

ENEA

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA
TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di un modello di simulazione a parametri concentrati del sistema di accumulo cementizio

Luca Doretti, Francesca Martelletto



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

ICEA

Report RdS/PTR(2021)/270

SVILUPPO DI UN MODELLO DI SIMULAZIONE A PARAMETRI CONCENTRATI DEL SISTEMA DI ACCUMULO CEMENTIZIO

Luca Doretti, Francesca Martelletto (Dipartimento ICEA, Università degli Studi di Padova)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: Presidiare e sviluppare tecnologie di prodotto e di processo essenziali per la transizione energetica

Progetto: 1.2 Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico, power to gas, e relative interfacce con le reti

Work package: 2 Accumulo termico.

Linea di attività: LA2.14 - Modellistica semplificata per la previsione del comportamento di un accumulo termico in calcestruzzo addizionato a PCM e di un sistema di essi

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Work package: Raffaele Liberatore, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione:

" Modellistica semplificata per la previsione del comportamento di un accumulo termico in calcestruzzo addizionato a PCM e di un sistema di essi."

Responsabile ENEA: Ing. Adio Miliozzi

Responsabile UNIPD: Prof. Carmelo Maiorana

Indice

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | SOMMARIO | 4 |
| 2 | INTRODUZIONE | 5 |
| 3 | DEFINIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO | 6 |
| 3.1 | IPOTESI SEMPLIFICATIVE | 6 |
| 3.2 | PROCEDURA DI CALCOLO | 9 |
| 3.2.1 | <i>Analisi della fase di riscaldamento</i> | 9 |
| 3.2.2 | <i>Analisi della fase di raffreddamento</i> | 11 |
| 3.3 | PROPRIETÀ TERMOFISICHE DI CALCESTRUZZO E OLIO | 12 |
| 4 | CONFRONTO CON LE PROVE SPERIMENTALI | 14 |
| 4.1 | PROVE SPERIMENTALI | 14 |
| 4.2 | ANALISI DEI FLUSSI TERMICI SCAMBIATI | 15 |
| 4.2.1 | <i>Fase di riscaldamento</i> | 15 |
| 4.2.2 | <i>Fase di raffreddamento</i> | 16 |
| 4.3 | ANALISI DELLE TEMPERATURE | 18 |
| 4.4 | ANALISI DELLE TEMPERATURE CON ELEMENTO CESTARO | 19 |
| 4.4.1 | <i>Fase di riscaldamento</i> | 19 |
| 4.4.2 | <i>Fase di raffreddamento</i> | 20 |
| 4.5 | ANALISI DELLE TEMPERATURE CON ELEMENTO ITALCEMENTI | 21 |
| 4.5.1 | <i>Fase di riscaldamento</i> | 21 |
| 4.5.2 | <i>Fase di raffreddamento</i> | 22 |
| 4.6 | CONFRONTO SPERIMENTALE/CALCOLATO | 23 |
| 4.6.1 | <i>Temperatura del calcestruzzo</i> | 23 |
| 4.6.2 | <i>Temperatura dell'olio</i> | 23 |
| 5 | ADATTAMENTO ALLA NUOVA GEOMETRIA | 24 |
| 6 | INTEGRAZIONE DEL PCM | 26 |
| 6.1 | RISULTATI | 27 |
| 6.1.1 | <i>Energia termica scambiata</i> | 27 |
| 6.1.2 | <i>Profili di temperatura</i> | 29 |
| 6.1.3 | <i>Efficienza termica</i> | 30 |
| 7 | DISPOSIZIONE DEI MODULI IN SERIE E IN PARALLELO | 32 |
| 8 | SVILUPPO DEL LAVORO | 35 |
| 9 | CONCLUSIONI | 36 |
| 10 | RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI | 37 |
| 11 | APPENDICE: CURRICULUM VITAE GRUPPO DI LAVORO | 38 |
| 11.1 | LUCA DORETTI | 38 |
| 11.2 | FRANCESCA MARTELLETTO | 38 |

1 Sommario

Questo documento è parte del lavoro di ricerca nell'ambito della "Linea di Attività LA2.14, con Obiettivo: Presidiare e sviluppare tecnologie di prodotto e di processo essenziali per la transizione energetica, del PTR 2019-2021", che riguarda le prove di accumulo termico in materiali cementizi compatti e con aggiunta di materiale a cambiamento di fase.

Lo scopo del presente lavoro è di realizzare un codice di calcolo, opportunamente semplificato, in modo da ottenere informazioni in tempo reale sull'elemento di accumulo termico in calcestruzzo, con la possibilità di integrare anche una certa percentuale di PCM.

È stato quindi sviluppato un codice di calcolo a parametri concentrati in grado di effettuare l'analisi termica ed energetica del sistema di accumulo cementizio, al variare del tempo e delle condizioni di ingresso, al fine di valutare l'integrabilità di questa soluzione di accumulo con una potenziale utenza industriale. Il codice di calcolo è stato confrontato con i rilievi sperimentali disponibili e rende possibile la stima dei parametri energetici e di gestione operativa. Il codice open-source in Fortran potrà essere utilizzato per la simulazione dell'impianto solare nel suo complesso.

L'accordo del codice di simulazione con le prove sperimentali disponibili al momento della scrittura del presente report risulta molto buono, anche se occorre ampliare la base di riferimento sperimentale. I tempi di calcolo sono estremamente ridotti (dell'ordine di qualche secondo), il codice arriva a convergenza in modo molto rapido e questo rende possibile l'uso del codice di calcolo anche per applicazioni "in linea".

In seguito al confronto con le prove sperimentali, il codice è stato opportunamente modificato, sulla base di una nuova geometria e di una nuova miscela di calcestruzzo. Il codice consente l'analisi dello stesso blocco di calcestruzzo, in cui sia stata aggiunta direttamente nella miscela una prefissata percentuale di materiale a cambiamento di fase (PCM). È stato riportato il confronto tra miscela base, con integrazione del 5% e del 10% di PCM, mostrandone le differenze. L'aumento della percentuale di PCM ha corrisposto ad un miglioramento delle prestazioni termiche, in particolare, a un aumento dell'energia termica scambiata.

È stata infine operata una preliminare analisi di blocchi disposti in serie e in parallelo, per poter verificare le differenze tra queste due disposizioni. Un'attenzione particolare è stata dedicata alla disposizione in serie, in quanto più delicata da analizzare e più interessante, da un punto di vista termico, l'analisi ha fornito risultati particolarmente interessanti che costituiscono una base di partenza per ulteriori approfondimenti e verifiche.

Auspiciabili ulteriori sviluppi del codice possono essere i seguenti.

- Ulteriori migliorie e verifiche del codice sono attese su una base sperimentale più ampia, in particolar modo sulla differenza di temperatura tra olio e calcestruzzo che, nelle prove disponibili, risulta intorno a 50 °C massimi. Sarà interessante verificare il modello di calcolo con prove sperimentali complete, ad es. con calcestruzzo a temperatura ambiente e olio in ingresso a 280 °C.
- Si potrà introdurre nella miscela una percentuale di PCM maggiore, dal momento che il sistema di accumulo non ha ruoli strutturali. In questo modo si potranno apprezzare maggiormente i vantaggi legati all'aggiunta di un quantitativo maggiore di materiale, principalmente individuati nell'aumento dell'energia termica assorbita e ceduta.
- Un'analisi approfondita della disposizione di più elementi combinati insieme è certamente interessante, in particolar modo definendo i parametri operativi di contorno pratici quali la portata di massa di fluido, la potenza di pompaggio, la durata temporale del processo di carica/scarica, il volume del sistema di accumulo ecc.

2 Introduzione

Parallelamente al lavoro di simulazione tridimensionale che ha sostanzialmente finalità progettuali e di verifica (studio svolto in altra parte del presente progetto), si è proceduto a un'analisi termica semplificata con finalità prettamente operative e di gestione del sistema durante il suo funzionamento in opera.

La richiesta è di avere uno strumento di calcolo che permetta di prevedere il funzionamento in opera del singolo elemento di accumulo e, successivamente, del sistema complessivo formato dai vari elementi disposti in serie o in parallelo.

Si richiede in particolare uno strumento modulare, flessibile e veloce che consenta in modo pressoché istantaneo il calcolo dei parametri di accumulo del singolo elemento, partendo dai dati di input schematizzabili in: portata di massa, temperatura di ingresso del fluido termovettore (olio), temperatura iniziale del calcestruzzo, ipotizzata uniforme nell'elemento, temperatura dell'ambiente esterno e durata della simulazione.

I parametri che descrivono l'accumulo termico sono costituiti dalle temperature dell'elemento nei suoi vari punti, ma il parametro principale è in realtà la capacità dell'elemento stesso di immagazzinare (in fase di riscaldamento del calcestruzzo) o di rilasciare (in fase di raffreddamento del calcestruzzo) l'energia termica nei confronti dell'olio. Infatti, il modello è in grado di prevedere i diversi parametri termici e in particolare l'energia termica accumulata e/o smaltibile e il livello di efficienza del sistema (massima energia accumulabile/cedibile).

La scelta del calcestruzzo come materiale per il TES (in questo caso chiamato TESC, Thermal Energy Storage Concrete) nasce da una somma di considerazioni: è un materiale a basso costo, facilmente reperibile, facile da produrre, durevole, offre un elevato range di temperature al cui interno è possibile lavorare, i suoi ingredienti principali sono disponibili ovunque e i suoi componenti non pongono problemi critici dal punto di vista ambientale. Inoltre, grazie al suo calore specifico, alla conducibilità termica, alle proprietà meccaniche, quali la resistenza a compressione e ad un coefficiente di espansione termica simile a quello dei tubi d'acciaio dello scambiatore, garantisce un'elevata resistenza meccanica alle sollecitazioni termiche cicliche già nella formulazione ordinaria. Il mix design può essere poi facilmente modificato e migliorato dal punto di vista delle prestazioni termiche, senza che questo implichi particolari difficoltà realizzative, in quanto si tratta di scegliere gli elementi da inserire in fase di preparazione.

Il modello calibrato deve poi essere modificato sulla base di una nuova geometria e una nuova miscela di calcestruzzo, includendo anche la possibilità di integrare una certa percentuale di materiali a cambiamento di fase, detti comunemente Phase Change Materials (PCMs). L'accumulo di energia termica, infatti, si basa anche sull'integrazione di PCM, che sfruttano la transizione di fase, da solido a liquido e viceversa, per assorbire i flussi termici entranti o uscenti, immagazzinando o rilasciando un'elevata quantità di energia e mantenendo sostanzialmente costante la propria temperatura. È stato provato il loro beneficio dal punto di vista termico nella miscela di calcestruzzo, ma ulteriori indagini (teoriche e sperimentali) sono necessarie per poter definire in modo più preciso il tipo e la concentrazione di PCM migliore da integrare nel calcestruzzo, al fine di ottenere un più efficiente sistema di accumulo termico. In questa analisi è stato utilizzato il cosiddetto "Sale Solare", una miscela composta da nitrato di sodio e potassio (40% di KNO_3 e 60% di NaNO_3), in percentuale pari al 5% e al 10%.

Il codice è stato anche implementato per studiare elementi disposti in serie e in parallelo, per verificare le differenze in termini di accumulo e di efficienza di queste due diverse disposizioni di elementi.

3 Definizione del codice di calcolo

3.1 Ipotesi semplificative

La richiesta è un codice di simulazione a parametri concentrati con opportune semplificazioni rispetto alle simulazioni FEM già descritte in precedenti documenti, ma dispendiose dal punto di vista dei tempi di calcolo, software e hardware necessari.

In particolare, il codice di calcolo deve soddisfare le seguenti specifiche:

- Avere tempi di calcolo assolutamente modesti
- Avere come parametri di input la portata di massa del fluido termovettore, la sua temperatura, la temperatura iniziale del calcestruzzo temperatura iniziale del calcestruzzo, la temperatura dell'ambiente esterno e la durata della simulazione.
- Tenere conto degli scambi termici con l'ambiente esterno
- Essere in grado di simulare entrambe le fasi di riscaldamento e raffreddamento del calcestruzzo (carica/scarica)
- Fornire un parametro globale che renda conto dell'energia complessivamente immagazzinata nel singolo elemento di accumulo
- Essere compilato in un codice di programmazione "aperto", riconosciuto in ambito scientifico.

In questa fase si lavorerà sul singolo elemento cementizio di accumulo e le capacità previsionali del codice saranno confrontate con prove sperimentali di simulazione condotte sui due elementi (Cestaro e Italcementi) già analizzati con strumenti FEM e descritti in precedenza, nei report (RdS/PAR2019/118, RdS/PAR2019/119, RdS/PAR2019/120, RdS/PAR2019/121, RdS/PTR2020/180, RdS/PTR2020/181).

Alla luce delle richieste, un'approfondita analisi della letteratura scientifica disponibile non ha portato a soluzioni preesistenti da poter utilizzare; la gran parte dei metodi di calcolo pubblicati si basa, infatti, su analisi FEM estremamente dettagliate e precise, ma molto onerose dal punto di vista dei tempi e della complessità del calcolo. Inoltre, tali metodi fanno riferimento ad applicazioni che per geometria, fluido, solido o altro non sono facilmente confrontabili con il caso allo studio. Per questa ragione, si è deciso di implementare un metodo di calcolo semplificato specificatamente dedicato al sistema allo studio; il punto di partenza per la progettazione è una chiara definizione delle necessarie ipotesi semplificative del metodo di calcolo.

Per la stesura del codice si è scelto di utilizzare il linguaggio di programmazione Fortran F90.

Il modello proposto assume tutte le ipotesi a parametri concentrati, ma ne introduce anche di nuove, di seguito schematizzate.

- Per arrivare al risultato atteso si è schematizzato il sistema complesso del blocco di accumulo cementizio con un analogo sistema che abbia come unica temperatura di riferimento quella media del calcestruzzo, opportunamente calcolata in modo che sia rappresentativa dell'energia dell'intero blocco.
- Il sistema si presenta come una situazione intermedia tra una geometria interna cilindrica (il tubo interno) e la geometria esterna a parallelepipedo del sistema di accumulo. Per questo motivo, è stato determinato un diametro di equivalente.
- Per quanto riguarda lo scambio di calore tra olio e il calcestruzzo, la diffusione nel calcestruzzo stesso e sull'isolante e lo scambio con l'ambiente esterno, si è scelta una configurazione cilindrica. Per lo scambio di calore dissipato attraverso l'isolante posto alle estremità del blocco si è scelta una configurazione a pareti piane. Le configurazioni geometrico/termiche trovano evidentemente un punto di giunzione nell'opportuno calcolo delle resistenze termiche e delle rispettive aree di scambio termico di riferimento, attraverso uno schema riconducibile ad una struttura di resistenze disposte in serie e in parallelo;

- In modo da tenere in conto la variazione di energia interna della massa di isolante, la temperatura media di ogni strato, dipendente dal tempo, è stata calcolata, insieme alla variazione di energia interna, ad ogni istante temporale;
- Per il calcolo della temperatura di uscita dell'olio, durante la fase di riscaldamento, si è tenuto anche in considerazione lo scambio di calore latente dovuto all'evaporazione dell'acqua interstiziale contenuta nel calcestruzzo;
- Il modello desiderato richiede una soluzione in regime transitorio, quindi le temperature di olio, calcestruzzo e strati di isolante sono stimate attraverso due bilanci di energia, uno per la fase di riscaldamento e uno per il raffreddamento. Per 5-10 ore di processo, un intervallo temporale di 10-30 secondi può essere adeguato. Tuttavia, in modo da poter avere un confronto diretto tra dati numerici e sperimentali, è stato adottato lo stesso time step di 5.56 secondi.
- L'elemento di accumulo viene suddiviso in 4 sottosistemi uguali, ottenuti dividendo la sezione trasversale in 4 elementi quadrati con al centro il tubo in cui fluisce l'olio. In questo modo, l'elemento complessivo viene studiato come quattro sotto-elementi disposti in successione (ossia in serie). L'elemento "base" presenta (vedi Figura 1) due superfici contigue ad altri due elementi. queste superfici vengono assunte adiabatiche, le altre due superfici scambiano calore per conduzione termica con due strati di isolante termico espanso, che, a loro volta, scambiano calore con l'ambiente esterno per convezione e radiazione termica. La Figura 1 rende visivamente atto dell'alto grado di isolamento: l'elemento allo studio presenta lato pari a 10 cm ed è ricoperto da due strati di isolante per un totale di 20 cm di spessore. Il flusso termico dissipato verso l'esterno è quindi estremamente ridotto, anche se non trascurabile come si vedrà nel seguito dell'analisi; elevati spessori di isolante aumentano la resistenza conduttiva, ma parallelamente riducono quella convettiva esterna a causa del forte incremento dell'area esterna a contatto con l'aria;

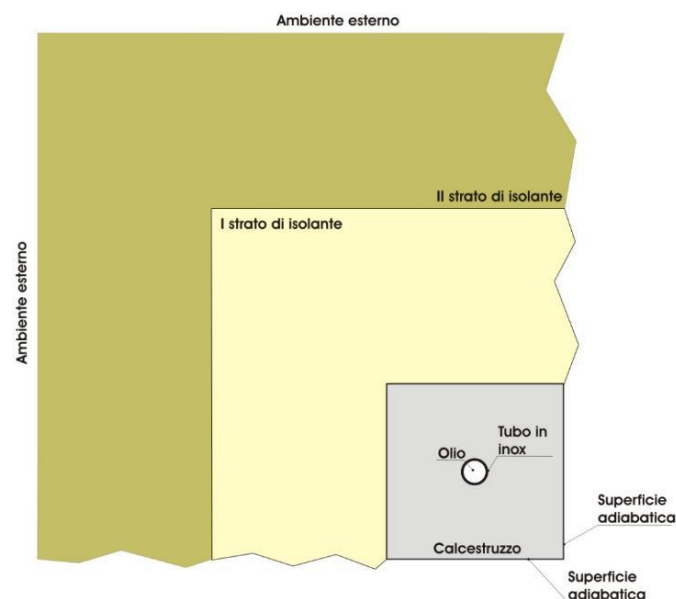


Figura 1 Schema del sottoelemento di riferimento.

- Una ulteriore ipotesi semplificativa si basa sulla temperatura di riferimento dell'elemento in calcestruzzo, che ha le maggiori implicazioni sul metodo di calcolo. Il calcolo della distribuzione della temperatura sulla sezione non è facilmente risolvibile, per cui vi è bisogno di una singola temperatura di riferimento del calcestruzzo ($t_{cls,rif}$) che riassume il livello energetico dell'elemento e possa sostenere l'architettura del calcolo. Tale temperatura di riferimento sostituisce, con ottima approssimazione, una temperatura media volumica (già analizzata anche nelle analisi FEM nel report [1]) ossia una media della temperatura del solido sul volume (e anche sulla massa, trattandosi di un solido a densità costante).

Analizzando il processo di riscaldamento (ma lo stesso ragionamento si può spostare sul raffreddamento) dell'elemento, ossia olio "caldo" (che si raffredda tra ingresso e uscita) e calcestruzzo "freddo" (che si riscalda nel tempo), il codice di calcolo deve rispondere numericamente alle seguenti domande:

- Quanta energia termica riesce a immagazzinare il calcestruzzo?
- Quanto velocemente procede il processo?
- Qual è la percentuale di carica termica rispetto al valore massimo ideale?
- Quanto deve durare il processo per ottenere una certa carica termica?

La temperatura di riferimento che può rispondere a queste domande è stata assunta pari alla temperatura media delle superfici esterne (contorno) del sottoelemento quadrato, già descritto in Figura 1, e "cella" base dei successivi calcoli, tali superfici sono state assunte isoterme alla medesima temperatura.

La scelta di tale temperatura di riferimento segue anche dall'analisi dei rilievi sperimentali, le termocoppie inserite nell'elemento cementizio sono distribuite tra (vedi Figura 2, tratta da [2]):

- Linee di mezzeria verticale e orizzontale ($T_{x,2,3,4,7,8}$)
- Contorno esterno dell'elemento a contatto con l'isolante ($T_{x,N,E,S,O}$)
- Superficie a contatto con i tubi ($T_{x,10,11,12,13}$).

La media tra le temperature dei primi due punti (mezzerie e contorno) sulle tre sezioni (1, 2, 3) disposte sull'asse dell'elemento costituisce la temperatura di riferimento sperimentale del sottoelemento al suo contorno.

In conclusione, dal punto di vista sperimentale, la temperatura di riferimento del calcestruzzo è la media di 14 temperature: 5 temperature "interne" sulla mezzeria dell'elemento e 9 sulla superficie esterna.

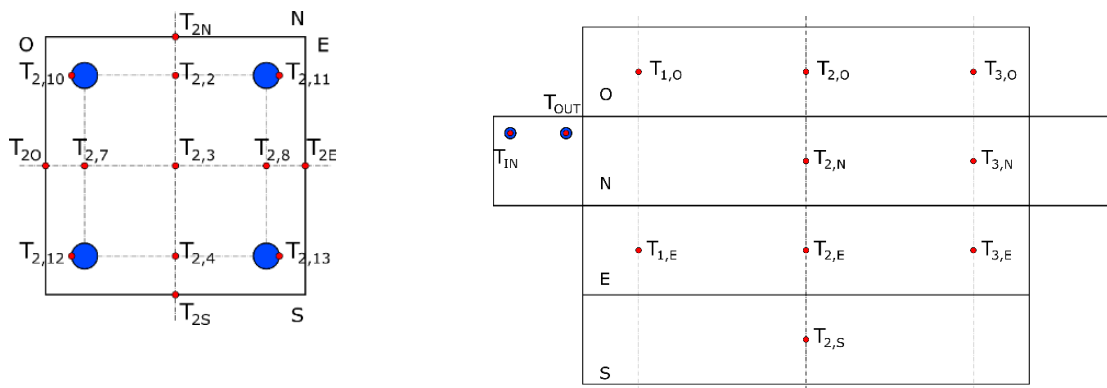


Figura 2 Schema di posizionamento delle termocoppie.

La scelta della temperatura così descritta deriva anche dall'analisi del processo fisico; durante il riscaldamento l'olio caldo cede calore al calcestruzzo che si riscalda nel tempo, la condizione ideale di riferimento di massima carica (peraltro non sempre raggiungibile) si raggiunge quando la temperatura di riferimento raggiunge l'equilibrio con la temperatura di ingresso dell'olio.

Analogamente, durante il raffreddamento, il calcestruzzo caldo cede energia all'olio più freddo, anche in questo caso la condizione ideale di fine processo (con alcune differenze rispetto al riscaldamento, analizzate nel seguito) viene teoricamente raggiunta quando la temperatura di riferimento del contorno raggiunge l'equilibrio con l'olio; in queste condizioni il sistema di accumulo ha ceduto all'olio tutta l'energia accumulata e fisicamente cedibile;

- L'ultima ipotesi semplificativa riguarda il meccanismo di scambio/accumulo termico all'interno del calcestruzzo; anche nell'ipotesi di monodimensionalità, i parametri termofisici del sistema non rendono possibile una soluzione analitica diretta, né nelle ipotesi di sistema a resistenza interna trascurabile, né nelle ipotesi di resistenza termica esterna trascurabile [3, 4].

Il calcolo del numero di Biot per i due modelli di riferimento porta ai seguenti valori:

- Elemento di accumulo Cestaro, numero di Biot, $Bi=154$
- Elemento di accumulo Italcementi, numero di Biot, $Bi=189$

Il sistema non può venire affrontato con i metodi tradizionali di calcolo [3, 4], ma va analizzato con una soluzione numerica iterativa, poiché i flussi termici e le temperature risultano accoppiate e una soluzione esplicita non può essere implementata. La soluzione iterativa è basata sul bilancio di energia del sistema in regime variabile a cui viene sovrapposta una modifica della resistenza interna del calcestruzzo per tenere in opportuno conto del fenomeno di accumulo transitorio di energia interna.

3.2 Procedura di calcolo

Per rendere più schematica la spiegazione della procedura di calcolo si distingue il caso della fase di riscaldamento da quella di raffreddamento, il codice di calcolo sarà in grado di selezionare i due casi in modo automatico.

In questo paragrafo viene descritta la procedura di calcolo nella sua struttura generale senza entrare nei dettagli del calcolo dei singoli parametri.

3.2.1 Analisi della fase di riscaldamento

Durante la fase di riscaldamento è possibile identificare tre distinti flussi termici.

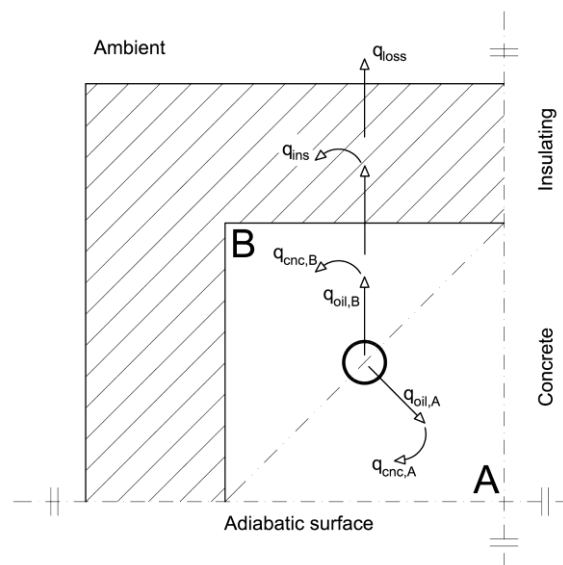


Figura 3 Schema dei flussi termici in riscaldamento.

Q_{olio}

Il flusso termico ceduto dall'olio è costituito dallo scambio termico tra l'olio e il calcestruzzo, detto scambio avviene per convezione termica forzata tra olio e superficie interna del tubo in acciaio inossidabile, per conduzione termica in sistema cilindrico all'interno dello spessore del tubo in acciaio e infine per conduzione termica in sistema cilindrico all'interno del calcestruzzo. Nell'ipotesi di calcolo per sistema cilindrico vengono quindi calcolate tre resistenze termiche (olio, acciaio inox, calcestruzzo) a cui si aggiunge la resistenza che tiene conto del fenomeno di accumulo (meglio descritta nel seguito); la somma delle resistenze porta a una resistenza termica totale tra l'olio e il calcestruzzo e quindi a:

$$Q_{olio} = \frac{t_{olio,media} - t_{cls}}{R_{tot,int}} \quad (1)$$

dove:

$$t_{olio,media} = \frac{t_{olio,in} + t_{olio,out}}{2} \quad (2)$$

$$t_{cls} = t_{cls,rif}$$

$$R_{tot,int} = R_{olio} + R_{inox} + R_{cls} \quad (3)$$

in particolare, per il calcolo della resistenza termica del calcestruzzo in sistema cilindrico viene utilizzato il diametro equivalente (D_{eq}) calcolato su un cilindro della stessa massa e volume del sotto-elemento a parallelepipedo. Per il sotto-elemento considerato il diametro equivalente risulta pari a $D_{eq}=113$ mm.

Per il calcolo della resistenza termica convettiva dell'olio, analizzati i valori dei numeri adimensionali di Reynolds e Prandtl, il coefficiente per convezione forzata viene calcolato con la ben nota relazione semi-empirica di Dittus-Boelter [3].

Q_{cls}

Il flusso termico accumulato dalla massa di calcestruzzo è legato alla temperatura di riferimento del calcestruzzo stesso dalla formula dell'energia interna per un solido incomprimibile con calore specifico costante:

$$Q_{cls} = m_{cls} \cdot c_{cls} \cdot \frac{dt_{cls}}{d\tau} \quad (4)$$

dove:

m_{cls} = massa dell'elemento di accumulo

c_{cls} = calore specifico del calcestruzzo

τ = tempo

Q_{iso}

Il flusso termico assorbito dai due strati di isolante può essere calcolato mediante la conduzione termica su strato cilindrico nello spessore dell'isolante, più conduzione in parete piana sulle due teste di isolante del blocco.

$$Q_{iso} = m_{iso,1} \cdot c_{iso,1} \cdot \frac{dt_{iso,1}}{d\tau} + m_{iso,2} \cdot c_{iso,2} \cdot \frac{dt_{iso,2}}{d\tau} \quad (5)$$

Q_{diss}

Il flusso termico dissipato dal blocco di accumulo verso l'ambiente esterno può essere calcolato mediante la convezione termica naturale con l'aria esterna (parametro che include anche gli effetti dell'eventuale radiazione termica). Il coefficiente di convezione naturale con l'aria è assunto costante e pari a 10 W/m²K.

$$Q_{diss} = \frac{t_{iso,est} - t_{aria}}{R_{aria}} \quad (6)$$

dove:

t_{aria} = temperatura media dell'aria

$t_{iso,ext}$ = temperatura superficiale dello strato esterno di isolante

R_{aria} = resistenza convettiva e radiativa dell'ambiente esterno

Definiti i vari flussi termici del sistema, è possibile scrivere l'equazione principale di bilancio energetico del sistema in riscaldamento (vedi Figura 3), come si vede il flusso termico ceduto dall'olio si distribuisce tra calcestruzzo, calore dissipato verso l'ambiente esterno e calore assorbito dall'isolante:

$$Q_{cls} = Q_{olio} - Q_{iso} - Q_{diss} \quad (7)$$

risulta inoltre disponibile la seguente equazione di bilancio energetico sull'olio:

$$Q_{olio} = \dot{m}_{olio} \cdot c_{olio} \cdot (t_{olio,out} - t_{olio,in}) \quad (8)$$

dove:

\dot{m}_{olio} = portata di massa dell'olio

c_{olio} = calore specifico dell'olio

Fissato un intervallo di tempo ($\Delta\tau$, time step), l'equazione viene risolta per via numerica iterativa calcolando i 3 flussi termici e le due variabili non note, t_{cls} e $t_{olio,out}$, per i singoli intervalli di tempo e per tutta la durata del processo.

In riscaldamento, viene anche considerato un flusso di calore latente, dovuto alla vaporizzazione dell'acqua interstiziale presente nel calcestruzzo. Si considera una portata di massa che evapora pari a 1 kg/h.

Quando il sistema si porta a convergenza, per ogni intervallo di tempo, è possibile inoltre calcolare l'energia interna accumulata dal calcestruzzo (ΔE_{cls}), la quale, integrata nel tempo, porta alla totale energia interna accumulata dal calcestruzzo nell'intero processo (E_{cls}).

$$\Delta E_{cls} = Q_{cls} \cdot \Delta\tau \quad (9)$$

3.2.2 Analisi della fase di raffreddamento

Durante la fase di raffreddamento lo schema e il calcolo dei flussi termici sono leggermente diversi, analogamente al caso precedente è possibile identificare 3 distinti flussi termici (non si riportano i parametri già definiti).

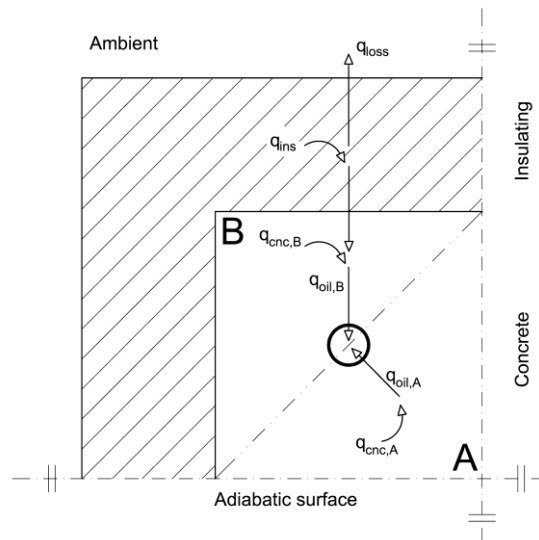


Figura 4 Schema dei flussi termici in raffreddamento.

Q_{olio}

Il flusso termico assunto dall'olio (ossia scambiato dal calcestruzzo verso l'olio) è costituito dallo scambio termico tra l'olio e il calcestruzzo, detto scambio avviene per convezione termica forzata tra olio e superficie interna del tubo in acciaio inox, per conduzione termica in sistema cilindrico all'interno dello spessore del tubo in acciaio, per conduzione termica in sistema cilindrico all'interno del calcestruzzo.

$$Q_{olio} = \frac{t_{cls} - t_{olio,media}}{R_{tot,int}} \quad (10)$$

Q_{cls}

Il flusso termico rilasciato dalla massa di calcestruzzo è legato alla temperatura di riferimento del calcestruzzo stesso dalla formula dell'energia interna per un solido incompressibile:

$$Q_{cls} = -m_{cls} \cdot c_{cls} \cdot \frac{dt_{cls}}{d\tau} \quad (11)$$

Q_{diss}

Il flusso termico dissipato dal calcestruzzo verso l'ambiente esterno viene calcolato in modo identico al caso in riscaldamento.

$$Q_{diss} = \frac{t_{iso,est} - t_{aria}}{R_{aria}} \quad (12)$$

Definiti i vari flussi termici del sistema, è possibile scrivere l'equazione principale di bilancio energetico del sistema in raffreddamento (vedi Figura 4), come si vede il flusso termico ceduto dal calcestruzzo si distribuisce tra calore verso l'olio, calore dissipato verso l'ambiente e calore assorbito dall'isolante:

$$Q_{cls} = Q_{olio} - Q_{iso} + Q_{diss} \quad (13)$$

risulta inoltre disponibile la seguente equazione di bilancio energetico sull'olio:

$$Q_{olio} = \dot{m}_{olio} \cdot c_{olio} \cdot (t_{olio,in} - t_{olio,out}) \quad (14)$$

Fissato un intervallo di tempo ($\Delta\tau$, time step), l'equazione viene risolta per via numerica iterativa calcolando i 3 flussi termici e le due variabili non note, t_{cls} e $t_{olio,out}$, per i singoli intervalli di tempo per tutta la durata del processo.

Quando il sistema si porta a convergenza, per ogni intervallo di tempo, è possibile inoltre calcolare l'energia interna rilasciata dal calcestruzzo (ΔE_{cls}), la quale, integrata sul tempo, porta alla totale energia interna ceduta dal calcestruzzo nell'intero processo (E_{cls}).

3.3 Proprietà termofisiche di calcestruzzo e olio

Si riportano brevemente in questo paragrafo i valori delle principali grandezze termofisiche utilizzate per i due tipi di calcestruzzo e per l'olio utilizzato come fluido termovettore. Queste grandezze sono già state oggetto di studio e analisi in precedenti documenti [5].

Per il calcestruzzo le proprietà sono state assunte costanti e sono state considerate per temperature maggiori di 100 °C.

In particolare, dal confronto tra la miscela Cestaro e Italcementi si nota come le grandezze termofisiche (calore specifico, densità e conducibilità termica) siano sostanzialmente diverse, ma portino a un valore della diffusività termica molto simile (Tabella 1).

Tabella 1 Proprietà e parametri del calcestruzzo.

| Parametro | Elemento Cestaro | Elemento Italcementi |
|---|------------------------|------------------------|
| Calore specifico [J/kgK] | 820 | 930 |
| Densità [kg/m ³] | 2483 | 1837 |
| Conducibilità termica [W/mK] | 2.21 | 1.80 |
| Diffusività termica [m ² /s] | 1.123 10 ⁻⁶ | 1.054 10 ⁻⁶ |
| Numero di Biot [-] | 154.3 | 189.5 |

Per il calcolo delle proprietà dell'olio Paratherm NF sono state utilizzate delle relazioni di best-fitting (Tabella 2) in modo da poter implementare il loro calcolo all'interno del codice di calcolo per adattare il valore alle diverse condizioni delle iterazioni. Nelle prove attualmente disponibili, il salto di temperatura dell'olio non è molto elevato e le proprietà non variano molto, ma in prove con l'elemento freddo, è importante considerare le proprietà nel modo corretto. Per ulteriori dettagli sulle proprietà dell'olio si rimanda al bollettino tecnico pubblicato dalla casa produttrice [6].

La temperatura dell'olio è assunta come la media tra l'olio in ingresso e uscita e viene definita in [°C].

Tabella 2 Proprietà dell'olio.

| Parametro | Equazione di best-fitting |
|------------------------------|--|
| Calore specifico [J/kgK] | $c_p = 5.284 \cdot t + 1720$ |
| Densità [kg/m ³] | $\rho = -0.651 \cdot t + 895.6$ |
| Conducibilità termica [W/mK] | $\lambda = -8 \cdot 10^{-5} \cdot t + 0.110$ |
| Viscosità dinamica [kg/ms] | $\mu = (53238 \cdot t^{-2.138})/1000$ |

L'olio Paratherm NF viene utilizzato per applicazioni fino a 315 °C, si noti che in particolare la viscosità dinamica assume alle temperature tipiche delle prove (250 °C) valori estremamente ridotti, l'altro parametro che influenza il grado di errore delle stime di calcolo è il calore specifico, parametro molto sensibile all'inquinamento dell'olio per impurità e soprattutto umidità che può provenire dall'aria o da altre porzioni dell'impianto di prova, per questi motivi si suggerisce di verificare periodicamente che l'olio utilizzato presenti effettivamente le proprietà termofisiche dichiarate.

4 Confronto con le prove sperimentali

4.1 Prove sperimentali

Il codice di calcolo viene validato nel confronto con le 4 prove sperimentali. Un'intera prova dura circa 10 ore e si compone di diverse fasi di riscaldamento e raffreddamento dell'elemento di alcune fasi di preparazione dell'olio (con o senza circolazione dell'olio all'interno dell'elemento di accumulo).

La Figura 5 riporta un esempio di una prova completa con le temperature dell'olio all'ingresso e all'uscita dall'elemento e con le 4 temperature rilevate dalle termocoppie nella sezione centrale del provino (2) sulle linee verticali e orizzontali di mezzeria ($T_{2,2}$ - $T_{2,3}$ - $T_{2,4}$ - $T_{2,7}$); si noti che l'ordinata non parte dalla temperatura ambiente.

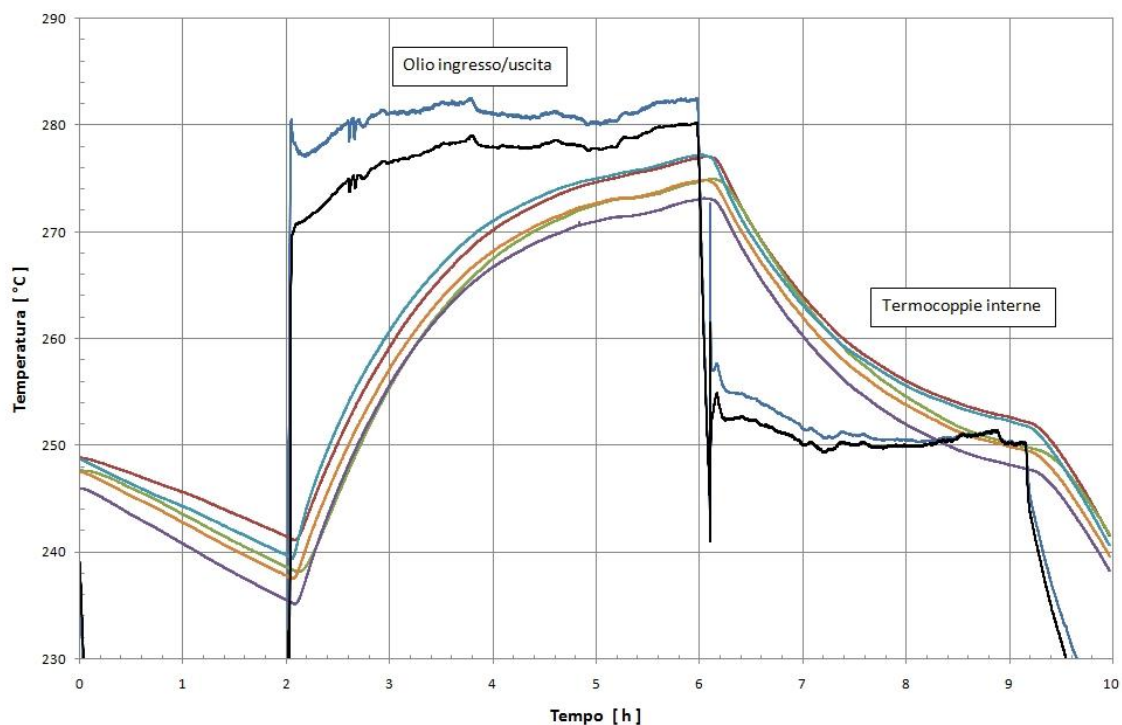


Figura 5 Esempio di prova sperimentale (Cestaro, 13-07-2016).

Il modello verrà confrontato solamente con le due fasi di riscaldamento e raffreddamento vere e proprie, per cui dall'intera prova verranno estratte le due porzioni significative; con riferimento a questa specifica prova, la fase di riscaldamento va circa da 2 a 6 ore, mentre la fase di raffreddamento va circa da 6 a 9 ore. Sono state quindi escluse sia le fasi di portata nulla, che le fasi di eccessiva pendolazione dei parametri.

Dalla Figura 5 si può notare come le temperature misurate all'interno dell'elemento siano in discreto accordo tra loro, presentino un andamento regolare e simile tra loro, con i punti di flesso contemporanei.

Altro parametro fondamentale per una corretta interpretazione dei dati sperimentali e delle successive simulazioni è la temperatura dell'olio in ingresso alla sezione di prova.

Idealmente la temperatura d'ingresso dovrebbe rimanere costante tra l'inizio e la fine della prova, per questo motivo l'olio viene riscaldato in precedenza, purtroppo il sistema di termostatazione dell'olio non riesce a mantenere costante la temperatura che devia in maniera significativa soprattutto nella fase iniziale della prova stessa in cui la potenza da bilanciare è massima; tali oscillazioni (che raggiungono anche i 20 °C di ampiezza) si ripercuotono sulla temperatura di uscita dell'olio, ma anche sul riscaldamento dell'elemento visto che proprio nella fase iniziale si verificano i flussi termici verso e dal calcestruzzo più alti.

Per le successive prove di simulazione la temperatura dell'olio all'ingresso verrà assunta costante e uguale alla media delle temperature dell'olio all'ingresso rilevate sperimentalmente, da questa assunzione deriva evidentemente una deviazione nella simulazione soprattutto nella sua fase iniziale.

4.2 Analisi dei flussi termici scambiati

Come illustrato in precedenza, il modello si basa su un bilancio energetico tra i flussi termici entranti e uscenti dal sistema cementizio, il codice cioè si porta a convergenza calcolando i flussi e successivamente calcola le varie temperature.

L'analisi dei 3 flussi termici è particolarmente interessante per comprendere la "storia termica" del sistema e per questo motivo si riportano due esempi: uno in riscaldamento e uno in raffreddamento (modulo Cestaro, prova 14-07-2016). Gli andamenti per le altre prove e per il secondo modulo differiscono solo per i valori puntuali e non sono riportati per brevità.

4.2.1 Fase di riscaldamento

Durante la fase di riscaldamento dell'elemento di accumulo, l'andamento dei flussi è facilmente intuibile, il flusso termico effettivamente accumulato dal calcestruzzo parte da un valore molto elevato, intorno a 2200 W, e progressivamente diminuisce fino quasi ad annullarsi. In questa fase il flusso ceduto dall'olio corrisponde pressappoco a quello del calcestruzzo, meno quello assorbito dall'isolante e quello ceduto all'ambiente. Il flusso termico disperso verso l'ambiente, in tutta la prova, è sostanzialmente costante, intorno a 200 W. Tali valori confermano le ipotesi iniziali, con una modesta potenza termica dispersa all'ambiente, grazie all'elevato spessore dell'isolante, ma non trascurabile, in particolare nelle fasi conclusive della prova, in cui i 4 flussi assumono valori dello stesso ordine di grandezza.

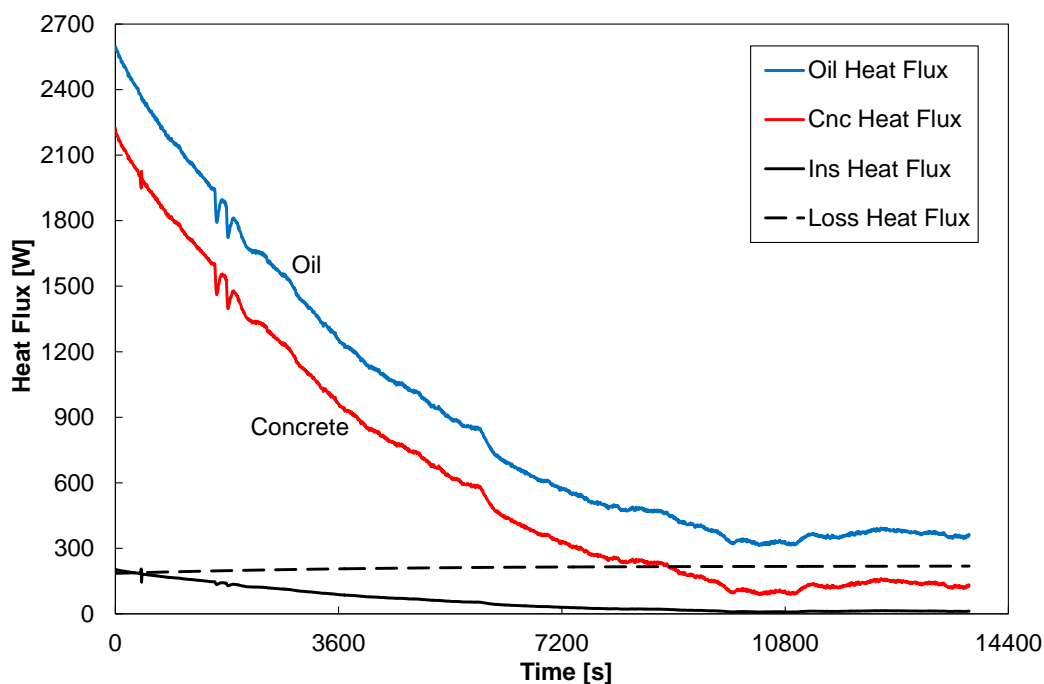


Figura 6 Flussi termici in riscaldamento (Cestaro, 13-07-2016).

L'analisi dell'andamento dei rispettivi flussi termici è particolarmente importante per decidere la durata "economica" della prova, ponendo, ad esempio, un limite inferiore al flusso termico assunto dal calcestruzzo. Nel grafico (Figura 6) tutti i flussi appaiono con segno positivo, indicando che i flussi assumono e mantengono la direzione prevista dallo schema di bilancio energetico di partenza.

Il codice di calcolo è in grado di calcolare anche l'integrale dell'energia accumulata dall'elemento di calcestruzzo, il grafico (Figura 7) presenta un tipico andamento asintotico in cui il valore finale stabilizzato si mantiene poco oltre 8 MJ, anche questo grafico risulta fondamentale per capire il livello di carica termica dell'elemento e per capire quale sia la configurazione di scambio termico più efficace nel suo complesso e la sua durata nel tempo.

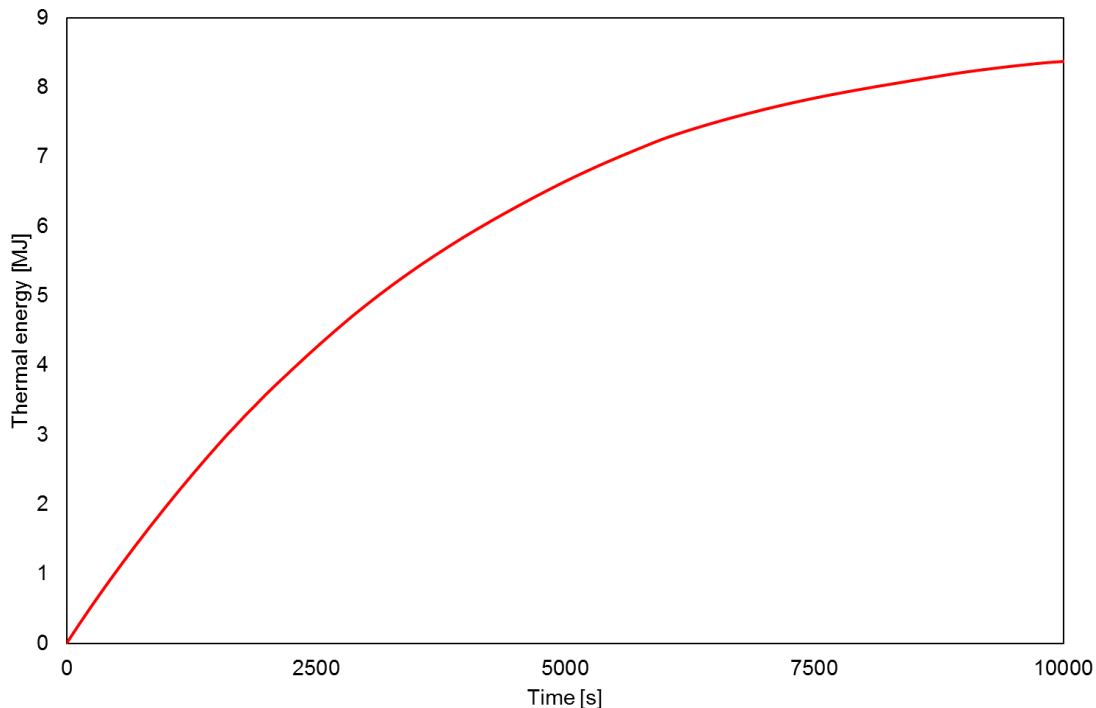


Figura 7 Energia accumulata in riscaldamento (Cestaro, 13-07-2016).

A questo fine, si è pensato a un parametro che costituisca una sorta di efficienza termica del processo, un parametro definito come il rapporto tra l'energia realmente scambiata dall'elemento di calcestruzzo rispetto all'energia massima idealmente scambiabile ipotizzando che l'elemento cementizio raggiunga la temperatura d'ingresso dell'olio (con intervallo di tempo idealmente infinito):

$$\varepsilon = \frac{E_{cls, reale}}{E_{cls, max}} = \frac{m_{cls} \cdot c_{cls} |t_{cls, i} - t_{cls, f}|}{m_{cls} \cdot c_{cls} |t_{cls, i} - t_{olio, in}|} \tag{15}$$

dove:

$t_{cls, i}$ = temperatura iniziale del calcestruzzo

$t_{cls, f}$ = temperatura finale del calcestruzzo

Si noti che l'energia del calcestruzzo calcolata come differenza tra l'energia interna tra inizio e fine è praticamente coincidente con l'energia del calcestruzzo calcolata come integrale dell'energia nei time-step, a ulteriore conferma della correttezza della procedura.

Nello specifico caso in esame, l'efficienza del processo assume il valore percentuale di $\varepsilon = 86,5\%$, valore correttamente inferiore all'unità e molto vicino all'asintoto. Se ne deduce che il valore ottenuto costituisce praticamente il valore massimo in corrispondenza ai valori di input della specifica prova.

I valori di efficienza ottenuti nelle altre prove di riscaldamento sono in linea con questi valori e non vengono riportati in quanto non aggiungono informazioni utili alla trattazione.

Il codice di calcolo si presenta "open-source" e l'utente finale può decidere quali parametri visualizzare e come presentarli (video, file, grafico ecc.).

4.2.2 Fase di raffreddamento

L'analisi della fase di raffreddamento (Figura 8) è meno intuitivo della precedente, ma anche più interessante. Il flusso termico ceduto dal calcestruzzo decresce progressivamente raggiungendo il valore asintotico; il flusso dissipato si stabilizza intorno ad un valore di 200 W, similmente al riscaldamento; ma il dato interessante è che il flusso ceduto all'olio decresce, si annulla intorno a 8000 s per poi diventare negativo (un flusso termico negativo indica un flusso inverso rispetto alla direzione dello schema presentato in Figura 4).

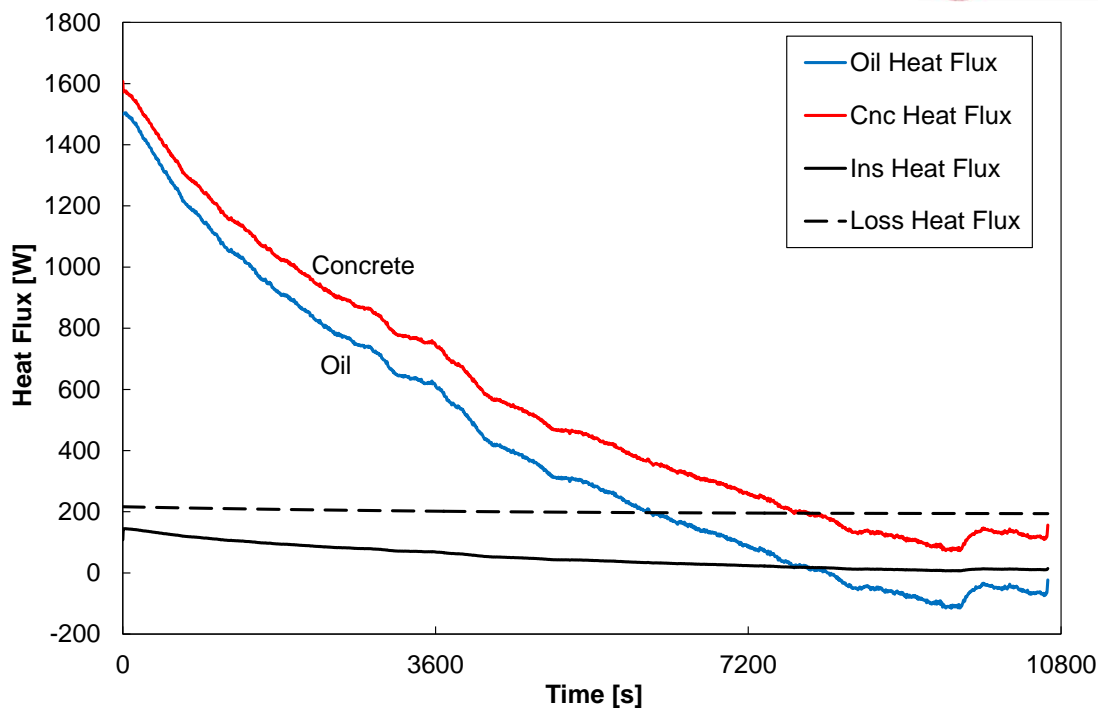


Figura 8 Flussi termici in raffreddamento (Cestaro, 13-07-2016).

La spiegazione del fenomeno risiede nella combinazione dei flussi termici, con effetti diversi rispetto al riscaldamento: l'olio si riscalda con flusso termico in diminuzione, quando il flusso ceduto dall'elemento eguaglia la potenza dispersa, l'olio non può più ricevere calore e, successivamente, inizia addirittura a raffreddarsi, cedendo calore verso l'ambiente. Non deve infatti confondere l'andamento del flusso termico del calcestruzzo, il fine del processo è scaldare l'olio e non certo raffreddare il calcestruzzo; risulta quindi evidente che dopo il raggiungimento del flusso assunto dall'olio nullo, il processo non ha più senso pratico e porta ad una perdita di entalpia della portata di olio.

Nello stesso modo va interpretato il grafico dell'energia ceduta dal calcestruzzo (Figura 9) che, contrariamente al caso precedente, presenta un andamento meno prossimo all'asintoto perché il flusso termico non tende a zero come nel riscaldamento.

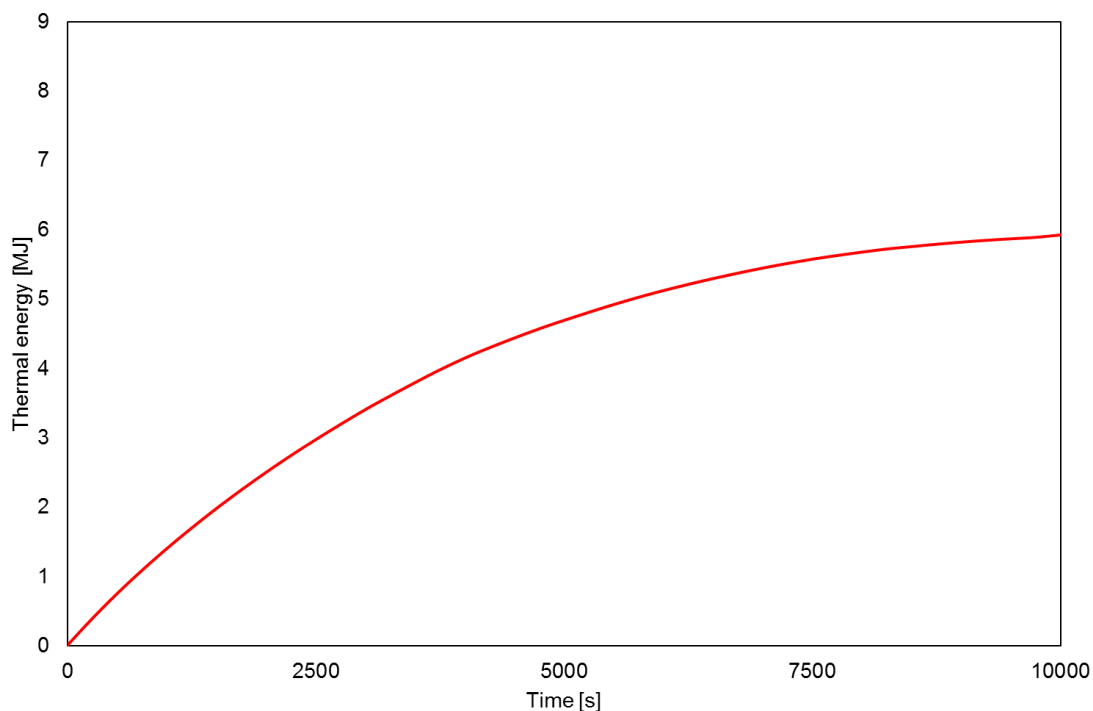


Figura 9 Energia rilasciata in raffreddamento (Cestaro, 13-07-2016).

Nel raffreddamento l'energia ceduta si porta circa a 6 MJ, circa 2 MJ meno del caso in riscaldamento. L'effetto però determinante resta il calore dissipato verso l'esterno: allungando cioè l'intervallo, aumenterebbe l'energia ceduta dal sistema di accumulo, ma l'energia assunta dall'olio non aumenterebbe (anzi avremo un effetto opposto).

Dal punto di vista pratico, infatti, l'energia utilmente cedibile si ferma intorno a 5,5 MJ, in corrispondenza al punto (8000 s) in cui si annulla il flusso termico ceduto all'olio, l'energia che segue viene ceduta all'ambiente e non al fluido termovettore.

Questo risultato costituisce un fattore assolutamente imprescindibile per una corretta valutazione sulla migliore procedura di sfruttamento del sistema di accumulo in fase operativa.

Per la prova in esame, l'efficienza del processo si porta a un valore percentuale finale pari a $\varepsilon = 101.3\%$, contrariamente al caso di riscaldamento, il valore assunto è addirittura superiore al valore unitario, valore apparentemente contrario ai principi della termodinamica; il motivo per questo "insolito" valore risiede appunto nella differenza fisica tra le due fasi di riscaldamento e raffreddamento e nel diverso ruolo della potenza termica ceduta verso l'ambiente esterno. In un caso, la dispersione verso l'ambiente si oppone al processo di accumulo di energia nel calcestruzzo, nel secondo caso, la potenza termica verso l'ambiente facilita la cessione di energia dal calcestruzzo (ma non verso l'olio).

4.3 Analisi delle temperature

Nei successivi due paragrafi si riportano i risultati del confronto del modello di simulazione con le prove sperimentali effettuate da Enea (schema riassuntivo in Tabella 3).

Nella legenda dei grafici che seguono vengono riportate 6 temperature, i primi 3 parametri sono valori sperimentali: le temperature puntuali dell'olio in ingresso e uscita e la temperatura di riferimento del calcestruzzo (calcolata come descritto in precedenza).

I successivi 3 parametri (contraddistinti dalla lettera "C") sono calcolati dal codice di simulazione: la temperatura dell'olio in ingresso è assunta costante, la temperatura dell'olio in uscita e la temperatura di riferimento dell'elemento cementizio (quest'ultima in rosso per una migliore visione).

Per una migliore lettura dei grafici è importante notare che la scala di temperatura non è costante: l'intervallo temporale è stato assunto uguale a quello sperimentale, l'intervallo delle temperature è ottimizzato per avere la massima espansione della scala, ne segue che le differenze tra le temperature del calcestruzzo sono dell'ordine di 1°C.

Il time-step è stato assunto pari a 5.56 s, per riprodurre con il codice di calcolo l'esatta scansione temporale delle prove sperimentali e per avere la perfetta sovrapposibilità dei valori numerici, dal punto di vista operativo un time-step di questo tipo è inutilmente breve per un processo che dura diverse ore, anche se ciò non porta a tempi di calcolo eccessivamente dilatati. In fase operativa si consiglia di utilizzare un time-step dell'ordine di almeno 10 s.

Tabella 3 Schema riassuntivo delle condizioni delle prove sperimentali.

| Elemento | Data | Fase | T _{cls,i} [°C] | T _{olio,in} [°C] | T _{amb} [°C] | m _{olio} [kg/h] | τ [s] | ε [%] | E _{cls} [MJ] |
|-------------|------------|--------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|-------|-------|-----------------------|
| Cestaro | 13/07/2016 | Risc. | 235.40 | 280.90 | 34.0 | 522 | 13760 | 86.5 | 8.8 |
| | | Raffr. | 270.80 | 250.65 | 34.0 | 511 | 10625 | 101.3 | 6.0 |
| Cestaro | 14/07/2016 | Risc. | 214.94 | 250.38 | 32.5 | 472 | 17330 | 83.2 | 6.8 |
| | | Raffr. | 242.64 | 219.56 | 32.5 | 472 | 8254 | 93.3 | 6.1 |
| Italcementi | 26/07/2016 | Risc. | 207.87 | 249.66 | 30.3 | 472 | 14237 | 84.3 | 6.5 |
| | | Raffr. | 242.15 | 220.95 | 31.4 | 472 | 7630 | 96.4 | 4.8 |
| Italcementi | 23/08/2016 | Risc. | 236.20 | 279.68 | 31.3 | 522 | 16391 | 84.5 | 7.0 |
| | | Raffr. | 272.21 | 249.68 | 32.4 | 522 | 6786 | 93.0 | 5.1 |

4.4 Analisi delle temperature con elemento Cestaro

Si presentano i risultati del codice di simulazione con riferimento alle temperature di olio e calcestruzzo per l'elemento di accumulo Cestaro, sono disponibili due prove eseguite da Enea: una il 13/07/2016 (Figura 10, Figura 12), la seconda il 14/07/2016 (Figura 11, Figura 13).

4.4.1 Fase di riscaldamento

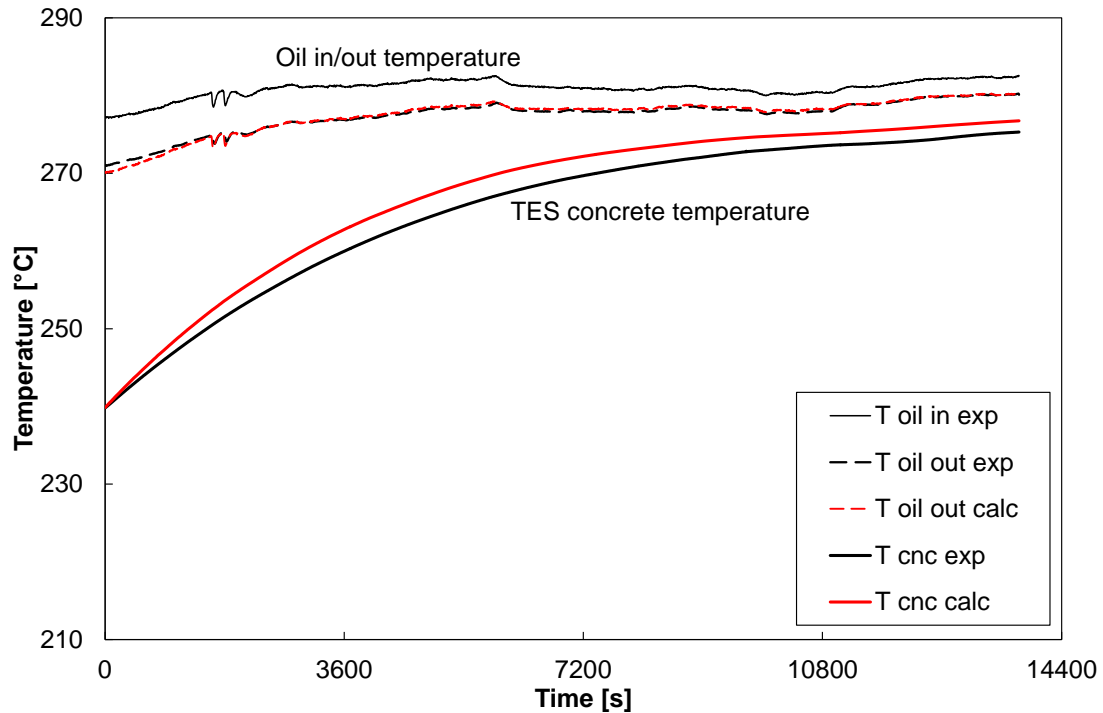


Figura 10 Temperature in riscaldamento (Cestaro, 13-07-2016).

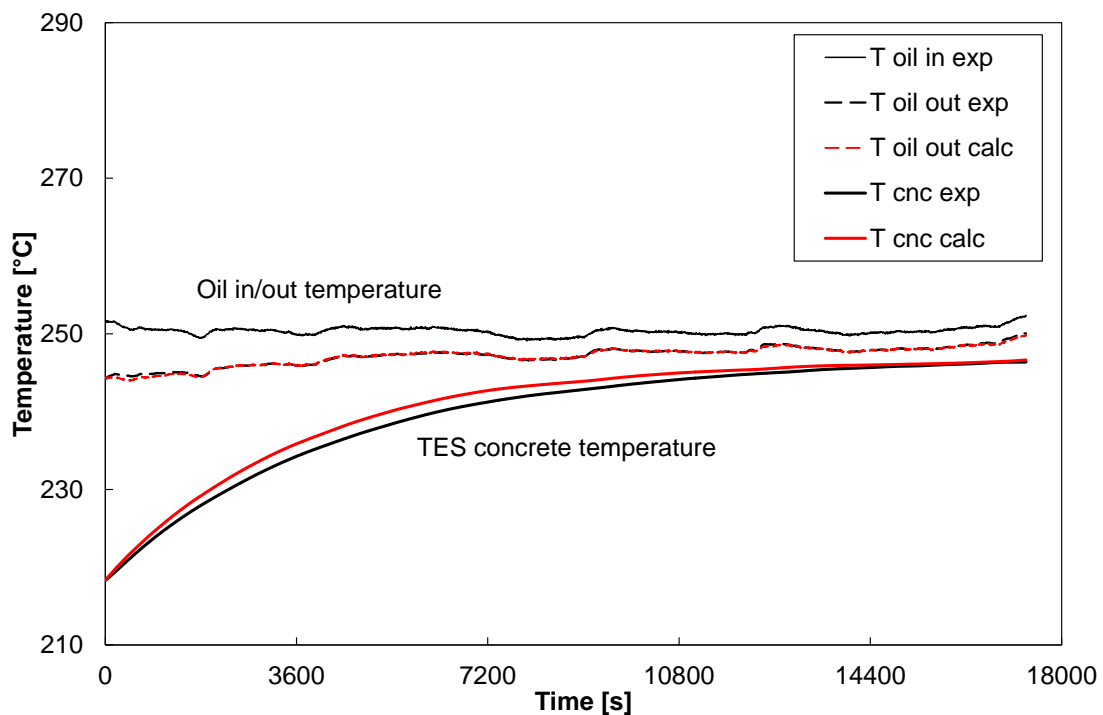


Figura 11 Temperature in riscaldamento (Cestaro, 14-07-2016).

4.4.2 Fase di raffreddamento

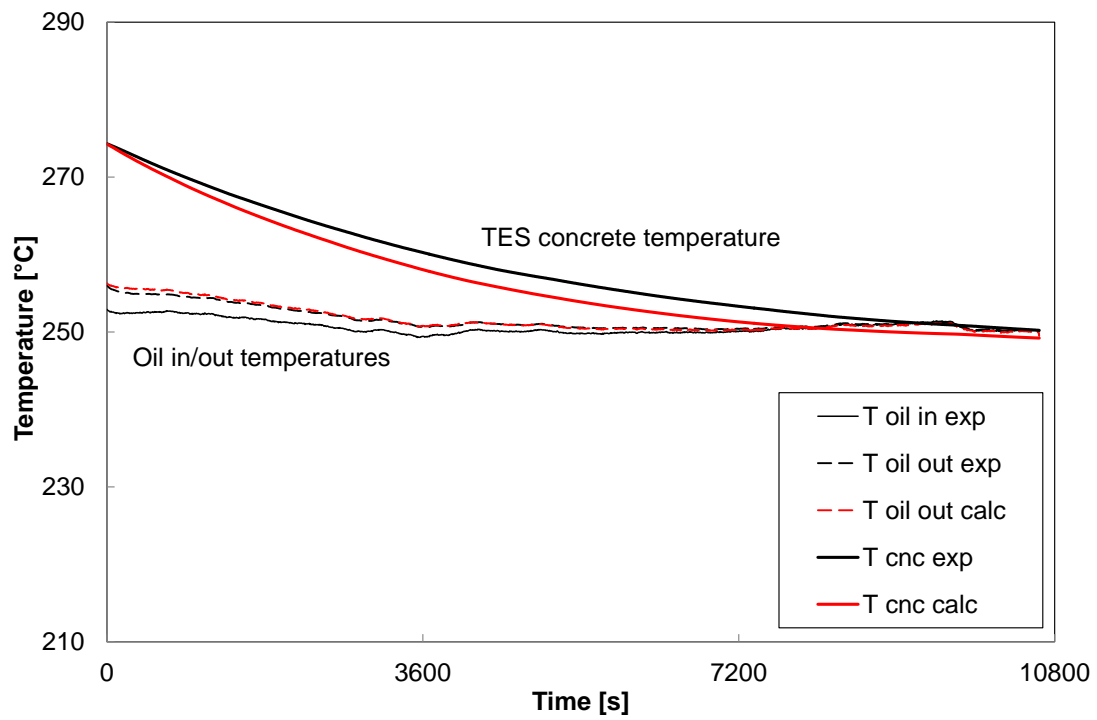


Figura 12 Temperature in raffreddamento (Cestaro, 13-07-2016).

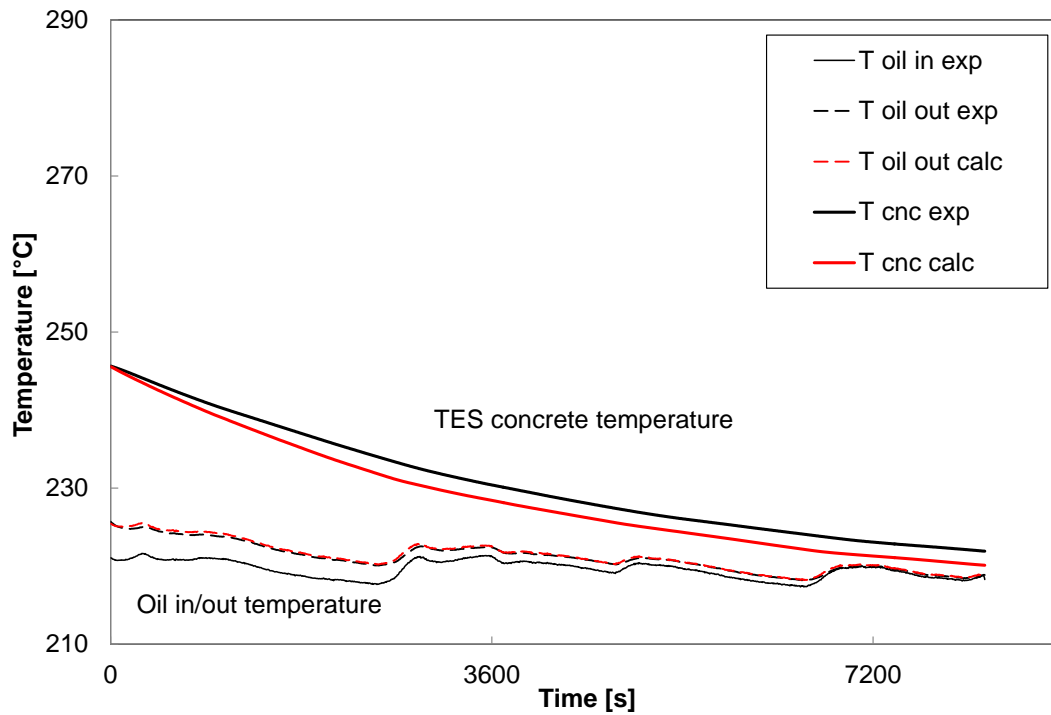


Figura 13 Temperature in raffreddamento (Cestaro, 14-07-2016).

4.5 Analisi delle temperature con elemento Italcementi

Per l'elemento di accumulo Italcementi, sono disponibili due prove eseguite da Enea: una il 26/07/2016 (Figura 14, Figura 16), la seconda il 23/08/2016 (Figura 15, Figura 17).

4.5.1 Fase di riscaldamento

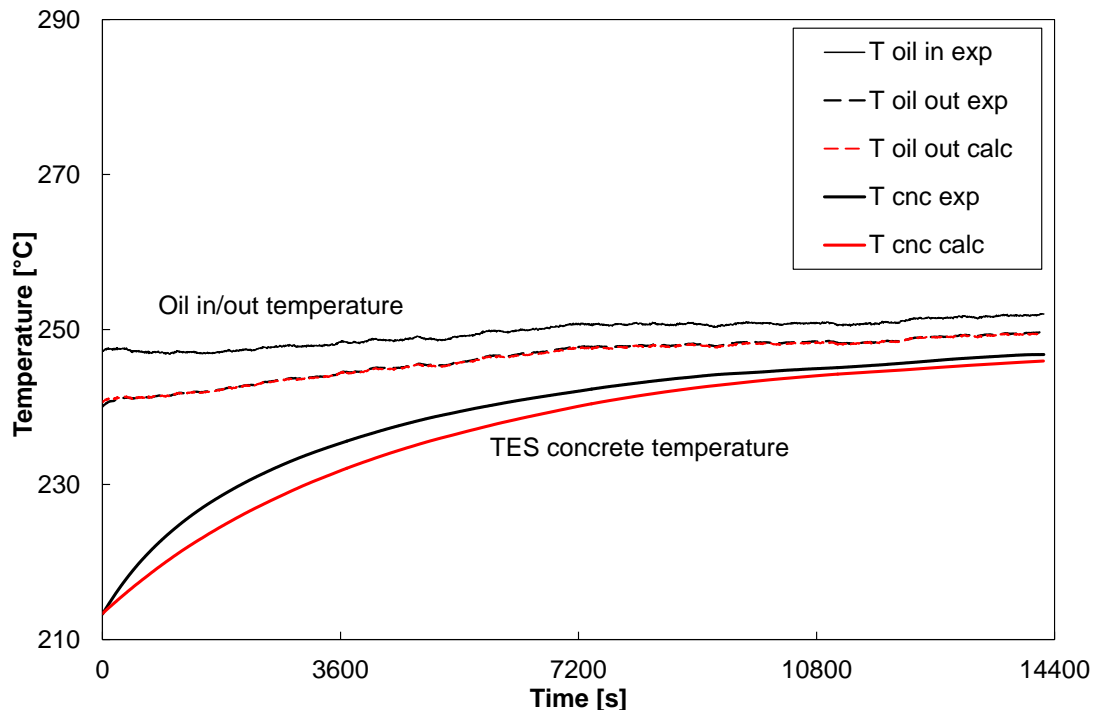


Figura 14 Temperature in riscaldamento (Italcementi, 26-07-2016).

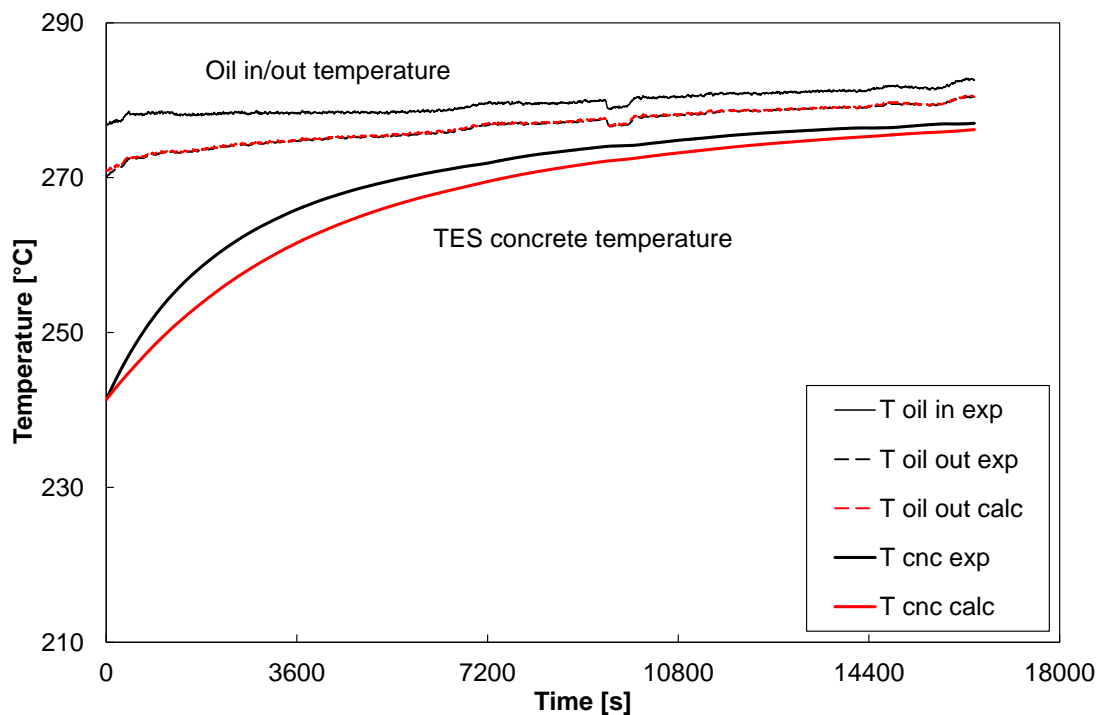


Figura 15 Temperature in riscaldamento (Italcementi, 23-08-2016).

4.5.2 Fase di raffreddamento

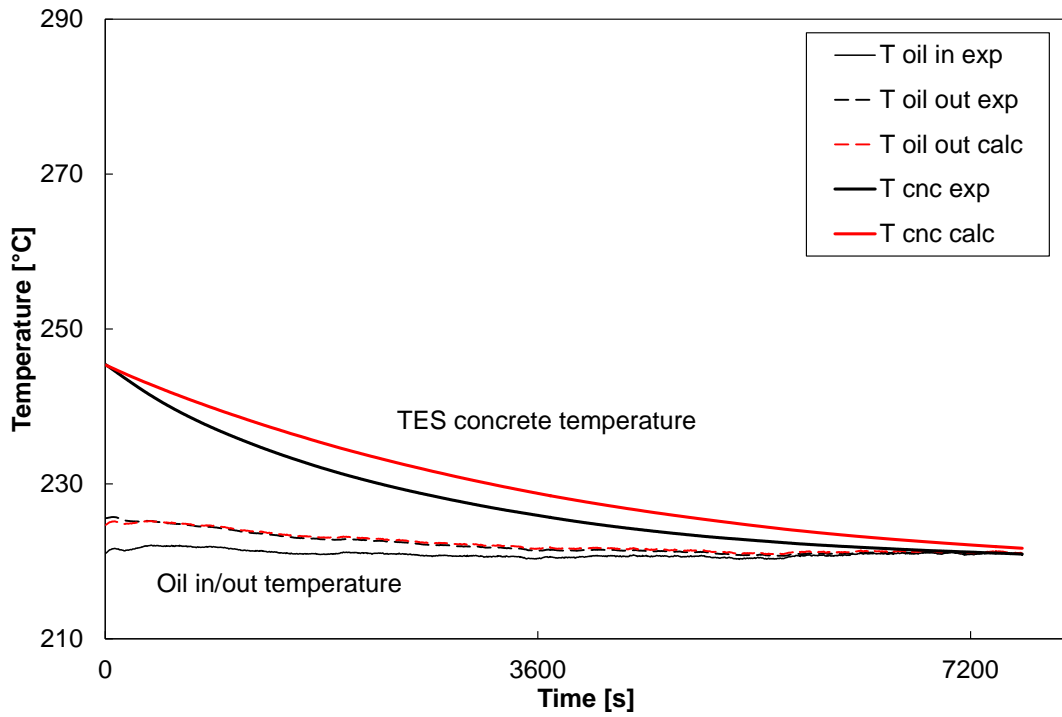


Figura 16 Temperature in raffreddamento (Italcementi, 26-07-2016).

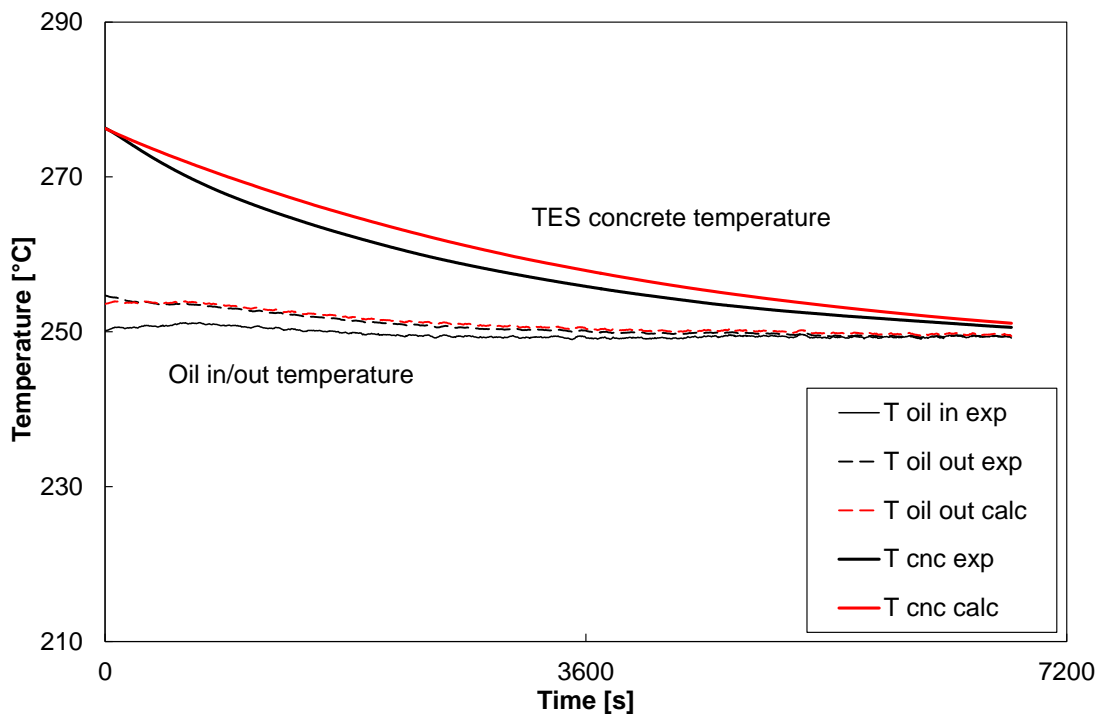


Figura 17 Temperature in raffreddamento (Italcementi, 23-08-2016).

4.6 Confronto sperimentale/calcolato

Per maggiore chiarezza espositiva si è scelto di presentare tutti i grafici (da Figura 10 a Figura 17) con i confronti tra rilievi sperimentali e risultati del codice di simulazione nei paragrafi precedenti e di commentare i risultati in modo aggregato.

4.6.1 Temperatura del calcestruzzo

Come si evince facilmente dai diagrammi, la capacità di riproduzione dei valori sperimentali della media delle temperature rilevate nel calcestruzzo da parte del codice di calcolo è ottima, sia nei due diversi elementi cementizi che nelle due distinte fasi di riscaldamento e raffreddamento.

Risulta ottimo non solo l'accordo numerico, ma anche e soprattutto il profilo, che si presenta, confermando le ipotesi, come un sistema del primo ordine senza flessi, questo aspetto è la conferma che, pur trattandosi di un sistema a resistenza interna non trascurabile, il processo è relativamente lento nel tempo, dando luogo a un profilo di temperatura di questo tipo.

La leggera variazione nella pendenza nel profilo all'inizio del processo è da addebitarsi principalmente all'oscillazione della temperatura dell'olio all'ingresso.

Le due mescole presentano caratteristiche piuttosto diverse soprattutto per quanto riguarda la densità e di conseguenza la massa, il che spiega la differenza di valore per le resistenze termiche di accumulo: l'elemento Cestaro presenta una densità e di conseguenza una massa superiore del 35% rispetto l'elemento Italcementi (si veda Tabella 1).

Come descritto in precedenti report, il sistema di accumulo cementizio contiene una non trascurabile quantità di acqua al suo interno, l'acqua liquida può essere ridotta con operazioni di degasaggio (vaporizzandola), ma non eliminata completamente.

Nella fase di riscaldamento il calcestruzzo vaporizza l'acqua che in fase vapore migra verso l'esterno, ma senza riuscire a venir espulsa (o espulsa solo in parte) a causa della presenza dell'isolante e della copertura in lamiera d'acciaio. Il cambiamento di fase e il doppio scambio di calore e massa alterano lo scambio termico, ma il tutto rientra nel calcolo della resistenza interna di accumulo.

Per tenere conto di quest'aspetto, è stato necessario introdurre anche un flusso termico di calore latente di vaporizzazione.

Come si vede dai diagrammi (Figura 12, Figura 16 e Figura 17), il codice riesce a riprodurre correttamente anche le situazioni di "incrocio delle temperature" in cui il calcestruzzo scende a temperature inferiori all'olio in ingresso.

4.6.2 Temperatura dell'olio

La temperatura di uscita dell'olio calcolata numericamente si sovrappone perfettamente a quella rilevata sperimentalmente. Ciò è possibile grazie al modo in cui vengono inseriti i dati di input. La temperatura dell'olio in ingresso al modulo nelle prove sperimentali, infatti, non si presenta costante, per cui i dati misurati sono stati direttamente inseriti nel codice per ogni time step, consentendo un ottimo accordo tra valori sperimentali e calcolati.

5 Adattamento alla nuova geometria

La seconda fase del presente lavoro ha riguardato l'adattamento del modello precedentemente sviluppato ad una nuova geometria. Il blocco di calcestruzzo su cui sono state condotte le simulazioni nella seconda parte dell'analisi mantiene la sezione quadrata, ma di 0,22x0,22 m, anziché 0,20x0,20 m della precedente sperimentazione.

Il tubo in acciaio attraverso cui scorre il fluido termovettore ha una configurazione a "Z", mentre nel caso precedente era a "C", come riportato nelle figure 18 e 19. In ogni caso, dal punto di vista dell'analisi termica, questa modifica non necessita di un adattamento del modello sviluppato.

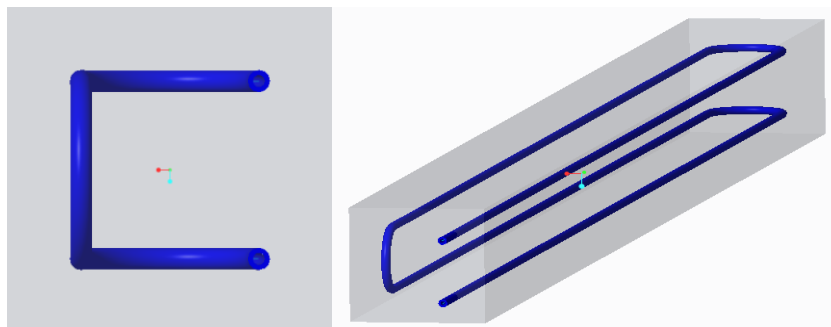


Figura 18 Scambiatore con configurazione a "C"

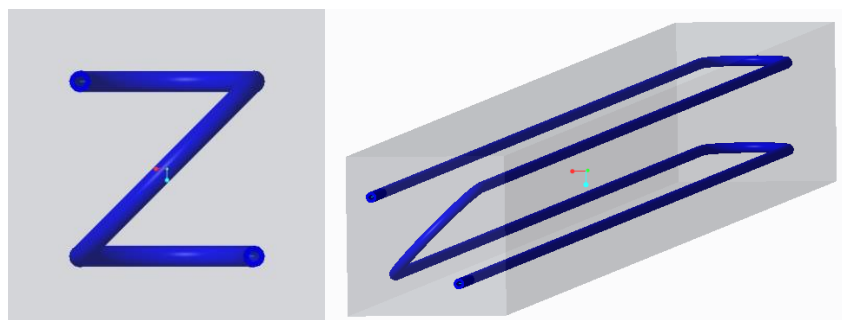


Figura 19 Scambiatore con configurazione a "Z"

L'interasse tra i tubi di acciaio, invece, è stato anch'esso aumentato a 0,22 m. Ciò implica uno spostamento del centro del tubo rispetto al centro del sotto-elemento di calcestruzzo, precedentemente utilizzato come base di calcolo. Il modello è stato quindi modificato in modo da tenere conto di questa modifica. Il tubo di acciaio è stato quindi considerato di nuovo al centro di un sotto-elemento quadrato di lato pari a 0,10 m, con la conseguente creazione di una zona di calcestruzzo, nella parte centrale, a forma di "croce" (Figura 20).

L'apporto energetico di questa porzione di elemento è stato opportunamente tenuto in considerazione, introducendo un ulteriore flusso termico, relativo a questa zona di elemento. Il flusso di calore totale del calcestruzzo è quindi dato dall'unione della potenza termica dei quattro sotto-elementi, più quella relativa alla zona centrale a "croce". In questo modo, il modello basato sulla simmetria dei quattro sotto-elementi continua ad essere rispettato ed integrato con la nuova geometria implementata.

Il bilancio dei flussi termici diventa quindi:

$$Q_{cls,sub} = Q_{olio} - Q_{iso} + Q_{diss} \pm Q_{cls,croce} \quad (16)$$

$$Q_{cls,tot} = Q_{cls,sub} + Q_{cls,croce} \quad (17)$$

Nell'equazione 16 si noti che in caso di riscaldamento è da porsi il segno negativo (-), mentre in raffreddamento il segno positivo (+).

L'isolante posto esternamente al blocco di calcestruzzo, per limitare le dispersioni di calore verso l'ambiente, è stato identificato come lana di roccia, con spessore pari a 0,40 m. Una rappresentazione è riportata in Figura 21. Lo spessore dell'isolante si presenta particolarmente elevato in questa configurazione. Quindi, per ottenere una migliore precisione dei risultati, si è deciso di suddividerlo, nel modello, in due porzioni di uguale spessore, pari a 0,20 m ciascuna. Questa soluzione permette di ottenere un profilo di temperatura più dettagliato anche nella zona dell'isolante e rendere il modello facilmente modificabile in futuro.

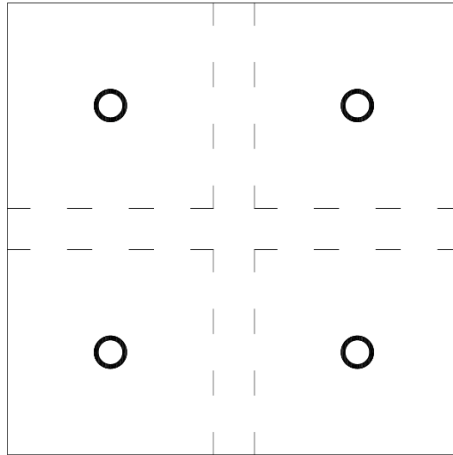


Figura 20 Sezione del blocco con la nuova geometria

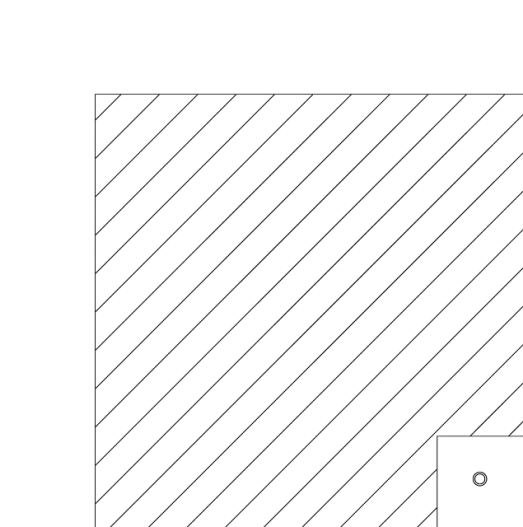


Figura 21 Sezione di un quarto dell'elemento di accumulo con la nuova geometria

In questa fase dello studio, è stata necessaria anche una modifica della miscela di calcestruzzo, sulla base dei dati disponibili. Le proprietà della nuova miscela, leggermente diverse da quelle utilizzate per validare il modello, sono riportate in Tabella 4. La validità del codice è comunque verificata, poiché è indipendente dal tipo di calcestruzzo utilizzato.

Tabella 4 Proprietà del calcestruzzo.

| Proprietà | Valore |
|------------------------------|--------|
| Calore specifico [J/kgK] | 730 |
| Densità [kg/m ³] | 2420 |
| Conducibilità termica [W/mK] | 2 |

6 Integrazione del PCM

Un ulteriore sviluppo del lavoro ha previsto l'introduzione nella mescola di calcestruzzo in una prefissata quantità di materiale a cambiamento di fase (Phase Change Material, PCM), pari al 5% o al 10%. Il PCM consente un aumento dell'energia accumulata, in fase di riscaldamento, e rilasciata, in fase di raffreddamento, grazie al calore latente che entra in gioco durante il cambiamento di fase. Questo materiale, infatti, fonde o solidifica nell'intervallo di temperatura a cui è sottoposto il modulo. È stato utilizzato il cosiddetto "sale solare", composto da una miscela di nitrato di sodio e potassio (40% di KNO_3 e 60% di NaNO_3), le cui proprietà termofisiche sono riportate in Tabella 5. Questo materiale è stato assorbito dalla diatomite, un'argilla fossile dalla consistenza polverosa. La diatomite è stata utilizzata come mezzo di supporto per via della sua elevata porosità (91%), che consente di impregnare una elevata quantità di PCM e gli permette anche di espandersi all'interno delle cavità, durante il cambiamento di fase. Le proprietà della diatomite sono indicate in Tabella 6.

Tabella 5 Proprietà del PCM.

| Proprietà | Valore |
|------------------------------|--------|
| Calore specifico [J/kgK] | 1500 |
| Densità [kg/m ³] | 2000 |
| Conducibilità termica [W/mK] | 0,5 |
| Calore latente [J/g] | 110000 |

Tabella 6 Proprietà della diatomite

| Proprietà | Valore |
|------------------------------|--------|
| Calore specifico [J/kgK] | 900 |
| Densità [kg/m ³] | 2000 |
| Conducibilità termica [W/mK] | 0,05 |

Il rapporto ottimale tra il PCM e la diatomite è stato individuato rispettivamente in 80/20% in peso. Per tenere conto di questa proporzione, tutte le proprietà sono state adeguatamente pesate, attraverso la seguente equazione:

$$f = 0.8f_{PCM} + 0.2f_{diatomite} \quad (18)$$

Dove f è la generica proprietà termofisica.

A causa dell'integrazione del PCM all'interno della diatomite, anche il calore latente è stato ridotto, pari a 88100 J/g, secondo quanto riportato nei report precedenti.

L'aggiunta del PCM direttamente all'interno della mescola di calcestruzzo, attraverso la diatomite, implica il dover considerare il modulo di accumulo come un unico elemento, costituito da materiale omogeneo. Per questo motivo, in modo analogo a quanto eseguito per PCM e diatomite, tutte le proprietà ottenute dalla Eq. (18) sono state a loro volta pesate con quelle del calcestruzzo (Tabella 4), in modo da ottenere un unico materiale con proprietà omogenee. L'equazione utilizzata presenta quindi la seguente forma:

$$f = p_{PCM} \cdot f_{PCM} + (1 - p_{PCM}) \cdot f_{cls} \quad (19)$$

Dove f è la proprietà generica e p_{PCM} è la percentuale di PCM integrata nella mescola di calcestruzzo, che può assumere valore pari a 0%, 5%, 10%.

Una precisazione ulteriore si rende necessaria per quanto riguarda il calore specifico: dal momento che non risulta possibile considerare il PCM in maniera separata dal calcestruzzo, per come è stato aggiunto nella mescola, il calore latente di fusione e solidificazione è stato integrato all'interno del calore specifico del PCM, in relazione alla temperatura, come di seguito:

$$c_{PCM} = \begin{cases} c_{PCM}, & T < T_{im} \\ c_{PCM} + \frac{r}{T_{fm} - T_{im}}, & T_{im} \leq T \leq T_{fm} \\ c_{PCM}, & T > T_{fm} \end{cases} \quad (20)$$

Dove T è la temperatura all'istante temporale considerato, T_{im} è la temperatura di inizio fusione del PCM, T_{fm} è la temperatura di fine fusione del PCM e r è il calore latente.

Questo implica un considerevole aumento del calore specifico del PCM all'interno del range di temperatura del cambiamento di fase, che consente di tenere in considerazione l'aumento di energia accumulata o rilasciata.

6.1 Risultati

In questa sezione si riportano i risultati ottenuti dalle simulazioni del modulo avente la nuova geometria e l'integrazione del PCM, in percentuale pari al 5% e 10%. Sono stati assunti i seguenti parametri di input al codice, per il riscaldamento:

- Temperatura iniziale del calcestruzzo = 50 °C
- Temperatura di ingresso dell'olio = 300 °C
- Portata di massa di olio = 500 kg/h
- Temperatura dell'ambiente esterno = 20 °C
- Durata della simulazione = 14400 s (4 ore)

In modo analogo, per il raffreddamento, si ha:

- Temperatura iniziale del calcestruzzo = 300 °C
- Temperatura di ingresso dell'olio = 50 °C
- Portata di massa di olio = 500 kg/h
- Temperatura dell'ambiente esterno = 20 °C
- Durata della simulazione = 14400 s (4 ore)

6.1.1 Energia termica scambiata

L'energia termica assorbita in fase di riscaldamento e ceduta in fase di raffreddamento è riportata rispettivamente nelle Figure 22 e 23. In entrambi i casi, si può notare come l'aggiunta di PCM alla miscela base di calcestruzzo implichi un aumento dell'energia scambiata, rappresentando quindi un interessante vantaggio. Si noti anche che le curve tendono ad essere quasi sovrapposte durante la fase iniziale della simulazione, per poi separarsi. Questo comportamento è dovuto al fatto che il blocco di calcestruzzo parte a temperature distanti dal range di cambiamento di fase del PCM, e quindi necessita di tempo prima di poter sfruttare il calore latente assorbito o ceduto. Dopo 4 ore di simulazione, inoltre, le curve di riscaldamento iniziano a portarsi ad una condizione di avvicinamento all'asintoto, mentre le curve di raffreddamento sono ancora in ascesa. Ciò avviene perché, in raffreddamento, il calore dissipato verso l'ambiente esterno assume un ruolo più rilevante, rispetto al caso del riscaldamento, quindi il sistema impiega più tempo per riuscire ad arrivare ad una condizione asintotica.

In ogni caso, la differenza di energia termica scambiata dalle tre mescole di calcestruzzo, pur essendo presente e ben visibile, non è relativamente elevata, questo è dovuto alla bassa percentuale di PCM integrato all'interno dell'elemento di accumulo. Quantità pari al 5% e al 10%, infatti, non sono sufficienti per poter apprezzare pienamente le potenzialità e i vantaggi che questa tecnologia permette. L'aumento della percentuale di PCM all'interno della miscela implica anche una riduzione delle proprietà meccaniche del materiale, fattore da tenere in adeguata considerazione nel caso in cui si stia progettando un elemento avente funzioni strutturali. In questa situazione, tuttavia, l'elemento ha il solo ruolo di dover sostenere il suo stesso peso proprio, per questo motivo, anche l'integrazione di un elevato quantitativo di PCM non risulterebbe particolarmente peggiorativo per le prestazioni meccaniche che deve svolgere il blocco, mentre migliorerebbe di molto i risultati dal punto di vista dell'accumulo termico.

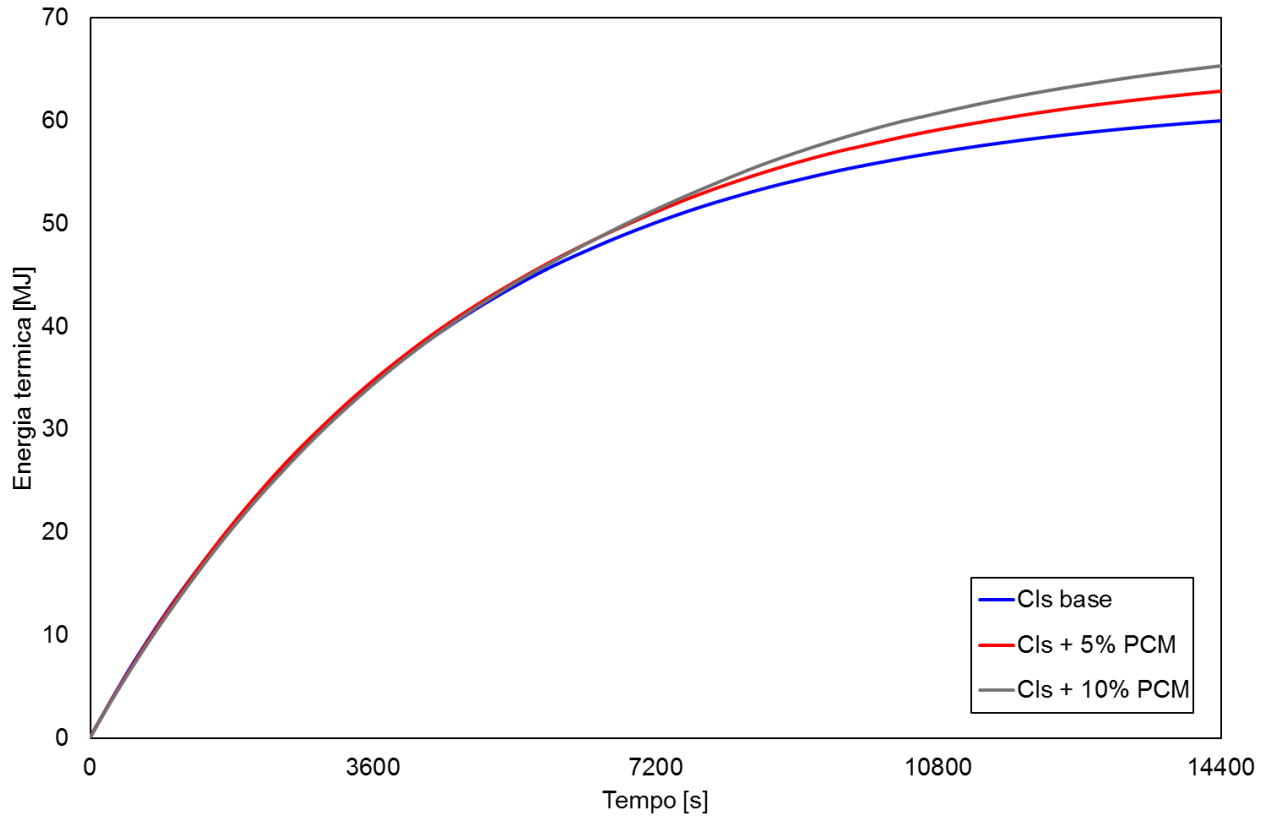


Figura 22 Energia accumulata in riscaldamento

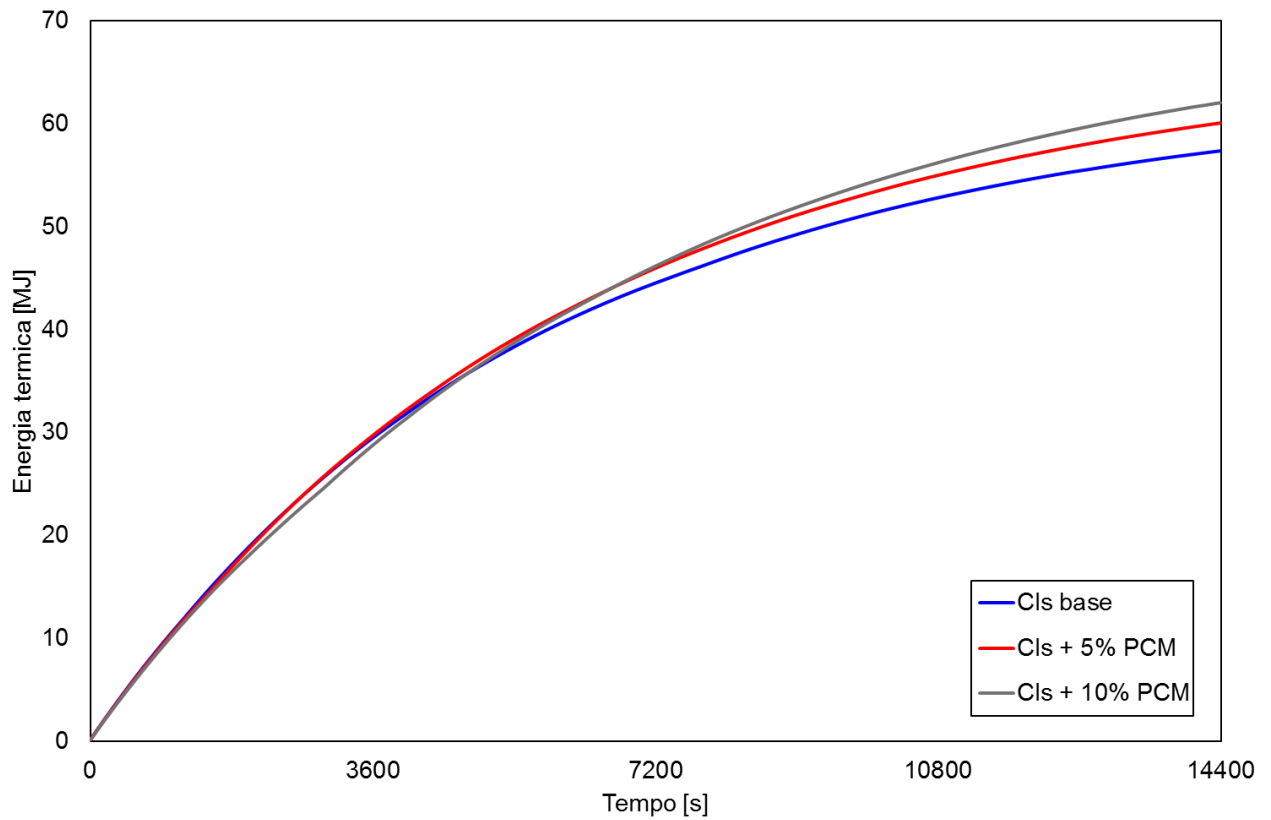


Figura 23 Energia ceduta in raffreddamento

6.1.2 Profili di temperatura

I profili di temperatura media del calcestruzzo e di uscita dell'olio sono riportati nelle Figure 24 e 25 rispettivamente per riscaldamento e raffreddamento. La temperatura media del calcestruzzo risulta influenzata dalla presenza del PCM. Nella curva corrispondente al contenuto pari al 10%, in particolare è anche visibile una discontinuità in corrispondenza del range di temperatura relativa al cambiamento di fase. La presenza di PCM riduce la pendenza delle curve di temperatura e questo rappresenta un ulteriore vantaggio, dal momento che implica minori probabilità di danneggiamento strutturale sulla matrice cementizia.

Ad ogni modo, le curve sono comunque molto vicine tra di loro, poiché la quantità di PCM integrato non è molto elevata, ciò influisce anche sulla temperatura di uscita dell'olio. In entrambi i casi, infatti, si può notare come sia poco influenzata dalla presenza del PCM nel calcestruzzo, ciò è dovuto al fatto che il PCM non influisce direttamente sull'olio, ma sulla temperatura del calcestruzzo, questa, a sua volta, si riflette sulla temperatura di uscita dell'olio. Dal momento che la percentuale di PCM presente è bassa, si ha un visibile effetto sulla temperatura del calcestruzzo, che integra il PCM, ma la differenza tra i tre profili di temperatura non è abbastanza elevata da far corrispondere una differenza significativa anche sulla temperatura di uscita dell'olio.

Si ricorda che l'olio entra nel blocco sempre alla stessa temperatura, mentre il calcestruzzo evolve in maniera continua, quindi una piccola differenza nel calcestruzzo non corrisponde ad una variazione nell'olio.

Come per l'energia scambiata, anche per i profili di temperatura è possibile notare che in riscaldamento le curve relative al calcestruzzo siano prossime all'asintoto, essendo molto vicine alle curve dell'olio. In raffreddamento, invece, il calcestruzzo non è ancora abbastanza vicino alla temperatura dell'olio da poter instaurare un profilo asintotico.

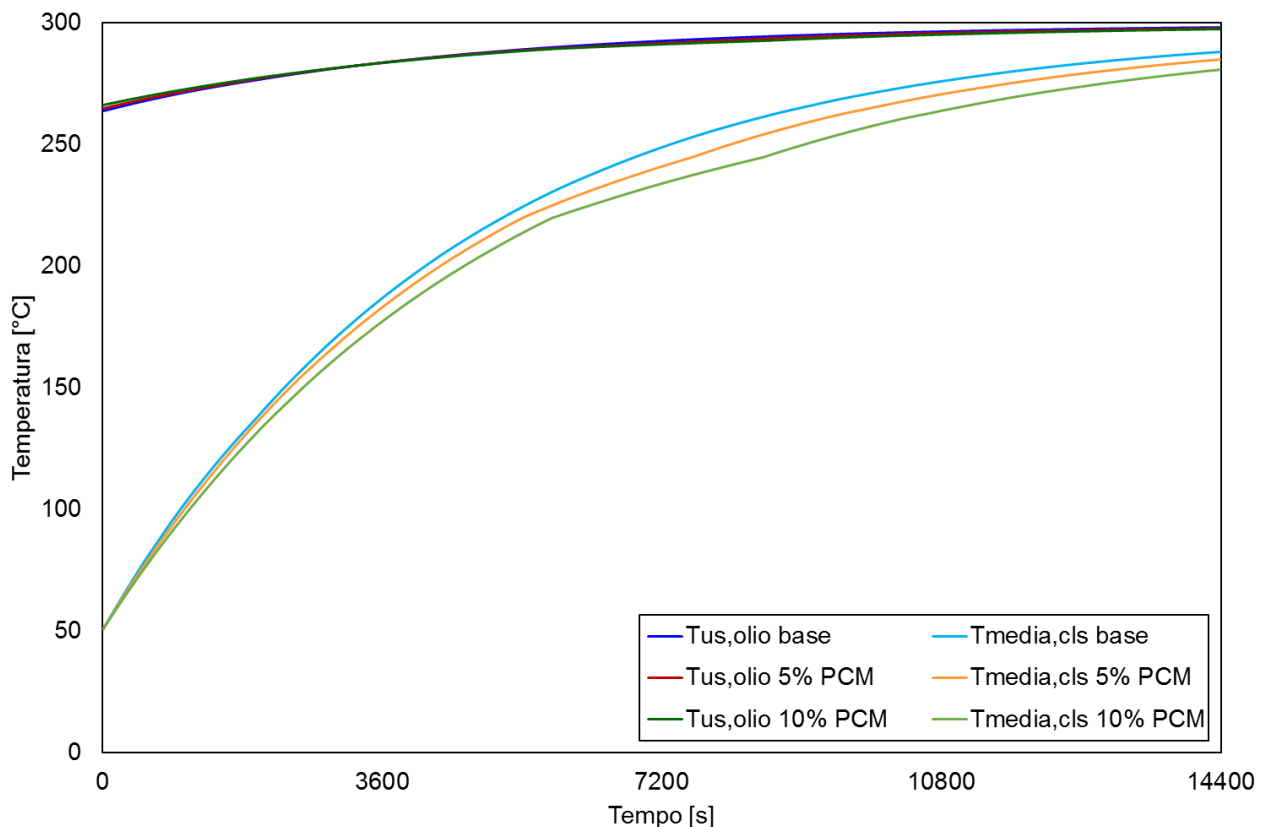


Figura 24 Temperatura di uscita dell'olio e del calcestruzzo in riscaldamento

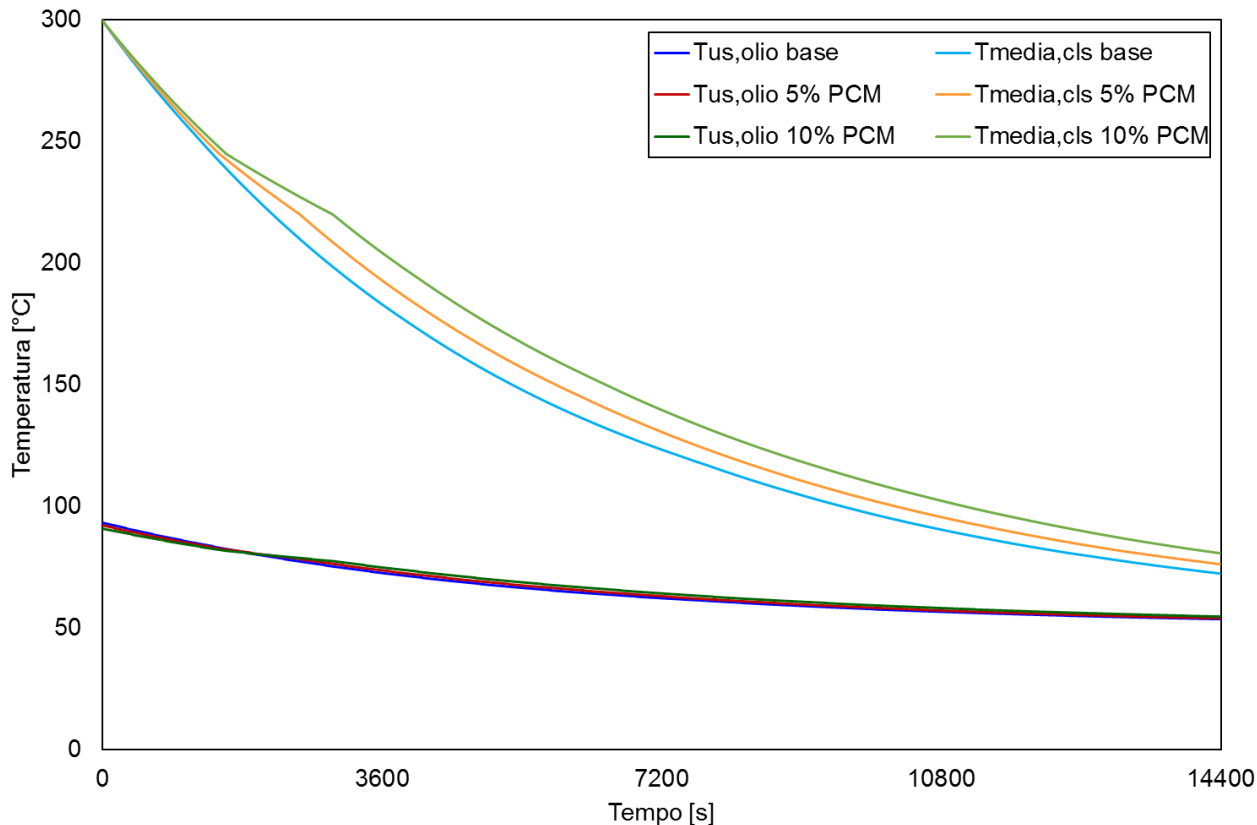


Figura 25 Temperatura di uscita dell’olio e del calcestruzzo in raffreddamento

6.1.3 Efficienza termica

È stata analizzata anche l’efficienza termica teorica delle diverse mescole, sottoposte alle medesime condizioni di analisi. I risultati sono stati riportati in Figura 26, in un grafico che combina i valori di energia scambiata con l’efficienza. Si può notare che, con l’aumentare della percentuale di PCM, cali il valore dell’efficienza. Questo fenomeno avviene sia in riscaldamento che in raffreddamento, ma in quest’ultimo risulta particolarmente evidente.

L’efficienza termica è definita come:

$$\varepsilon = \frac{E_{tot}}{E_{max}} \tag{21}$$

dove E_{tot} è l’energia totale effettivamente scambiata dal blocco di calcestruzzo e PCM, mentre E_{max} è l’energia massima scambiabile teoricamente in condizioni ideali (tempo e portata di massa infiniti, senza perdite di calore verso l’ambiente esterno). Il denominatore tiene conto della presenza del PCM e, con l’aumentare della sua quantità nel calcestruzzo, aumenta in modo significativo anche il valore di energia massima teorica.

È quindi corretto che l’efficienza termica, per la tipologia di simulazione implementata, si riduca con l’aumentare della percentuale del PCM: quando il blocco si trova ad elevate temperature, infatti, la quota del flusso termico scambiato che si disperde nell’ambiente esterno diventa elevata, dal momento che la potenza termica complessivamente scambiata è maggiore in presenza del PCM, anche la parte relativa al flusso termico dissipato è maggiore.

Questo fenomeno risulta particolarmente evidente in raffreddamento per due motivi: la simulazione inizia con il blocco ad una temperatura elevata, che non viene mai raggiunta invece in riscaldamento, per cui flusso dissipato verso l’ambiente è maggiore; con l’integrazione del PCM, inoltre, i profili di temperatura hanno pendenza minore, per cui i blocchi risultano più caldi con l’aumentare della percentuale addizionata, andando a incrementare ulteriormente le dissipazioni con l’esterno.

In ogni caso, sempre in Figura 26, è stata riportata anche l’energia scambiata. Come spiegato in precedenza, si può notare che questo parametro aumenti con una maggiore percentuale di PCM ed esso rappresenta la grandezza più interessante e su cui focalizzare la propria attenzione per un elemento il cui scopo è

accumulare energia termica. L'efficienza, quindi, risulta un altro utile parametro da analizzare per avere una più completa comprensione del fenomeno fisico che si sta verificando, ma non rappresenta l'unico valore su cui soffermarsi per verificare quale soluzione sia più conveniente da un punto di vista più generale e quindi anche economico.

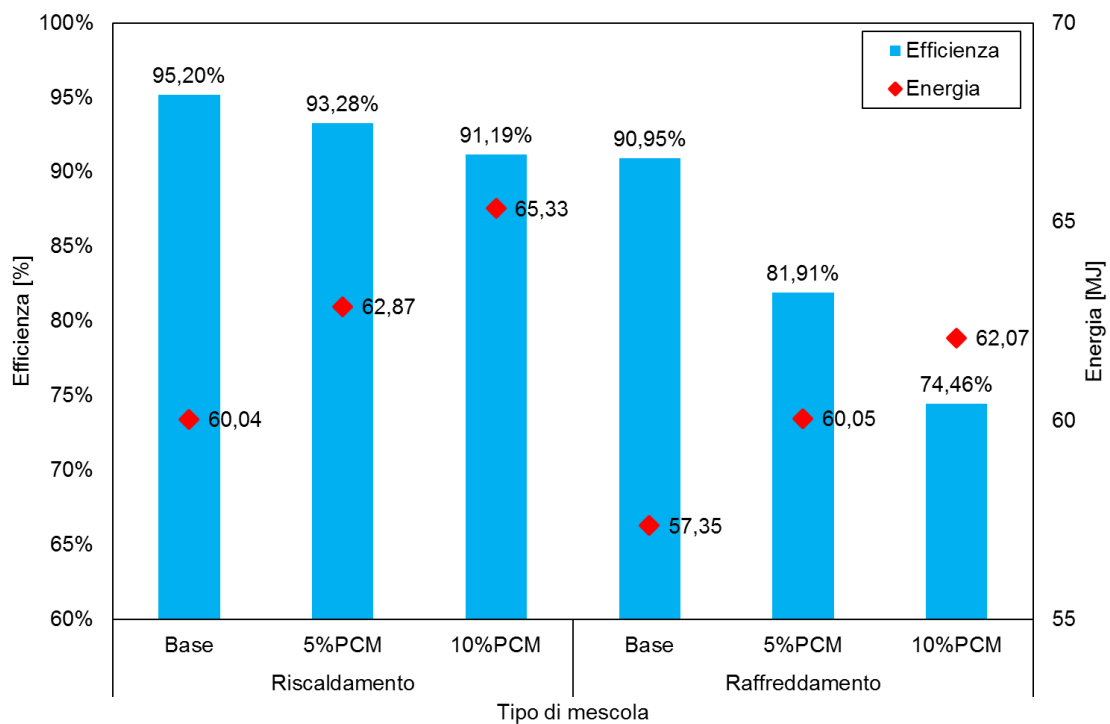


Figura 26 Energia ed efficienza in riscaldamento e raffreddamento

7 Disposizione dei moduli in serie e in parallelo

Gli studi e le analisi finora condotti hanno riguardato esclusivamente il singolo modulo di accumulo, studiandone le caratteristiche, le proprietà e le potenzialità. In un impianto reale per la produzione di energia elettrica, tuttavia, si renderà necessario l'utilizzo di molti blocchi di accumulo, da cui sorge una questione tutt'altro che banale: la disposizione relativa di questi elementi influisce sulle prestazioni complessive del sistema di accumulo, per cui si rende necessario un'analisi dedicata.

Le due configurazioni base sono costituite dalla disposizione in serie e da quella in parallelo. Quando più blocchi sono disposti in serie, la portata di massa di fluido termovettore coincide con quella totale immessa nel sistema di accumulo. Ogni blocco successivo, tuttavia, vedrà il fluido entrare in esso con una temperatura diversa da quella di ingresso nel primo blocco e sarà pari alla temperatura di uscita dell'elemento precedente ad esso. In questo modo ogni blocco presenterà diverse temperature istante per istante e accumulerà, in riscaldamento, una quantità di energia diversa rispetto agli altri elementi. Per quanto riguarda il raffreddamento, il comportamento sarà analogo, con diverse temperature in ingresso ai blocchi e quindi anche diverse quantità di energia termica ceduta al fluido termovettore. La difficoltà della simulazione della serie risiede nel definire, per ogni istante temporale, la temperatura di uscita di ogni elemento che costituisce, a sua volta, la temperatura di ingresso dell'elemento successivo. La disposizione in serie non può quindi essere simulata con una serie di elementi da studiare singolarmente, ma occorre studiare nel suo complesso l'intero sistema durante la sua evoluzione temporale, questo aspetto complica notevolmente la simulazione numerica. Ogni singolo blocco contribuisce in maniera diversa all'accumulo o al rilascio di energia, da considerare sempre ad ogni intervallo temporale. In un sistema con molti elementi disposti in serie, gli ultimi elementi si troveranno sempre a dover scambiare con l'olio posto ad una temperatura molto diversa da quella degli altri blocchi. In Figura 27 si può vedere una rappresentazione di soli due elementi generici disposti in serie.

In una disposizione in parallelo, invece, la portata di massa totale immessa viene divisa per il numero di elementi, che saranno quindi attraversati da una minore portata di fluido, ma questa entrerà in tutti i blocchi alla stessa temperatura. Tutti gli elementi in parallelo presenteranno uguali temperature, uguali comportamenti termici istante per istante e quindi, in riscaldamento, accumuleranno anche ciascuno la stessa quantità di energia. Analogamente, in raffreddamento cederanno tutti la stessa quantità di calore. In Figura 28 si può vedere una rappresentazione di due elementi generici disposti in parallelo. L'unico parametro operativo che fa la differenza è quindi la sola portata di massa.

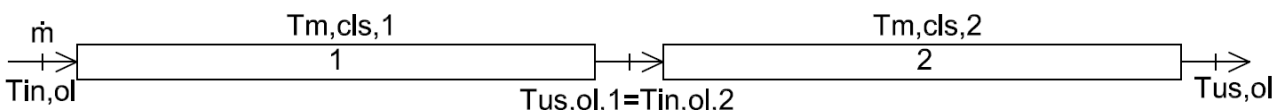


Figura 27 Disposizione in serie di due generici elementi



Figura 28 Disposizione in parallelo di due generici elementi

Per verificare il comportamento termico dei blocchi in fase di riscaldamento e raffreddamento è stata condotta una serie di simulazioni confrontando tre diverse configurazioni: il singolo modulo di accumulo, due moduli disposti in serie e due moduli disposti in parallelo.

Sono state imposte le stesse condizioni al contorno per tutte le diverse configurazioni e i risultati sono riportati nelle tabelle 7 ed 8, rispettivamente per riscaldamento e raffreddamento. Per ogni tipologia di

simulazione è stata innanzitutto riportata l'energia termica e l'efficienza relativa ad un singolo blocco, in modo da fungere da riferimento per le altre due disposizioni.

Quando due o più elementi sono disposti in serie o in parallelo, a parità di portata di massa totale di fluido termovettore, l'energia termica scambiata aumenta, ma questo aumento non è proporzionale al numero di elementi.

Come si può notare dalle tabelle 7 ed 8, se un secondo elemento viene disposto in serie al precedente, l'energia termica aumenta, ma quella scambiata nel secondo blocco è inferiore rispetto a quella nel primo blocco. Come riportato in precedenza, ciò è dovuto alla temperatura dell'olio in ingresso più bassa, coincidente con quella in uscita dal primo blocco. Se invece i due blocchi sono disposti in parallelo, aumenta anche in questo caso l'energia totale, che però risulta inferiore rispetto a quella relativa per la serie. Ogni blocco, infatti, scambia meno a causa della minore portata di massa di fluido che scorre all'interno di ognuno di essi, l'olio infatti subirà una variazione di temperatura tra ingresso e uscita decisamente maggiore.

Da questa analisi si evince come l'aggiunta di più elementi riduca l'efficienza complessiva del sistema. Il secondo blocco della serie infatti scambia meno del primo, a causa della temperatura inferiore dell'olio, mentre entrambi i due blocchi in parallelo accumulano o rilasciano meno energia a causa della dimezzata portata di massa. Tra le due tipologie di disposizione, per quanto i risultati siano simili tra di loro, si può notare come la serie presenti una maggiore quantità di energia scambiata, sia in raffreddamento che in riscaldamento, con una efficienza conseguentemente anch'essa maggiore, rispetto al caso del parallelo.

Tabella 7 Energia ed efficienza dei blocchi in riscaldamento

| | Energia 1° blocco | Energia 2° blocco | Energia totale | Efficienza |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|----------------|------------|
| Configurazione | [MJ] | [MJ] | [MJ] | [%] |
| Singolo blocco | 44.42 | - | 44.42 | 98.58 |
| 2 blocchi in serie | 44.42 | 43.99 | 88.41 | 98.11 |
| 2 blocchi in parallelo | 43.98 | 43.98 | 87.96 | 97.61 |

Tabella 8 Energia ed efficienza dei blocchi in raffreddamento

| | Energia 1° blocco | Energia 2° blocco | Energia totale | Efficienza |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|----------------|------------|
| Configurazione | [MJ] | [MJ] | [MJ] | [%] |
| Singolo blocco | 44.11 | - | 44.11 | 97.92 |
| 2 blocchi in serie | 44.11 | 43.49 | 87.60 | 97.20 |
| 2 blocchi in parallelo | 43.31 | 43.31 | 86.62 | 96.12 |

L'analisi degli elementi disposti in serie risulta particolarmente interessante, specialmente se comparata con un pari numero di elementi in parallelo. Questi ultimi, infatti, presentano tutti egualmente lo stesso comportamento termico, senza alcuna differenza.

Gli elementi in serie, soprattutto se numerosi, hanno andamenti termici molto diversi tra di loro. Per ogni istante temporale, infatti, si possono trovare i primi elementi del sistema che scambiano calore al massimo della potenzialità, mentre gli ultimi, vedendosi arrivare il fluido già privato della sua energia termica, possono accumulare o cedere molto meno.

È stata quindi condotta una ulteriore analisi, relativa ad un sistema composto da 40 elementi disposti in serie, per monitorare l'andamento del flusso termico scambiato, per ogni blocco, in diversi istanti temporali. I risultati sono riportati nei grafici delle figure 29 e 30, rispettivamente per il riscaldamento e per il raffreddamento. In entrambi i casi, è stato riportato il profilo del flusso termico scambiato dai singoli blocchi dopo un'ora di simulazione, un'ora e mezza, due ore, tre ore, quattro ore e cinque ore. Nei primi momenti della simulazione, il flusso termico è elevatissimo nei primi blocchi, ma cala repentinamente lungo la serie, diventando sostanzialmente nullo negli elementi successivi. In riscaldamento, con il passare del tempo, il picco di flusso termico si sposta verso gli elementi centrali del sistema. Ciò avviene perché i primi blocchi sono ormai carichi e vicini alla condizione asintotica, per cui l'olio si mantiene caldo all'uscita di essi, potendo scambiare calore con gli elementi successivi. Si può notare come il picco si sposti progressivamente lungo i moduli successivi della serie, nel corso delle ore. Il valore massimo di picco del flusso termico scambiato, comunque, diminuisce via via che si sposta verso i blocchi successivi. La causa di questo fenomeno risiede nel fatto che, per quanto i primi elementi siano vicini alla condizione asintotica, assorbono comunque una parte

del calore ceduto dall'olio. Gli ultimi blocchi si trovano quindi progressivamente sempre meno energia da poter assorbire dall'olio, per cui si riduce anche il picco di flusso termico scambiato.

A tal proposito, si noti come dopo 5 ore di funzionamento del sistema, i blocchi dal 30-esimo in poi siano sostanzialmente ancora scarichi. È quindi vero che un maggiore numero di elementi comporti una maggiore quantità di calore accumulato, ma non è detto, per le tempistiche dell'utilizzo in questione, che tutti poi siano effettivamente utili e contribuiscano in modo decisivo al sistema. Si ritiene quindi opportuno operare un'attenta pianificazione del numero di elementi da disporre nel sistema, per poter massimizzare i risultati e minimizzare costi e ingombri.

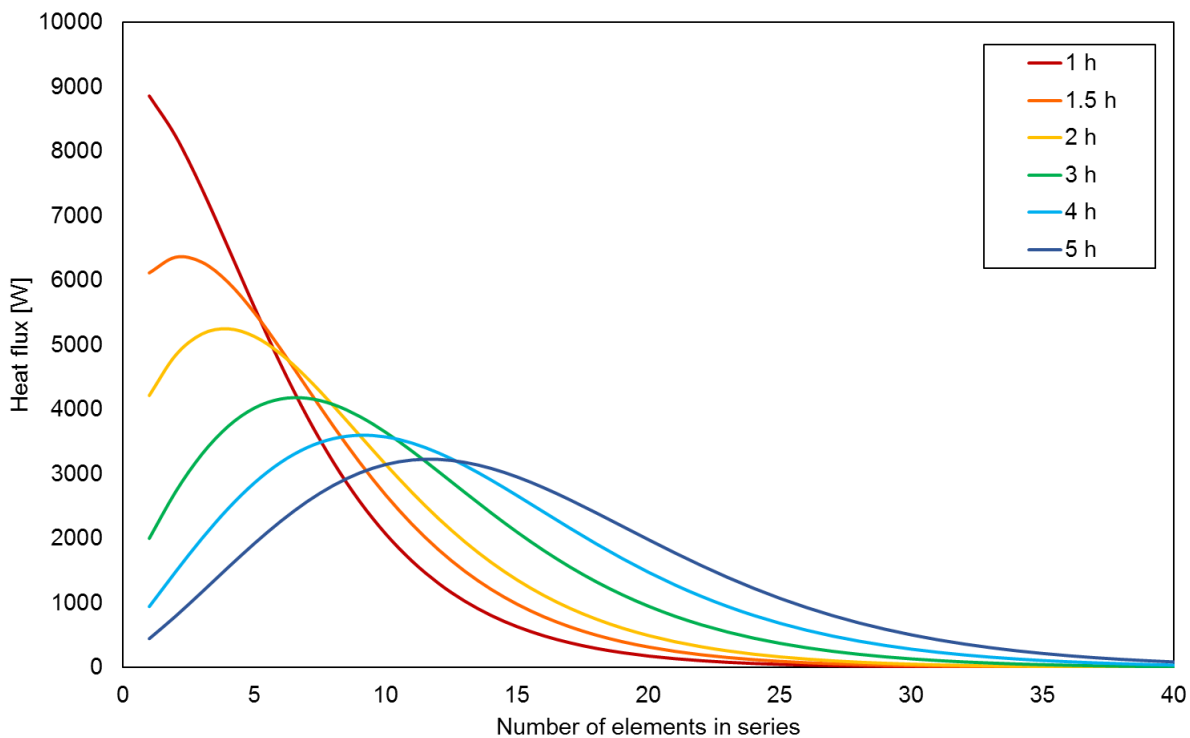


Figura 29 Flusso termico in riscaldamento per elementi in serie

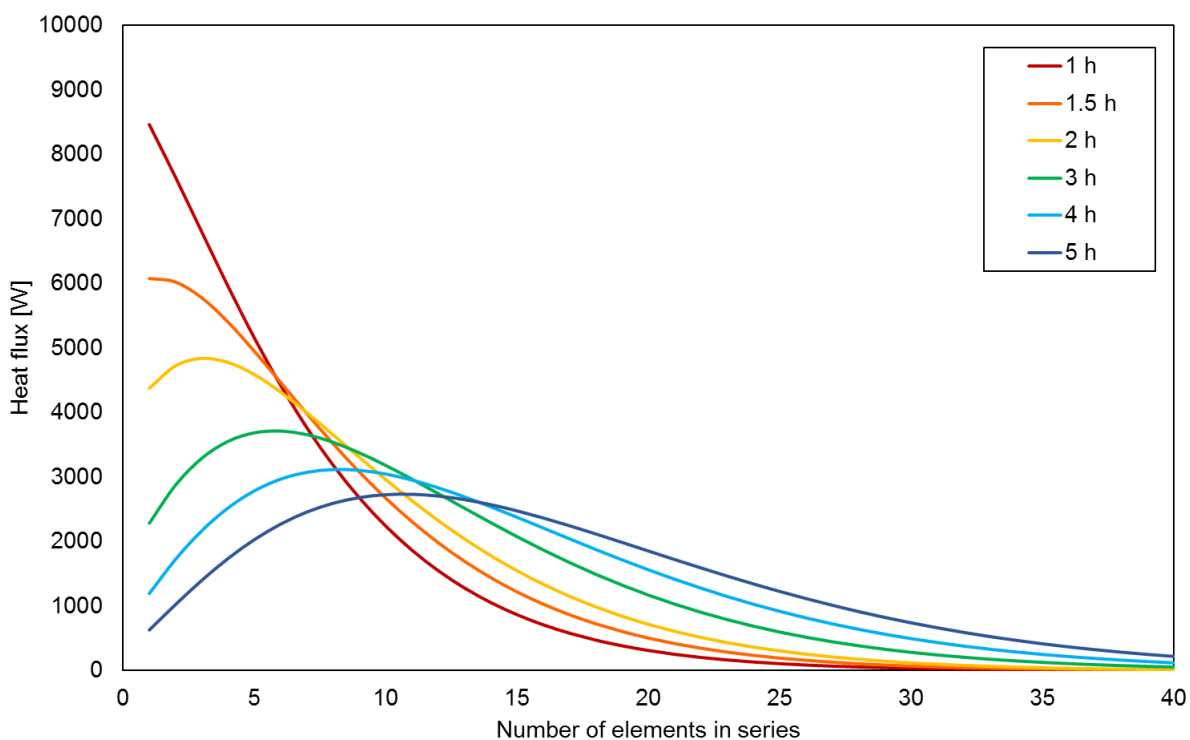


Figura 30 Flusso termico in raffreddamento per elementi in serie

8 Sviluppo del lavoro

Il codice di calcolo sviluppato risponde alle richieste e fornisce una stima dei parametri che riproduce fedelmente i dati sperimentali nel loro complesso.

Auspiciabili ulteriori sviluppi del codice possono essere i seguenti.

- Ulteriori migliorie e verifiche del codice sono attese su una base sperimentale più ampia, in particolar modo sulla differenza di temperatura tra olio e calcestruzzo che, nelle prove disponibili, risulta intorno a 50 °C massimi. Sarà interessante verificare il modello di calcolo con prove sperimentali complete, ad es. con calcestruzzo a temperatura ambiente e olio in ingresso a 280 °C.
- Si potrà introdurre nella miscela una percentuale di PCM maggiore, dal momento che il sistema di accumulo non ha ruoli strutturali. In questo modo si potranno apprezzare maggiormente i vantaggi legati all'aggiunta di un quantitativo maggiore di materiale, principalmente individuati nell'aumento dell'energia termica assorbita e ceduta.
- Un'analisi approfondita della disposizione di più elementi combinati insieme è certamente interessante, in particolar modo definendo i parametri operativi di contorno pratici quali la portata di massa di fluido, la potenza di pompaggio, la durata temporale del processo di carica/scarica, il volume del sistema di accumulo ecc.

9 Conclusioni

È stato sviluppato un codice di calcolo in linguaggio Fortran a parametri concentrati che permette di studiare il comportamento in opera di un singolo elemento di accumulo cementizio al variare delle condizioni al contorno; il codice di calcolo consente di stimare i flussi termici scambiati (tra olio, calcestruzzo e ambiente), le temperature di olio e calcestruzzo (definendo a una temperatura di riferimento iniziale del calcestruzzo) e l'energia accumulata o ceduta nelle fasi di riscaldamento e raffreddamento dell'olio. L'accordo del codice di simulazione con le prove sperimentali disponibili al momento della scrittura del presente report risulta molto buono, anche se occorre ampliare la base di riferimento sperimentale. I tempi di calcolo sono estremamente ridotti (qualche secondo), il codice arriva a convergenza in modo molto rapido e questo rende possibile l'uso del codice di calcolo anche per applicazioni "in linea".

Il codice validato è stato poi modificato sulla base di una nuova geometria e mescola del modulo di accumulo termico. Il codice consente di analizzare il modulo con l'integrazione, direttamente nella mescola, di una prefissata percentuale in peso di PCM, che consente di aumentare le prestazioni termiche dell'elemento.

È stata infine operata un'analisi di blocchi disposti in serie e in parallelo, per poter verificare le differenze tra queste due disposizioni. Un'attenzione particolare è stata dedicata alla serie, in quanto più delicata da analizzare e più interessante, da un punto di vista termico, l'analisi ha fornito risultati particolarmente utili.

10 Riferimenti bibliografici

1. G. Mazzucco, S. Michieletto, V. Salomoni, C. Majorana, Analisi numerica del comportamento termico della interazione tra PCM stabilizzato e calcestruzzo in meso-scala, Report RdS/PTR2020/186
2. G. Mazzucco, G. Xotta, V.A. Salomoni " Simulazioni numeriche su moduli ed elementi di accumulo in materiale cementizio ed adeguamento strutturale dei moduli", Rapporto ENEA RdS/PAR2015/107 (2016).
3. G. Comini, G. Cortella "Fondamenti di trasmissione del calore" SGEEditoriali, Padova, 2005.
4. F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine "Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Sixth Edition" John Wiley & Sons, 2007.
5. G. Mazzucco, G. Xotta, C.E. Majorana "Progettazione termomeccanica, realizzazione e caratterizzazione di un modulo di accumulo in materiale cementizio. Simulazione ed analisi dei dati sperimentali", Rapporto ENEA RdS/PAR2014/120 (2015).
6. <http://paracalc.paratherm.com/> e <http://www.paratherm.com/heat-transfer-fluids/paratherm-nf-heat-transfer-fluid/>.
7. Doretto L., Martelletto F., Mancin S., 2019. A simplified analytical approach for concrete sensible thermal energy storages simulation. Journal of Energy Storage, 22, 68-79. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.029>
8. Doretto L., Martelletto F., Mancin S., 2020. Numerical analyses of concrete thermal energy storage systems: effect of the modules' arrangement. J. Energy Reports, 6(7), 199-214. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.002>

11 Appendice: Curriculum Vitae Gruppo di Lavoro

11.1 Luca Doretti

Il dott. ing. Luca Doretti è nato e risiede a Padova.

Si laurea in Ingegneria Meccanica con indirizzo Impianti Energetici presso l'Università di Padova nel 1993.

Tra il 1994 ed il 1996 segue il corso di Dottorato di Ricerca in Energetica, con tesi discussa nel luglio 1997.

Dal 1/11/1996 è Ricercatore Universitario in Fisica Tecnica Industriale (SSD ING/IND10) presso il Dipartimento di Fisica Tecnica dell'Università di Padova successivamente diventato Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII), Ricercatore Confermato dal 1/11/1999.

Dal 1/10/2013 è Ricercatore Confermato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA).

Dal 1/11/2016 è Professore Associato (II Fascia) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA).

Dal 12/10/2020 è Professore Ordinario (I Fascia) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università di Padova.

Si occupa di ricerca sperimentale e teorica nell'ambito dello scambio termico intensificato con particolare attenzione a nuovi fluidi frigorigeni a basso impatto ambientale e alle applicazioni ad impianti di refrigerazione, pompe di calore, condizionamento ambientale e cicli ad assorbimento. Altro filone di ricerca sono i sistemi di accumulo termico con materiali a cambiamento di fase (PCM) sia per applicazioni edilizie che per il raffreddamento di elettronica ad alta potenza.

Risulta autore di circa cento pubblicazioni scientifiche nazionali ed internazionali sugli argomenti di studio.

Ha tenuto diversi corsi di Fisica Tecnica, Fisica Tecnica Ambientale e Tecniche di Controllo Ambientale per: Ingegneria Civile, Ingegneria per Ambiente e Territorio, Ingegneria Edile/Architettura e Ingegneria dell'Energia.

Attualmente tiene il corso di Fisica Tecnica per Ingegneria Civile (IC), di Fisica Tecnica Ambientale per Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio (IAT) e di Fisica Tecnica e Laboratorio di Energetica per il corso di Tecniche e Gestione dell'Edilizia e del Territorio (TeGET), inoltre tiene il corso di Tecniche di Controllo Ambientale per Ingegneria Civile (IC Laurea Magistrale).

11.2 Francesca Martelletto

La dott.ssa Francesca Martelletto è nata il 28/02/1995.

Ha conseguito la laurea triennale in ingegneria civile nel 2017 e la laurea magistrale in ingegneria civile, ad indirizzo strutture, nel 2019, entrambe presso l'Università degli studi di Padova. Dal 2019 segue il corso di Dottorato in Scienze dell'Ingegneria Civile, Ambientale e dell'Architettura, presso il medesimo ateneo.

Risulta autrice di 2 articoli su riviste scientifiche internazionali e 2 articoli pubblicati in atti di convegno internazionali.

Si occupa di ricerca in ambito di accumulo termico con materiali a cambiamento di fase (PCM) sia per applicazioni edilizie che industriali.

Dal 2018 svolge attività di supporto alla didattica come tutor per i corsi di Fisica Tecnica per Ingegneria Civile (IC) e di Fisica Tecnica Ambientale per Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio (IAT).