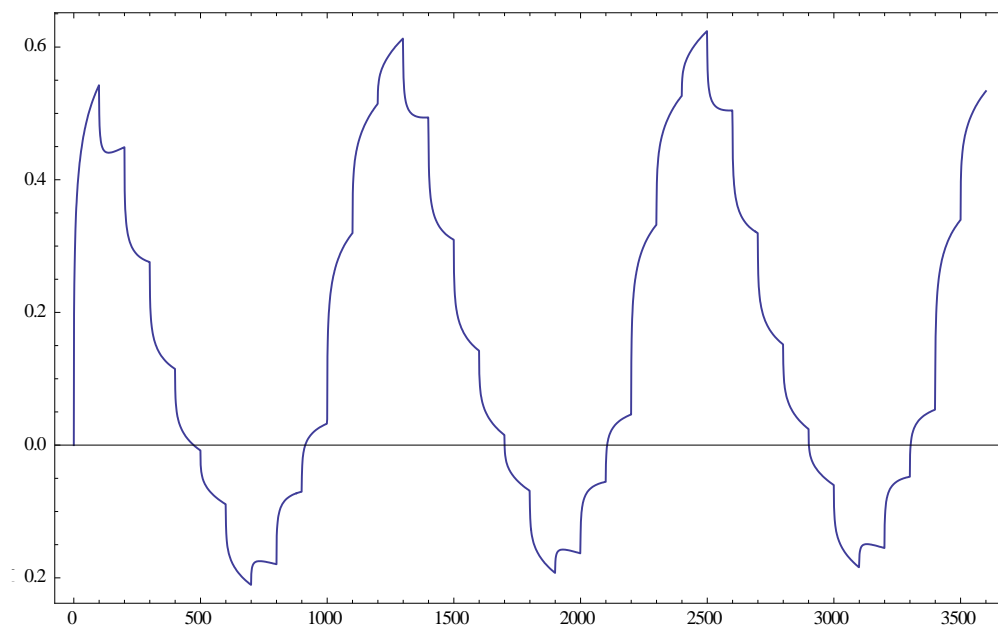


Fig.44 Evoluzione di $T^*|_{0,5}$ dovuta al carico termico imposto per i primi tre anni. In ordinata si ha $T^*|_{0,5}$, in ascissa τ^*

Già nei primi anni si nota che i valori massimi assunti dalla temperatura adimensionale crescono nel tempo.

Visualizzando l'andamento per tutto l'arco di tempo in esame, cioè i cinquanta anni, si osserva che i massimi della temperatura media adimensionale di interfaccia aumentano molto lentamente nel tempo dopo i primi 10 anni (fig.45):

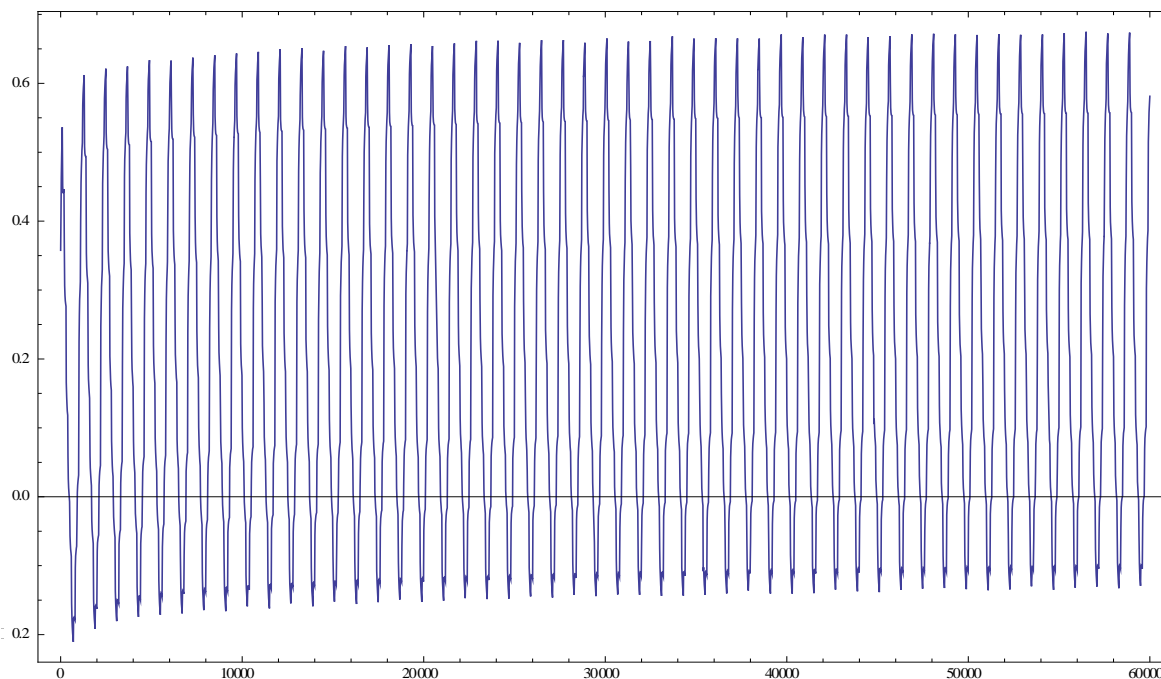


Fig.45 Evoluzione di $T^*|_{0,5}$ dovuta al carico termico adimensionale imposto nell'arco di 50 anni. In ordinata si ha $T^*|_{0,5}$, in ascissa τ^*

Valori numerici dei valori massimi della temperatura adimensionale $T^*|_{0,5}$ per alcuni anni sono riportati nella tabella 10.

	$T^* _{0,5}$ massimo	istante τ^*
1° anno	0,5358	73,49
5° anno	0,6329	4871
10° anno	0,645	$1,088 \times 10^4$
40° anno	0,6679	$4,695 \times 10^4$
50° anno	0,6733	$5,886 \times 10^4$

Tabella 10: valori massimi assunti da $T^*|_{0,5}$ durante il 1°, il 5°, il 10°, il 40° e il 50° anno

Confrontando in particolare i dati ottenuti per il 1° e il 50° anno, si nota che la $T^*|_{0,5}$ massima cresce del 20,42%.

Eseguita dunque l'analisi sulla sonda centrale del campo è possibile studiare quali sono gli effetti prodotti dalle interferenze termiche generate dalle altre sonde su tali andamenti trovati, utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti.

V.4 Temperatura adimensionale all'interfaccia sonda-terreno, per un campo di tre sonde in linea

Una volta analizzati gli effetti prodotti dal carico termico applicato alla sonda centrale sulle variazioni della temperatura media adimensionale di interfaccia tra questa sonda e il terreno, è possibile studiare quali sono le interferenze termiche generate dalla presenza di altre sonde. Il

modello permette di esaminare vari tipi di campi, anche se per semplificare i calcoli si prediligono quelli in cui vi sono particolari simmetrie assiali e centrali. Guardando le equazioni che lo compongono si nota subito che esse sono lineari. Allora sarà possibile applicare il principio di sovrapposizione degli effetti in modo tale da poter valutare l'evoluzione della temperatura media di interfaccia della sonda centrale ad opera dei carichi termici mensili descritti dal modello e delle altre sonde che costituiscono il campo.

Supponendo che le sonde siano molto sottili rispetto alla loro distanza reciproca, si può assumere che tale temperatura ad un certo istante sulla superficie della sonda centrale sia pari a quella prodotta dal carico termico applicato alla sonda stessa sulla sua superficie più la somma dei valori che la temperatura assume, per effetto dello stesso carico, alle varie distanze a cui sono posizionate le altre sonde.

Partendo dai risultati ottenuti nel precedente paragrafo, è stato analizzato un campo di tre sonde geotermiche disposte lungo una singola linea a quaranta diametri di distanza tra loro. Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, la temperatura di interfaccia tra sonda centrale e terreno adimensionale $T_{1 \times 3}^*$ sarà data dall'espressione:

$$T_{1 \times 3}^* = T^*|_{0,5} + 2T^*|_{40}$$

dove $T^*|_{0,5}$ e $T^*|_{40}$ sono rispettivamente le espressioni analitiche fornite dal modello per la temperatura adimensionale nel punto di interfaccia e a quaranta diametri per il caso di singola sonda.

Imponendo allora il carico termico adimensionale $Q^*(\tau^*)$ descritto dal modello su tale campo (basato sulla durata adimensionale $\tau_1^* = 100$ per ogni mese e sui coefficienti A_0, A_1, \dots, A_{599} riportati nel paragrafo precedente) l'evoluzione di $T_{1 \times 3}^*$ in funzione tempo adimensionale τ^* è illustrata dal diagramma (fig.46):

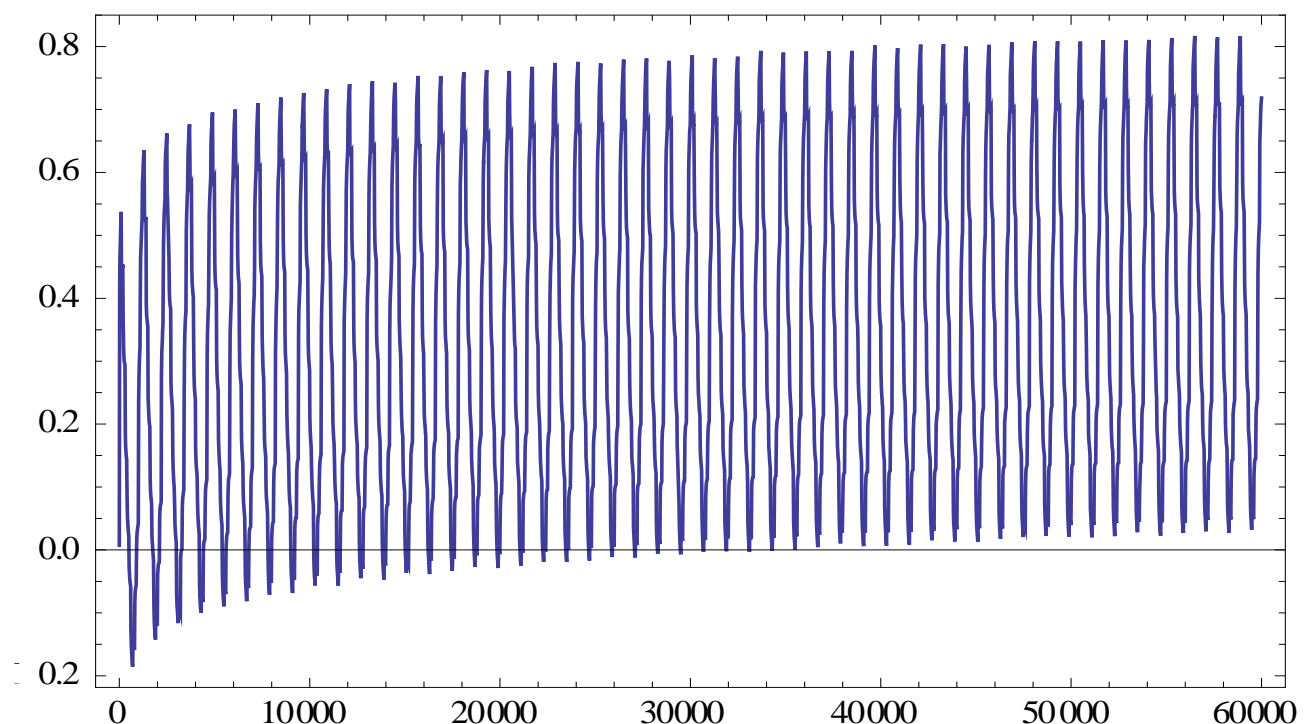


Fig.46: Evoluzione di $T_{1 \times 3}^*$ prodotta dal carico adimensionale di periodo 1 anno durante i 50 anni. In ordinata si ha $T_{1 \times 3}^*$, in ascissa τ^*

Si osserva che i massimi di $T_{1 \times 3}^*$ crescono nel tempo con pendenza sempre minore, ma superiore a quella che si aveva nel caso di sonda singola. In particolare, i valori massimi assunti da $T_{1 \times 3}^*$ nel 1°, nel 5°, nel 10°, nel 40° e nel 50° anno sono stati i seguenti (tabella 11):

	$T_{1 \times 3}^*$ massimo	istante τ^*
1° anno	0,5547	132,1
5° anno	0,6968	4716
10° anno	0,7237	$1,111 \times 10^4$
40° anno	0,8008	$4,685 \times 10^4$
50° anno	0,8137	$5,89 \times 10^4$

Tabella 11: valori massimi assunti da $T_{1 \times 3}^*$ durante il 1°, il 5°, il 10°, il 40° e il 50° anno

In particolare si nota che tra il primo e il cinquantesimo anno il valore massimo di $T_{1 \times 3}^*$ è aumentato del 31,8%.

E' possibile ora fare un confronto tra i valori assunti nel cinquantesimo anno dalla temperatura adimensionale di interfaccia tra la sonda centrale del campo e il terreno nel caso di singola sonda e del campo appena analizzato, in modo da valutare gli effetti prodotti dalle interferenze termiche generate dalle altre sonde (tabella 12):

$T^* _{0,5}$ massimo 50° anno	$T_{1 \times 3}^*$ massimo 50° anno
0,6733	0,8137

Tabella 12: Confronto tra i valori massimi di $T^*|_{0,5}$ e $T_{1 \times 3}^*$ assunti nel 50° anno

Come si nota, la temperatura massima cresce del 17,5%.

Volendo poi valutare la sostenibilità dell'impianto in esame, sarà necessario trasformare la temperatura in forma dimensionale:

$$T = \frac{T^* Q_0}{k_g} + T_g$$

e introdurre la conducibilità k_g del terreno e la temperatura di terreno indisturbato T_g , valori standard o trovati sperimentalmente con un test di risposta termica (TRT), per il tipo di terreno su cui si pensa di installare tale sistema e stabilire quali devono essere i valori limite di temperatura massimo e minimo che non devono essere superati.

Conclusioni

Sono stati presentati due metodi per la determinazione del campo di temperatura nel terreno prodotto da campi di sonde geotermiche verticali soggette a carichi termici costanti per ciascun mese ma variabili nel corso dell'anno, in assenza di rilevanti effetti del moto dell'acqua di falda. Entrambi i metodi sono stati elaborati in forma adimensionale, utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti nello spazio e nel tempo, schematizzando ciascuna sonda geotermica con una superficie cilindrica infinitamente lunga soggetta ad un carico termico uniforme (infinite cylindrical heat source).

La sovrapposizione nello spazio consente di valutare gli effetti delle sonde circostanti, su quella in esame, utilizzando la soluzione del problema adimensionale realizzata considerando una sola sonda. La sovrapposizione nel tempo consente di determinare gli effetti di un carico termico periodico, con periodo un anno e variazioni mensili a gradino, partendo dagli effetti di un carico termico adimensionale di base più semplice.

Nel primo metodo, è stato assunto come carico termico adimensionale di base un carico termico con valore uno e durata di un mese, espresso come differenza di due funzioni a scalino di Heaviside sfalsate di un mese.

Nel secondo metodo, si è assunto come carico adimensionale di base un carico termico costante, con valore uno, valido per tutto il periodo di analisi, espresso come una funzione a scalino di Heaviside centrata sull'istante iniziale. In questo metodo, gli effetti di un carico termico periodico con variazioni mensili a gradino viene ottenuto mediante somme e sottrazioni, pesate, degli effetti del carico termico di base opportunamente sfalsato nel tempo.

In entrambi i metodi, la temperatura adimensionale prodotta dal carico termico di base, a varie distanze adimensionali dall'asse della sonda, è stata espressa in funzione del tempo adimensionale mediante funzioni polinomiali, ottenute interpolando i risultati di simulazioni numeriche agli elementi finiti.

I risultati hanno mostrato che il secondo metodo è preferibile al primo, in quanto consente:

- di ottenere espressioni analitiche più precise del campo di temperatura adimensionale;
- di eliminare un numero puro (numero di Fourier), utilizzato nel primo metodo per esprimere in forma adimensionale la durata dell'impulso mensile.

Le espressioni analitiche della temperatura adimensionale ottenute con il secondo metodo sono molto precise e consentono di determinare correttamente l'effetto di un qualsiasi carico termico periodico con periodo un anno e variazioni mensili a gradino.

Per ciascuno dei metodi proposti è stato presentato un esempio applicativo, riferito ad un campo di tre sonde geotermiche in linea.

Bibliografia

- [1] A. D. Chaisson, R. S. Rees, J. D. Spitler, *A preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground-source heat pump systems*, ASHRAE Transactions, 2000.
- [2] ASHRAE Handbook, *Geothermal Energy*, chap. 32, 2007.
- [3] Camera di commercio industria, artigianato e agricoltura di Bologna, *Pompe di calore geotermiche*, CNA Energia, www.cnaenergia.it.
- [4] D. Coiante, *Le nuove fonti di energia rinnovabile: tecnologie, costi e prospettive*, Franco Angeli, Milano, 2004.
- [5] E. Zanchini, A. Galgaro, T. Terlizze, S. Falcioni, *Test di Risposta Termica di Sonde Geotermiche ad U con Valutazione Numerica*, XXVI Congresso Nazionale UIT sulla Trasmissione del Calore, Palermo, 2008.
- [6] E. Zanchini, S. Lazzari, A. Priarone, *Long-term performance of large borehole heat exchanger fields with unbalanced seasonal loads and groundwater flow*, Energy, 2012.
- [7] E. Zanchini, T. Terlizze, *Finite-Element Evaluation of Thermal Response Tests Performed on U-Tube Borehole Heat Exchangers*, COMSOL Conference 2008, Hannover, 2008.
- [8] ENEA, *Le possibilità di utilizzo della risorsa geotermica a bassa e media entalpia per la sostenibilità della produzione energetica*, www.enea.it.
- [9] Enelgreen Power, *Guida al Geotermico*, www.enelgreenpower.com.
- [10] Eniscuola, *Sostenibilità*, www.eni.it.
- [11] G. Hellstrom, B. Sanner, *Earth energy designer: software for dimensioning of deep boreholes for heat extraction*, Department of Mathematical Physics, Lund University, Svezia, 1994.
- [12] H. Berberich, N. Fisch, E. Hahne, *Fields experiments with a single duct in water saturated claystone*, Proceedings of 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Calorstock'94, Espoo, Finland, 1994.
- [13] IEA (International Energy Agency), *Energy, Technology, Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050*, France, 2006.
- [14] ISES Italia (International Solar Energy Society), *Geotermia*, 2007, www.isesitalia.it.
- [15] J. A. Shonder, J. V. Beck, *A New Method to Determine the Thermal Conductivity of Soil Formations from In Situ Field Tests*, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, 2000.
- [16] M. Bianchi, F. Melino, A. Peretto, *Sistemi Energetici 2 Complementi*, Cap. 2, Pitagora Editrice S.r.l., 2008, Bologna.

- [17] M. Fossa, *A fast method for evaluating the performance of complex arrangements of borehole heat exchangers*, HVAC&R Research, 2011.
- [18] M. Fossa, *The temperature penalty approach to the design of borehole heat exchangers for heat pump applications*, Energy and Buildings, 2011.
- [19] P. Eskilsson, *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*, Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, 1987.
- [20] S. Gehlin, B. Nordell, *Determining Undisturbed Ground Temperature for Thermal Response Test*, ASHRAE Transactions 2003, Vol 109.
- [21] S. Gehlin, G. Hellstrom, *Comparison of Four Models for Thermal Response Test Evaluation*, ASHRAE Transactions 2003, Vol 109.
- [22] S. Gehlin, G. Hellstrom, *Recent Status of In-situ Thermal Response Tests for BTES Applications in Sweden*, Terrastock'2000, Stuttgart, Germany, 2000.
- [23] S. Gehlin, J. D. Spitler, *Thermal Response test – State of the Art 2001*, Report IEA ECES Annex 13, 2002.
- [24] S. Gehlin, *Thermal Response Test: Method Development and Evaluation*, Doctorial Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Svezia, 2002.
- [25] S. Lazzari, A. Priarone, E. Zanchini, *Long-term performance of BHE (borehole heat exchanger) fields with negligible groundwater movement*, Energy, 2010.
- [26] S. Signorelli, T. Kohl, L. Rybach, *Sustainability of production from borehole heat exchanger fields*, Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 2004.
- [27] W. A. Austin, C. Yavuzturk, J. D. Spitler, *Development of an In Situ System for Measuring Ground Thermal Properties*, ASHRAE Transactions, 2000.
- [28] W. A. Austin, *Development of an In Situ System for Measuring Ground Thermal Properties*, Master of Science Thesis 1998, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.
- [29] Wikipedia, l'enciclopedia libera, *Geotermia a bassa entalpia*, www.wikipedia.it.