



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi numerica del comportamento termico di piccoli elementi di accumulo con calcestruzzi e SS-CPCM

A. Miliozzi, D. Nicolini

Report RdS/PTR2019/121

ANALISI NUMERICA DEL COMPORTAMENTO TERMICO DI PICCOLI ELEMENTI DI ACCUMULO CON CALCESTRUZZI E SS-CPCM.

A. Miliozzi, D. Nicolini (ENEA)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2019-21

Obiettivo: 1

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

Pacco di lavoro: 2 Accumulo termico

Linea di attività: LA1 Test su accumulo termico in materiali cementizi compatti e con diatomite e con aggiunta di materiale a cambiamento di fase (SS-PCM)

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Pacco di Lavoro: Raffaele Liberatore, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 I PROVINI.....	6
2.2 I MATERIALI.....	8
2.2.1 <i>Il calcestruzzo</i>	8
2.2.2 <i>Il tubo di scambio termico</i>	8
2.2.3 <i>Il coibente</i>	8
2.2.4 <i>L'aria insufflata</i>	9
2.3 I PUNTI TARGET.....	10
2.4 SIMULAZIONI NUMERICHE.....	11
2.4.1 <i>Il codice di calcolo</i>	11
2.4.2 <i>Caso 1D assialsimmetrico in regime statico</i>	12
2.4.2.1 Geometria e Materiali.....	12
2.4.2.2 Condizioni al contorno e di carico.....	13
2.4.2.3 La risoluzione.....	13
2.4.2.4 I risultati.....	15
2.4.3 <i>Caso 1D assialsimmetrico in regime transitorio ciclico</i>	21
2.4.3.1 Geometria e Materiali.....	21
2.4.3.2 Condizioni al contorno e di carico.....	21
2.4.3.3 La risoluzione.....	22
2.4.3.4 I risultati.....	22
2.4.4 <i>Caso 2D assialsimmetrico</i>	29
2.4.4.1 Geometria e Materiali.....	29
2.4.4.2 Condizioni al contorno e di carico.....	30
2.4.4.3 La risoluzione.....	31
2.4.4.4 I risultati.....	32
3 CONCLUSIONI.....	39
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	41
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	41

Sommario

Lo scopo del presente lavoro è l'analisi, attraverso una serie di valutazioni numeriche basate sul metodo degli elementi finiti (FEM), del comportamento termico di piccoli elementi di accumulo termico, oggetto di una precedente indagine sperimentale, formati da un tubo di scambio termico centrale in acciaio e da un guscio costituito da due tipologie di calcestruzzo, uno base (CLSB) e l'altro contenente una piccola quantità di materiali a cambiamento di fase compositi stabilizzati in forma (CLSP).

I modelli numerici messi a punto sono stati utilizzati per effettuare: i) analisi 1D assialsimmetriche in regime transitorio delle fasi di riscaldamento e di ciclaggio termico dei provini, finalizzate a valutare la conducibilità effettiva e la diffusività termica dei calcestruzzi; ii) analisi 2D assialsimmetriche complete in regime transitorio della fase di riscaldamento per un caso specifico, al fine di validare i modelli precedentemente utilizzati, e di avere utili indicazioni sulle condizioni al contorno nel caso reale.

I principali risultati numerici ottenuti sono stati messi a confronto con i corrispondenti valori sperimentali e possono essere riassunti come segue.

Il materiale CLSB mostra una conducibilità effettiva in prossimità del tubo di scambio sensibilmente inferiore al valore misurato a causa della presenza di una forte resistenza termica concentrata, come quella derivante dal contatto non perfetto tra tubo e calcestruzzo. Invece, il materiale CLSP mostra una conducibilità effettiva leggermente inferiore a quella misurata, senza evidenziare una ipotetica resistenza di contatto.

Per entrambi i materiali si è anche stimata la presenza di una capacità termica superiore al valore misurato. Attraverso un'analisi 2D più completa è stato poi possibile validare i risultati ottenuti con i modelli semplificati precedenti e analizzare in dettaglio le varie condizioni al contorno applicate.

In conclusione, i modelli FEM sviluppati sono in grado di simulare in modo appropriato il comportamento termico di provini in calcestruzzo utilizzati come sistema di accumulo termico. Naturalmente, la loro risposta è fortemente condizionata sia dalle proprietà del materiale, che devono essere ben misurate, sia dalle reali condizioni al contorno di scambio termico e di eventuale generazione di potenza, che devono essere correttamente valutate.

1 Introduzione

Nell'ambito della Linea LA1 del WP2/Progetto 1.2 del Piano Triennale di Realizzazione 2019-21, è stato studiato sperimentalmente il comportamento termico di piccoli elementi di accumulo termico formati da un tubo di scambio termico centrale in acciaio e da un guscio costituito da due tipologie di calcestruzzo: il calcestruzzo CLSP, contenente una limitata quantità di materiali a cambiamento di fase composti stabilizzati in forma (SS-CPCM), e il calcestruzzo CLSB senza aggiunta di SS-CPCM [1].

La miscela del calcestruzzo utilizzato era stata precedentemente sviluppata per applicazioni fino a 400°C, mentre l'SS-CPCM è stato realizzato includendo una piccola quantità di "sali solari" in un mezzo poroso, la diatomite. I provini, opportunamente coibentati per limitare le perdite termiche, sono stati riscaldati per effetto joule facendo passare una elevata corrente nello stesso tubo di scambio. Il raffreddamento è avvenuto insufflando aria compressa all'interno del tubo.

I principali risultati ottenuti dalle prove effettuate hanno evidenziato, come atteso, un buon incremento della capacità termica dei provini in calcestruzzo contenenti SS-CPCM, e un inaspettato incremento della diffusività e della conducibilità termica "apparenti". Tali caratteristiche sono rimaste inalterate anche dopo un numero significativo di cicli di carico/scarico (buona durabilità).

In questo lavoro, per meglio comprendere tale comportamento e riuscire a interpretarlo con maggiore accuratezza, sono state effettuate una serie di valutazioni numeriche, basate sul metodo degli elementi finiti (FEM).

In particolare sono state eseguite le seguenti attività:

- Analisi 1D in regime transitorio della fase di riscaldamento delle varie prove fino al raggiungimento della fase "quasi" stazionaria, al fine di stimare i valori di conducibilità effettiva dei calcestruzzi;
- Analisi 1D in regime transitorio della fase di ciclaggio termico dei provini, al fine di valutare il comportamento dinamico dei calcestruzzi, con particolare riferimento alla loro diffusività termica;
- Analisi 2D completa in regime transitorio della fase di riscaldamento per un caso specifico, al fine di validare i modelli precedentemente utilizzati e di avere utili indicazioni sulle condizioni al contorno del caso reale.

I risultati numerici ottenuti per le due tipologie di materiale, calcestruzzo con e senza SS-CPCM, sono stati messi a confronto con i corrispondenti valori sperimentali.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

La descrizione dettagliata delle prove di caratterizzazione di piccoli elementi di accumulo termico costituiti da un tubo di scambio termico centrale in acciaio e da un guscio in calcestruzzo, con o senza aggiunta di materiale a cambiamento di fase stabilizzato in forma, è fornita nella Deliverable 1.3, che insieme al presente lavoro, riporta i risultati di parte della Linea di Attività LA1/WP2/Progetto1.2.

Tuttavia, per maggiore chiarezza, di seguito si riporta in sintesi la descrizione dei materiali e dei metodi adottati nell'ambito del lavoro sperimentale cui si raccorda la presente analisi numerica.

2.1 I provini

I provini cilindrici con tubo di scambio immerso, realizzati e caratterizzati sperimentalmente nell'ambito della Linea di attività LA1, sono mostrati in **Figura 1**. La geometria dei provini è rappresentata in **Figura 2** e i parametri dimensionali sono riportati in **Tabella 1**.



Figura 1- Provini identificati, liberati dai casseri e pronti per la caratterizzazione.

Tabella 1 – Dimensioni dei provini cilindrici con tubo di scambio immerso.

Dimensioni		
Tubo AISI 316		
Lunghezza	700	mm
Diametro esterno	19.0	mm
Spessore	1.65	mm
Calcestruzzo		
Lunghezza	500	mm
Diametro esterno	100	mm
Diametro interno	19.0	mm
Coibentazione (Rockwool)		
Spessore	90	mm
Diametro esterno	280	mm
Lunghezza	550	mm
Spessore delle basi	25	mm

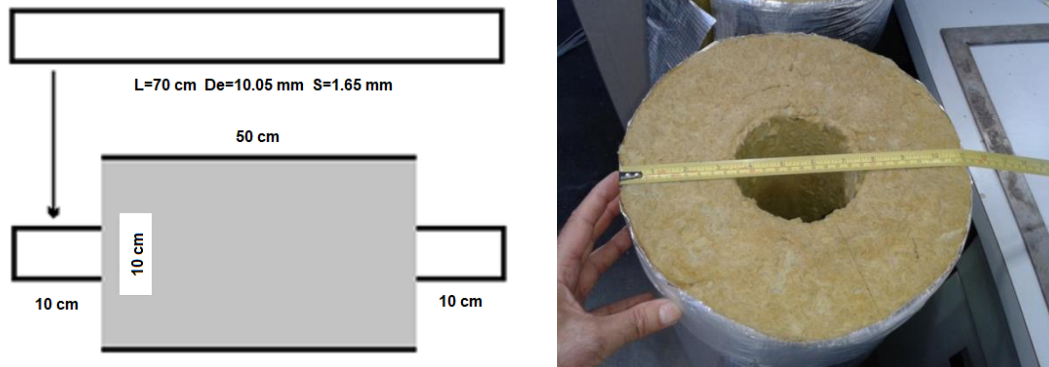


Figura 2- Schematizzazione della geometria dei provini in esame

Inizialmente i provini sono stati sottoposti a degassaggio, al fine di estrarre dagli stessi l'acqua libera presente. L'acqua libera, infatti, per effetto di sovrappressioni interne generate dalla vaporizzazione, può condurre al danneggiamento dei provini, se non addirittura a fenomeni di esplosione (spalling).

Successivamente i provini sono stati sottoposti a una caratterizzazione termica a differenti livelli di temperatura, utilizzando l'impianto sperimentale denominato **Solteca-Air**, dopo essere stati opportunamente coibentati. L'apparato sperimentale SoltecaAir è stato progettato nell'ambito del PAR2013 [2], ed è stato realizzato e messo a punto durante la presente fase sperimentale. Esso nasce come un'apparecchiatura per il ciclaggio termico di piccoli elementi di accumulo fino a 400°C.

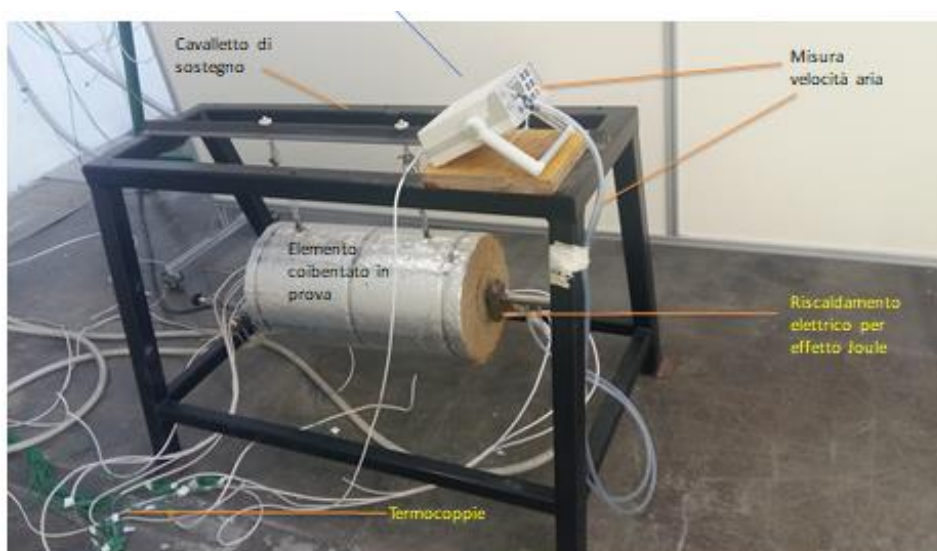


Figura 3- Apparecchiatura sperimentale Solteca-Air con installato un provino di calcestruzzo da 50 cm opportunamente coibentato e strumentato

2.2 I materiali

Il mezzo di accumulo termico utilizzato in queste prove di caratterizzazione è un calcestruzzo “base”, appositamente studiato per operare ad alta temperatura (fino a 400°C circa). Sono stati realizzati provini con il solo calcestruzzo base, e altri con l’aggiunta di una piccola quantità di PCM (circa il 5% in peso di sale solare) stabilizzato in forma tramite assorbimento in un mezzo poroso (diatomite).

2.2.1 Il calcestruzzo

La caratterizzazione sia termica che meccanica dei calcestruzzi in funzione del livello di trattamento termico subito è stata eseguita presso l’Università di Perugia e documentata in [3]. Qui di seguito (Tabella 2) vengono sintetizzati i risultati ottenuti in termini di valori medi per il calcestruzzo base e per il calcestruzzo con PCM/diatomite nell’intervallo di temperature 200-400°C.

Tabella 2 – Principali proprietà medie misurate tra 200 e 400 °C del calcestruzzo con o senza PCM.

Proprietà media	Calcestruzzo Base (CLSB)	Calcestruzzo con PCM/diatomite (CLSP)	Variazione
Densità (kg/m ³)	2398	2404	0.22%
Conducibilità (W/m/K)	1.77	1.82	2.64%
Calore specifico (J/kg/K)	607	683	12.62%
Calore latente effettivo (J/kg)	0	5800	--
Capacità volumetrica (J/m ³ /K)*10 ⁶	1.43	1.58	10.26%
Diffusività (m ² /s)*10 ⁻⁶	1.14	1.16	1.76%
Effusività ((J*s ^{0.5} /m ² /K)	1584	1691	6.77%

2.2.2 Il tubo di scambio termico

Il tubo di scambio termico dei provini è stato realizzato in acciaio AISI 316. Le sue principali proprietà, estratte dall’ASME Code Case N47 e valutate a una temperatura operativa di 300°C, sono riportate in Tabella 3.

Tabella 3 – Principali proprietà dell’acciaio AISI 316 (da ASME Code Case N47) a 300°C.

Proprietà	Valore
Densità (kg/m ³)	7782
Conducibilità (W/m/K)	18.2
Calore specifico (J/kg/K)	529.5

2.2.3 Il coibente

Per coibentare i provini sono state utilizzate coppelle o lastre di lana di roccia della Rockwool. Le proprietà del coibente sono riassunte in Tabella 4.

Tabella 4 – Principali proprietà del coibente Rockwool (lana di roccia)

Proprietà	Valore
Densità (kg/m ³)	80 (30-130)
Conducibilità termica a 20°C (W/m/K)	0.035–0.040
Calore specifico (J/kg/K)	1030

Ai fini di una corretta simulazione in temperatura occorre precisare che la conducibilità del coibente aumenta con essa, secondo la seguente relazione:

$$k_{coib} = 0.0000005 * T^2 + 0.00003 * T + 0.0374$$

In particolare, la conducibilità secondo questa formula vale: 0.038 W/m/K a 20°C, 0.045 W/m/K a 100°C, 0.063 W/m/K a 200°C, 0.091 W/m/K a 300°C e 0.129 W/m/K a 400°C.

2.2.4 L'aria insufflata

Durante la fase di raffreddamento viene insufflata nel condotto dell'aria compressa, le cui proprietà sono elencate in **Tabella 5**.

Tabella 5 – Principali proprietà dell'aria

Proprietà	Valore
Densità (kg/m ³)	1.225
Conducibilità termica @20°C (W/m/K)	0.026
Calore specifico (J/kg/K)	1030
Viscosità cinematica (m ² /s)	0.000015
Prandtl	0.7279327

Nella fase di raffreddamento, l'aria ha una velocità di circa 12 m/s mentre in tutte le altre è quasi statica (si muove leggermente solo per convezione naturale). Le conseguenti caratteristiche di flusso e scambio termico sono riassunte in **Tabella 6**.

Tabella 6 – Principali caratteristiche del flusso di aria

Proprietà	Riscaldamento	Raffreddamento
Velocità (m/s)	<1	12
Reynolds	1047	12560
Tipo di flusso	Laminare	Turbolento
Nusselt	5.35	39.77
Coeff. scambio termico (W/m ² /°C)	8.87	65.86

2.3 I punti target

Durante le prove sperimentali è stato acquisito l'andamento temporale delle temperature in diversi punti e sezioni del provino in calcestruzzo e del tubo in acciaio, utilizzando termocoppie di tipo K.

Tali misure, che costituiscono i valori di confronto con i risultati numerici, sono indicate con le seguenti sigle:

- A1, A2: temperatura dell'aria in ingresso e in uscita dal tubo di scambio;
- T1, T2: temperatura esterna del tubo in acciaio, in prossimità della zona di contatto acciaio-calcestruzzo;
- T3: temperatura al centro del provino, nella zona di contatto acciaio-calcestruzzo;
- S1, S3: temperatura sulla superficie esterna del calcestruzzo, a 2.5 cm dai bordi laterali;
- S2, S4: temperatura sulla superficie esterna del calcestruzzo, al centro del provino;
- C1, C3: temperatura nel calcestruzzo a 2.5 cm dai bordi e a circa 2 cm di profondità dalla superficie esterna;
- C2, C4: temperatura nel calcestruzzo al centro del provino e a circa 2 cm di profondità dalla superficie esterna.

Nella **Figura 4** sono indicati i punti di acquisizione delle temperature e in **Tabella 7** le corrispondenti coordinate.

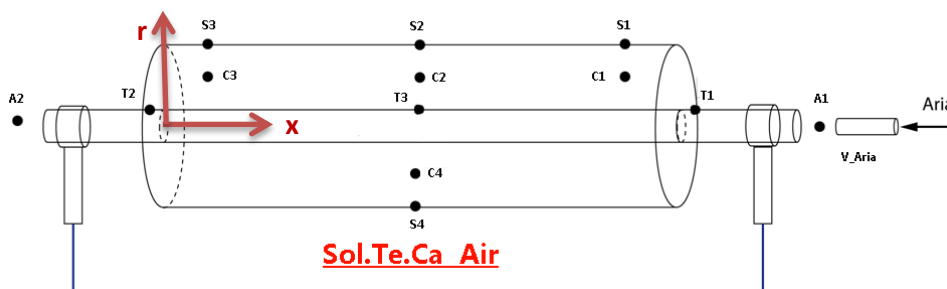


Figura 4- Disposizione dei punti di acquisizione delle temperature per SoltecaAir

Tabella 7 – Coordinate della posizione delle termocoppie dei provini in calcestruzzo con o senza PCM.

Posizione Termocoppie		
TC	x(cm)	r(cm)
S1	47.5	5
S2	25	5
S3	2.5	5
S4	25	-5
C1	47.5	3
C2	25	3
C3	2.5	3
C4	25	-3
T1	50	0.95
T2	0	0.95
T3	25	0.95

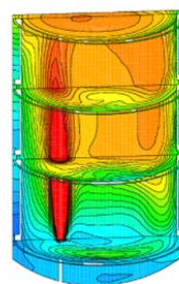
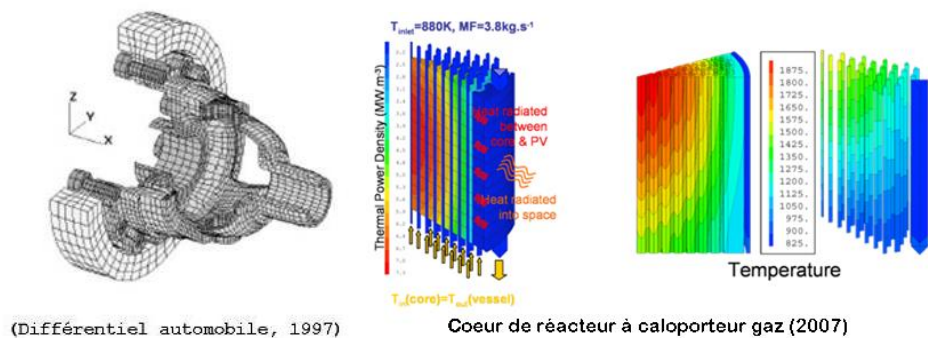
2.4 Simulazioni Numeriche

2.4.1 Il codice di calcolo

Per l'analisi FEM del presente studio è stato utilizzato un codice di calcolo denominato **CAST3M**. Questo è un codice di calcolo basato sul metodo degli elementi finiti, sviluppato presso il Dipartimento di Meccanica e Tecnologia (DMT) del Commissariato all'Energia Atomica di Francia (CEA) di Saclay (Parigi).

Lo sviluppo di CAST3M si inquadra all'interno di una attività di ricerca nel campo della meccanica e termomeccanica finalizzata ad implementare uno strumento modellistico di alto livello a supporto della progettazione, dimensionamento e analisi di strutture e componenti nel campo nucleare, così come in settori tradizionali dell'industria.

In accordo con ciò, CAST3M si presenta come un sistema completo, che integra non solo le funzioni di calcolo, ma anche le funzioni di costruzione del modello (pre-processore) e di trattamento dei risultati (post-processore). CAST3M è un programma potente e flessibile, ottimizzato per problemi di meccanica lineare elastica in statica e dinamica (vibrazioni, estrazione di autovalori), problemi di analisi termica e di trasferimento di calore, problemi non lineari (materiali elastici, plastici, viscosi), problemi di dinamica passo a passo, etc.



Convection naturelle dans une maquette d'enceinte (2005)

Figura 5- Esempi di visualizzazioni di calcoli eseguiti con Cast3M

2.4.2 Caso 1D assialsimmetrico in regime statico

Una prima serie di simulazioni numeriche del comportamento termico dei provini in calcestruzzo è finalizzata alla valutazione della conducibilità effettiva del calcestruzzo. A tal fine, viene presa in considerazione la fase del solo riscaldamento iniziale dei provini, con particolare riferimento al raggiungimento di uno stato “quasi stazionario”, nel quale la distribuzione delle temperature dipende esclusivamente dalla conducibilità del materiale e non da termini capacitivi.

2.4.2.1 Geometria e Materiali

Il problema geometrico è stato semplificato considerando esclusivamente la sezione centrale (di simmetria assiale, **Figura 6**) del provino, nella ipotesi che la sua lunghezza sia sufficiente a smorzare rapidamente gli effetti di bordo delle sezioni estreme.

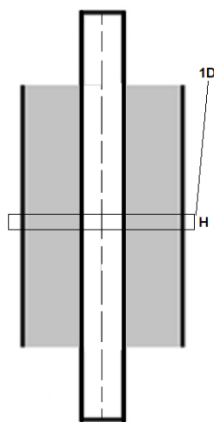


Figura 6- Schema geometrico configurazione 1D

La discretizzazione spaziale realizzata (**Figura 7**) è tipica di un caso assialsimmetrico 1D (evoluzione solo radiale). In giallo è visibile la zona corrispondente al coibente, e in verde quella relativa al calcestruzzo. Quest’ultima è, a sua volta, suddivisa in due zone, una interna e una esterna, per valutare eventuali differenze di resistenza termica del mezzo. I limiti di queste zone corrispondono alla parete a contatto con il tubo di scambio ($r=9.5\text{ mm}$), la parete a contatto con il coibente ($r=50\text{mm}$) e una sezione intermedia ($r=30\text{mm}$). Per tutte queste posizioni è disponibile una misura sperimentale di temperatura.

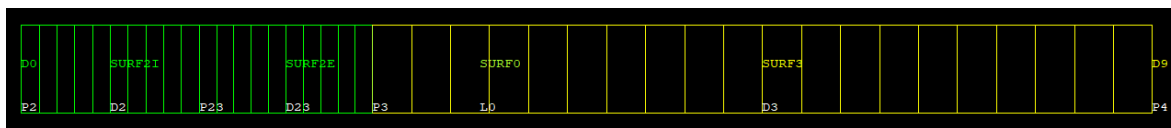


Figura 7- Discretizzazione spaziale calcestruzzo-coibente in configurazione 1D assialsimmetrica

La presenza del tubo di scambio è stata ignorata poiché si prende in considerazione soltanto il suo effetto, corrispondente a una temperatura imposta. Per la magliatura è stata considerata una altezza minima di circa 1 mm mentre tutte le altre dimensioni sono coincidenti a quelle riportate nei paragrafi precedenti. Anche le caratteristiche base dei materiali adottati sono quelle riportate in precedenza: la sola conducibilità termica delle due zone di calcestruzzo può essere successivamente variata per meglio approssimare i dati sperimentali, valutando resistenze termiche non previste. La sezione di calcestruzzo studiata ha un volume di circa $7.57\text{e-}6\text{ m}^3$ e una massa di $1.81\text{e-}2\text{ kg}$.

2.4.2.2 Condizioni al contorno e di carico

Nella presente analisi il carico termico coincide con il flusso corrispondente alla imposizione di una temperatura nota sulla parete esterna dell'acciaio. Tale temperatura, variabile nel tempo, eguaglia la misura sperimentale relativa alla termocoppia T3, che è anche la temperatura di controllo e regolazione dell'impianto Solteca-Air. Tale temperatura chiaramente è variabile nelle diverse prove ed è mostrata, per ciascun caso, in [Figura 8](#).

La parete esterna del coibente, invece, scambia calore con l'ambiente circostante per convezione con l'aria. Il coefficiente di scambio varia generalmente tra 5 e 10 W/m²/C, a seconda del grado di turbolenza dell'aria. Data la sua sostanziale invarianza rispetto alle dinamiche del prototipo si è scelto di adottare un valore costante pari a 5 W/m²/C (ambiente indisturbato). La temperatura ambiente è assunta costante e pari al valore registrato durante le prove, riportato in Tabella 8:

Tabella 8 – Temperatura ambiente durante le varie prove

Temperatura Ambiente			
Test	T(°C)	Test	T(°C)
B1T1	15.	BP1T1	27.
B1T2	17.	BP1T2	26.
B1T3	17.	BP1T3	30.
B1T4	17.	BP1T4	21.
<i>Nei nomi identificativi dei vari test si è indicato con B il calcestruzzo base e con BP quello con l'aggiunta di PCM</i>			

Ovviamente le superfici superiori e inferiori della magliatura sono termodinamicamente di simmetria e quindi adiabatiche. Il sistema è in uno stato iniziale a temperatura costante, pari a quella ambiente.

2.4.2.3 La risoluzione

Il problema termico impostato è stato risolto numericamente utilizzando la procedura PASAPAS con un solutore iterativo non-lineare utilizzando un passo temporale di 10 secondi, con salvataggio dei risultati ogni 30 secondi. La soluzione ottenuta è un campo termico variabile nello spazio (radialmente) e nel tempo. L'andamento radiale della temperatura all'istante finale di calcolo è supposto essere il profilo stazionario del sistema. Tale andamento termico radiale è stato confrontato con i dati sperimentali disponibili (vedi [Tabella 9](#)) per verificare la validità delle resistenze termiche (conducibilità) imposte al calcestruzzo.

Tabella 9 – Temperature dei punti di riferimento (T3, C2, S2) in regime stazionario di riscaldamento

Temperature Termocoppie Riferimento			
Test	T _{T3} (°C)	T _{C2} (°C)	T _{S2} (°C)
B1T1	200.0	188.9	186.2
B1T2	260.0	243.8	239.6
B1T3	359.6	329.5	322.2
B1T4	200.0	188.4	185.7
BP1T1	200.0	193.7	189.5
BP1T2	260.0	249.0	243.1
BP1T3	360.0	339.4	330.5
BP1T4	200.0	191.6	187.6
<i>Nei nomi identificativi dei vari test si è indicato con B il calcestruzzo base e con BP quello con l'aggiunta di PCM</i>			

Per ogni prova sperimentale sono effettuate due simulazioni: nella prima (calcolo A) si adottano i valori di conducibilità provenienti dalla caratterizzazione del materiale, mentre nella seconda (calcolo B) le conducibilità sono corrette per meglio approssimare i dati sperimentali.

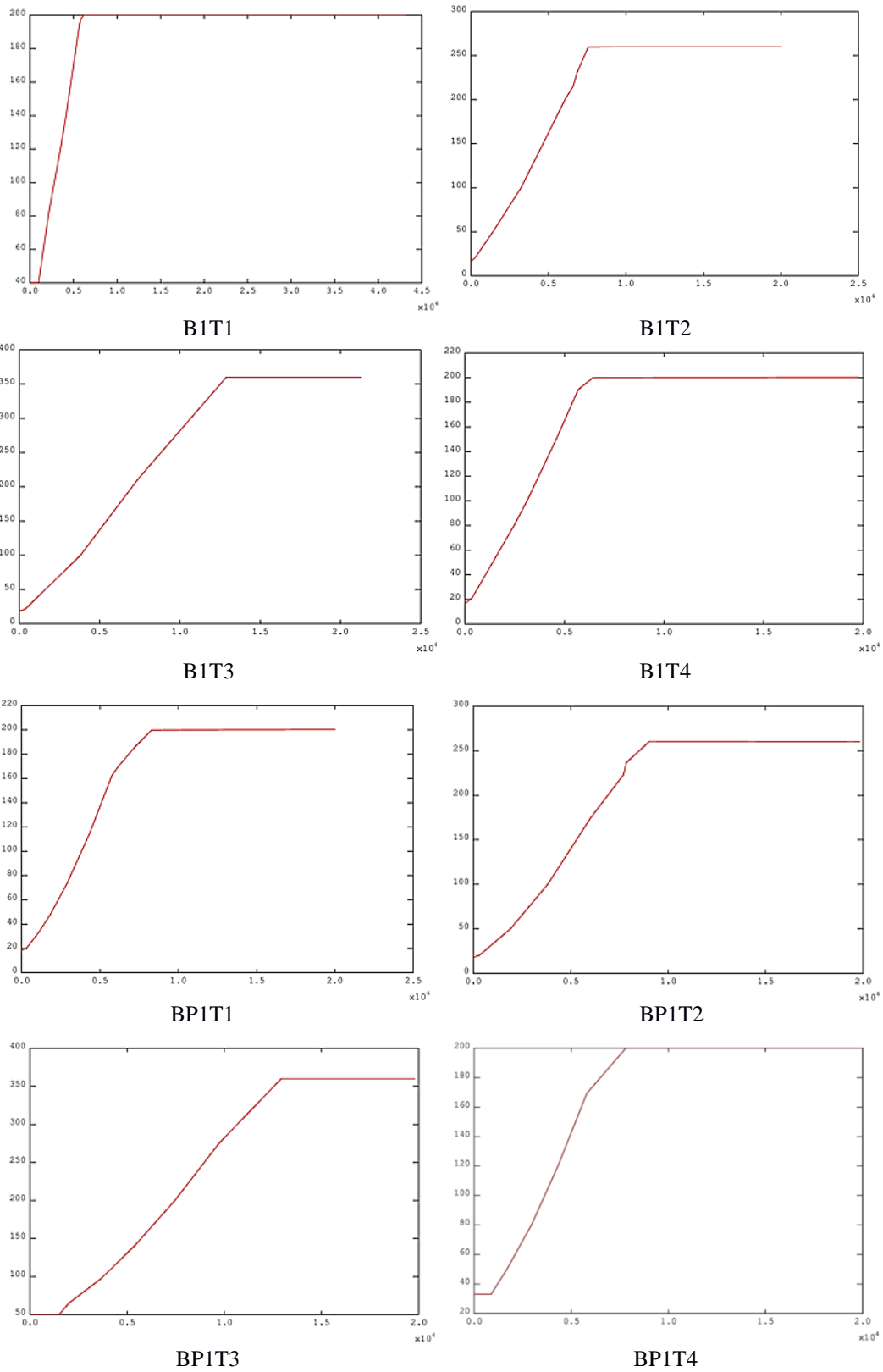


Figura 8- Evoluzione temporale della temperatura interna (T3) del calcestruzzo nelle varie prove

2.4.2.4 I risultati

I risultati ottenuti sono di seguito illustrati, suddivisi per tipologia di calcestruzzo. Come precedentemente menzionato i risultati si riferiscono agli ultimi istanti del transitorio di riscaldamento, e dovrebbero corrispondere al raggiungimento di uno stato termico stazionario.

Provini con calcestruzzo base (CLSB)

In **Tabella 10** sono riassunti i principali risultati ottenuti nelle quattro simulazioni riguardanti le prove effettuate con il provino in CLSB. Per ogni prova sono stati effettuati due differenti calcoli: uno utilizzando valori di conducibilità del calcestruzzo misurati in laboratorio (calcolo A) e l'altro variando i valori di conducibilità in modo da approssimare meglio il risultato sperimentale (calcolo B). Nella stessa tabella sono anche riportati i valori sperimentali della temperatura per le termocoppie T3, C2 e S2, utilizzati per tale confronto.

In **Figura 9** è rappresentata, per ogni calcolo effettuato, la distribuzione radiale di temperatura calcolata, con i punti sperimentali di confronto. Per ogni prova è riportato sulla sinistra l'andamento termico calcolato attraverso l'approccio di tipo A, e sulla destra quello di tipo B. Osservando i grafici si nota immediatamente come, utilizzando la conducibilità misurata (1.77 W/m/C) per entrambe le zone di calcestruzzo, i punti sperimentali cadano costantemente al di sotto della curva numerica, con una pendenza più marcata per la zona interna (grafici a sinistra). Modificando in modo sostanziale la conducibilità di detta zona (portandola a 0.8 W/m/C) e lasciando inalterata l'altra, si ottiene una perfetta sovrapposizione dei dati numerici e sperimentali (grafici a destra).

Ciò è indice di una maggiore resistenza termica esercitata dalla zona interna rispetto all'altra, che invece mostra un resistenza simile a quella attesa. Poiché il materiale utilizzato nella zona interna coincide con il materiale della zona esterna, tale scostamento può essere attribuito alla presenza di una forte resistenza termica concentrata nella zona interna, ad esempio quella derivante dal contatto non perfetto tra tubo e calcestruzzo. Le ripetute dilatazioni termiche del tubo in acciaio durante i riscaldamenti, maggiori di quelle del mezzo di accumulo, possono aver danneggiato il calcestruzzo prossimo all'interfaccia creando un gap isolante e, di conseguenza, una notevole resistenza termica di contatto.

La temperatura esterna del coibente non supera, nel caso peggiore, i 40°C, con una perdita di calore stimata di circa 115 W/m². Il calore accumulato in questa fase varia da 30 a 60 Wh/kg, proporzionalmente al salto termico compiuto dal mezzo.

Provini con calcestruzzo base e SS-CPCM (CLSP)

In **Tabella 11** sono riassunti i principali risultati ottenuti nelle quattro simulazioni riguardanti le prove effettuate con il provino in CLSP. Per ogni prova sono stati effettuati due differenti calcoli: uno utilizzando la conducibilità del calcestruzzo misurata in laboratorio (calcolo A) e l'altro variando la conducibilità in modo da approssimare meglio il risultato sperimentale (calcolo B). Nella stessa tabella sono anche riportati i valori sperimentali della temperatura per le termocoppie T3, C2 e S2, utilizzati per tale confronto.

In **Figura 10** è rappresentata, per ogni calcolo effettuato, la distribuzione radiale di temperatura insieme ai punti sperimentali di confronto. Per ogni prova sono riportati sulla sinistra gli andamenti dei calcoli di tipo A, e sulla destra quelli di tipo B. Osservando i grafici si nota come, utilizzando la conducibilità misurata (1.82 W/m/C) per entrambe le zone di calcestruzzo, i punti sperimentali cadano leggermente al di sotto della curva numerica con una pendenza equivalente per entrambe le zone (grafici a sinistra). Riducendo leggermente la conducibilità di entrambe le zone (portandola a 1.2-1.3 W/m/C) si ottiene una perfetta sovrapposizione dei dati numerici e sperimentali (grafici a destra).

Ciò è indice di una maggiore resistenza termica del materiale esercitata uniformemente su entrambe le zone. Ciò equivale a una conducibilità termica inferiore a quella misurata in laboratorio, ma oggettivamente più simile a quanto ipotizzabile. In questo caso non sono invece presenti segnali di qualche ipotetica

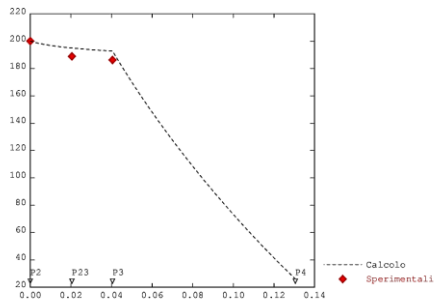
resistenza di contatto. Questo lascia supporre che la presenza della diatomite, più che del PCM, abbia un effetto stabilizzante sul materiale e ne riduca la probabilità di danneggiamento, cosa evidente anche dai test meccanici sul materiale. La temperatura esterna del coibente supera, nel caso peggiore, i 50°C, con una perdita di calore stimata pari a circa 120 W/m². Tali dati sono indice di un maggiore sfruttamento del materiale rispetto al caso del CLSB. Ciò è confermato anche dalla maggiore quantità di calore accumulato in questa fase che varia da 34 a 65 Wh/kg, proporzionalmente al salto termico compiuto dal mezzo, con un incremento rispetto al caso CLSB del 6-12%. L'incremento è comprensivo, laddove presente, del contributo dovuto al cambio di fase del PCM.

Tabella 10 – Principali risultati delle simulazioni con materiale CLSB

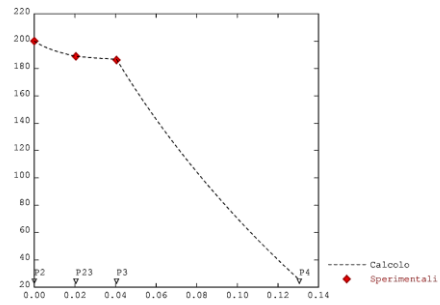
Dato	Unità	B1T1		B1T2		B1T3		B1T4	
		A	B	A	B	A	B	A	B
<i>Tipo di calcolo</i>									
K cls int.	W/m.C	1.77	0.8	1.77	0.8	1.77	0.8	1.77	0.8
K cls est.	W/m.C	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77
T in T3 Rif	°C	200.0		260.0		359.6		200.0	
T in C2 Rif	°C	188.9		243.8		329.5		188.4	
T in S2 Rif	°C	186.2		239.6		322.2		185.7	
T in T3	°C	200.0	200.0	260.0	260.0	360.0	360.0	200.2	200.2
T in C2	°C	195.0	188.9	252.6	243.7	347.2	329.6	195.2	189.1
T in S2	°C	192.7	186.7	249.4	240.5	341.6	323.9	192.9	186.9
T in P4	°C	26.0	25.4	33.0	31.9	43.3	39.9	27.9	27.3
Flusso calore	W/m ²	55.170	52.189	80.053	74.494	131.48	114.59	54.716	51.691
max cal. sen.	Wh	0.56628		0.74381		1.0499		0.56077	
max cal. lat.	Wh	0.0000		0.0000		0.0000		0.0000	
capacità term.	Wh	0.56628		0.74381		1.0499		0.56077	

Tabella 11 – Principali risultati delle simulazioni con materiale CLSP

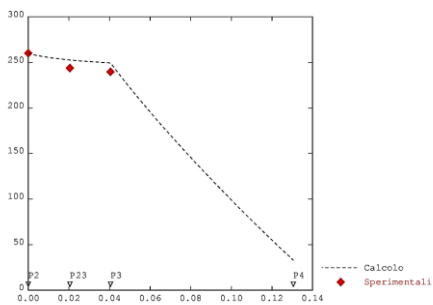
Dato	Unità	BP1T1		BP1T2		BP1T3		BP1T4	
		A	B	A	B	A	B	A	B
<i>Tipo di calcolo</i>									
K cls int.	W/m.C	1.82	1.3	1.82	1.3	1.82	1.2	1.82	1.2
K cls est.	W/m.C	1.82	1.3	1.82	1.3	1.82	1.2	1.82	1.2
T in T3 Rif	°C	200.0		260.0		360.0		200.0	
T in C2 Rif	°C	193.7		249.0		339.4		191.6	
T in S2 Rif	°C	189.5		243.1		330.5		187.6	
T in T3	°C	200.2	200.2	260.1	260.1	360.0	360.0	200.0	200.0
T in C2	°C	195.5	193.6	253.1	250.3	347.7	340.4	195.2	192.7
T in S2	°C	193.4	190.7	250.0	245.9	342.3	332.2	193.1	189.5
T in P4	°C	37.4	37.2	41.5	41.0	55.6	53.6	31.7	31.4
Flusso calore	W/m ²	52.174	50.804	77.729	74.951	128.09	118.11	53.647	51.857
max cal. sen.	Wh	0.59803		0.80934		1.1394		0.61806	
max cal. lat.	Wh	0.0000		2.93212E-02		2.93212E-02		0.0000	
capacità term.	Wh	0.59803		0.83866		1.1688		0.61806	



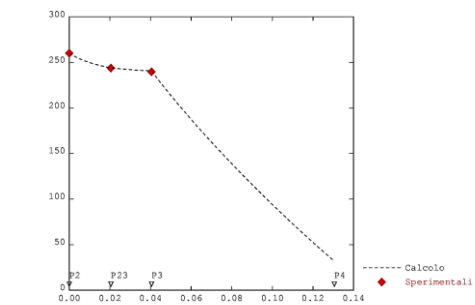
B1T1 Temperature finali nello spessore



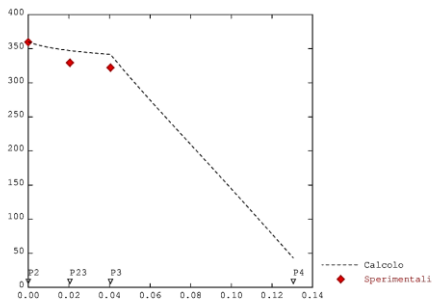
Temperature finali nello spessore



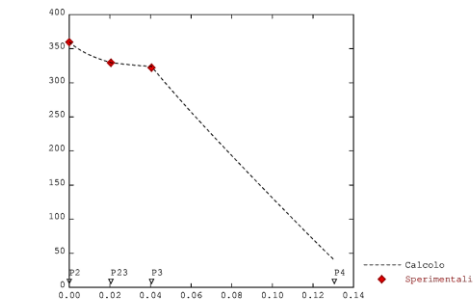
B1T2 Temperature finali nello spessore



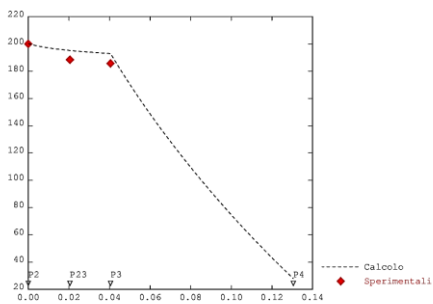
Temperature finali nello spessore



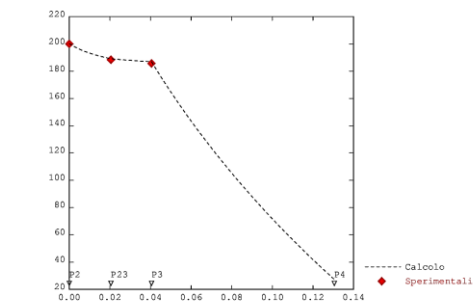
B1T3 Temperature finali nello spessore



Temperature finali nello spessore

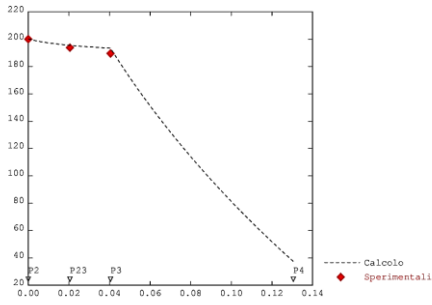


B1T4 Temperature finali nello spessore

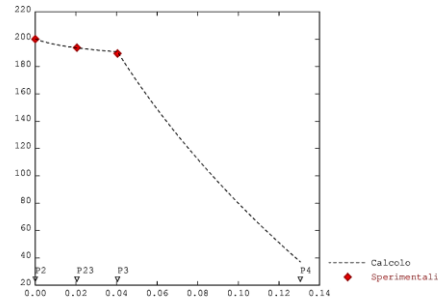


Temperature finali nello spessore

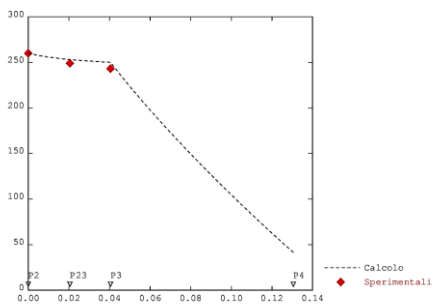
Figura 9- Distribuzione radiale della temperatura nel calcestruzzo CLSB e confronto con dati sperimentali dei punti di riferimento (T3, C2, S2) nei casi con conducibilità termica misurata (calcolo A, destra) e corretta (calcolo B, sinistra)



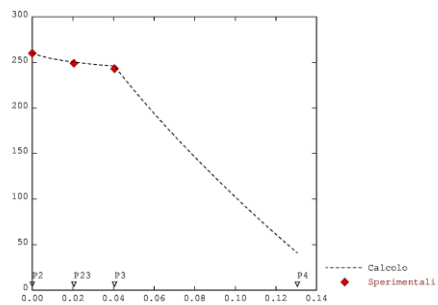
BP1T1 Temperature finali nello spessore



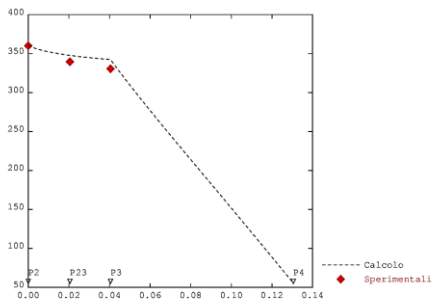
Temperature finali nello spessore



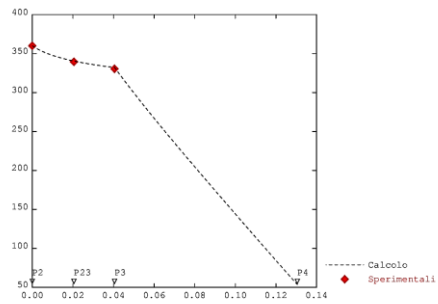
BP1T2 Temperature finali nello spessore



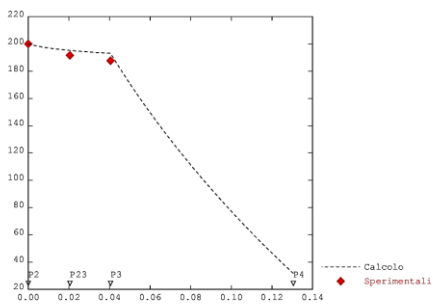
Temperature finali nello spessore



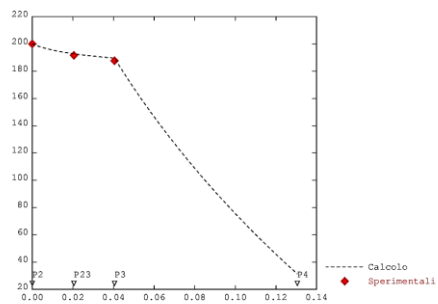
BP1T3 Temperature finali nello spessore



Temperature finali nello spessore



BP1T4 Temperature finali nello spessore



Temperature finali nello spessore

Figura 10- Distribuzione radiale della temperatura nel calcestruzzo CLSP e confronto con dati sperimentali dei punti di riferimento (T3, C2, S2) nei casi con conducibilità termica misurata (calcolo A, destra) e corretta (calcolo B, sinistra)

Confronto evoluzione della temperatura in punti di riferimento

In **Figura 11** è messo a confronto l'andamento temporale della temperatura di alcuni punti di riferimento (T3, C2, S2 e P4), al variare del materiale (CLSB, a sinistra, e CLSP, a destra) e della temperatura massima raggiunta (200, 260 e 360 °C). I dati sono relativi al calcolo di tipo B.

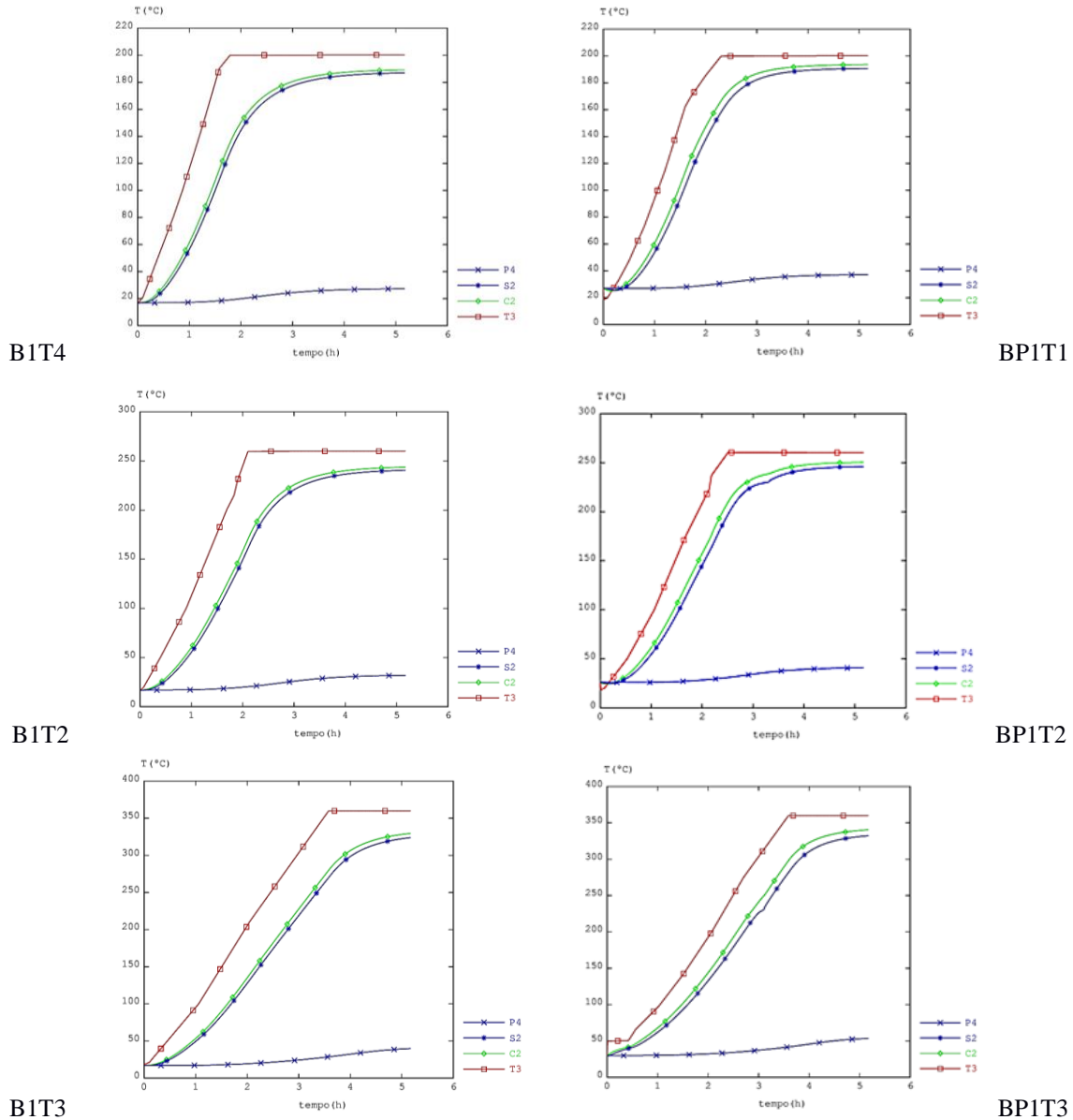


Figura 11- Evoluzione temporale delle temperature dei punti di riferimento T3, C2, S2 e P4 per un calcolo di tipo B in funzione del materiale (CLSB, a sinistra, e CLSP, a destra) e della temperatura massima (200, 260 e 360 °C)

E' evidente come il materiale CLSP abbia una evoluzione termica più rapida rispetto al CLSB, raggiungendo in tal modo temperature maggiori a fine riscaldamento. Ciò avviene anche se, nei casi a 260 e 360°C, risulta evidente un certo rallentamento in salita attorno ai 230°C a causa dell'avvenuto cambiamento di fase del PCM. L'incremento più rapido della temperatura è sicuramente ascrivibile ad una minore resistenza termica presente nel CLSP e quindi a una maggiore diffusività termica, nonostante la maggiore capacità termica del mezzo (dovuta al calore latente del PCM). **Analisi dell'andamento del calore accumulato**

Il calore accumulato nei calcestruzzi risulta compreso tra il 91 e il 95% della quantità accumulabile teoricamente. Nelle prove a 200°C e in tutte quelle con il provino in CLSB, l'energia è accumulata sotto forma di calore sensibile (**Figura 12**). Invece, le prove con provino in CLSP a temperature superiori a 230°C

evidenziano anche il contributo del calore latente (Figura 13). Tale contributo risulta essere limitato anche in considerazione della modesta quantità di PCM aggiunto (5% in peso). In Figura 14 è possibile verificare come il cambiamento di fase avvenga in circa 1 ora nel caso in cui la temperatura forzante sia pari a 260°C, e in circa 40 minuti a 360°C.

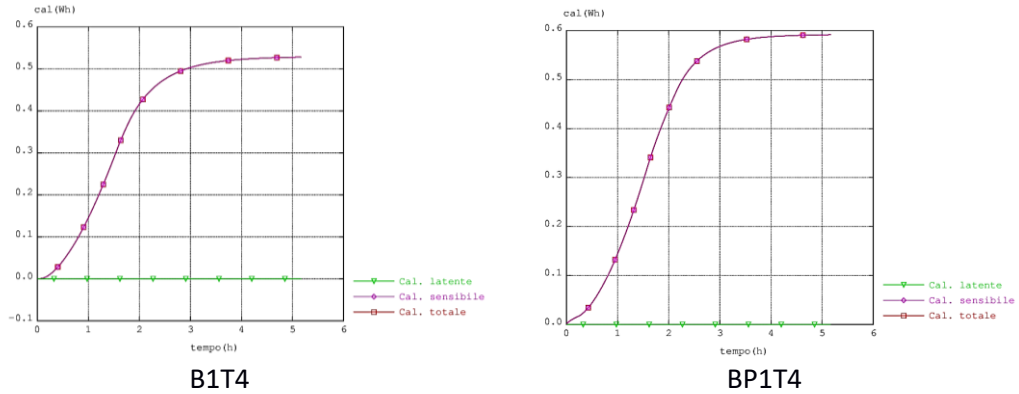


Figura 12- Evoluzione temporale del calore accumulato totale, sensibile e latente per i due provini (CLSB, a sinistra, e CLSP, a destra) alla temperatura massima di 200°C

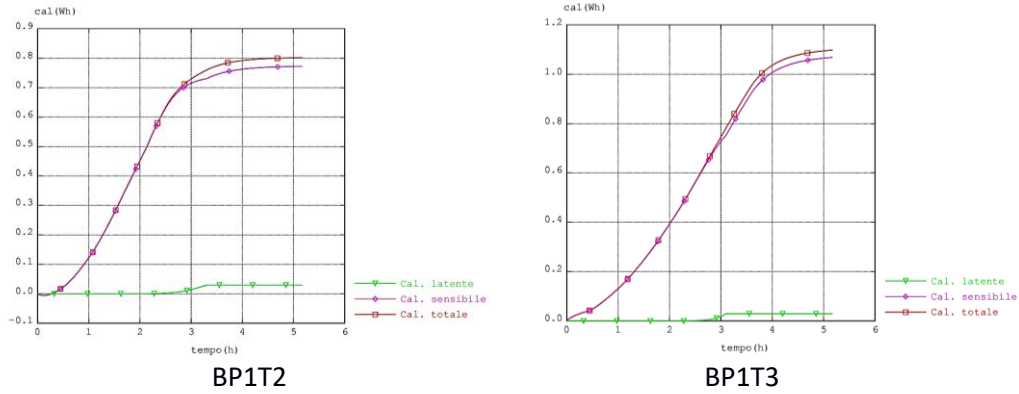


Figura 13- Evoluzione temporale del calore accumulato totale, sensibile e latente per il provino in CLSP alla temperatura massima di 260°C, a sinistra, e di 360°C, a destra.

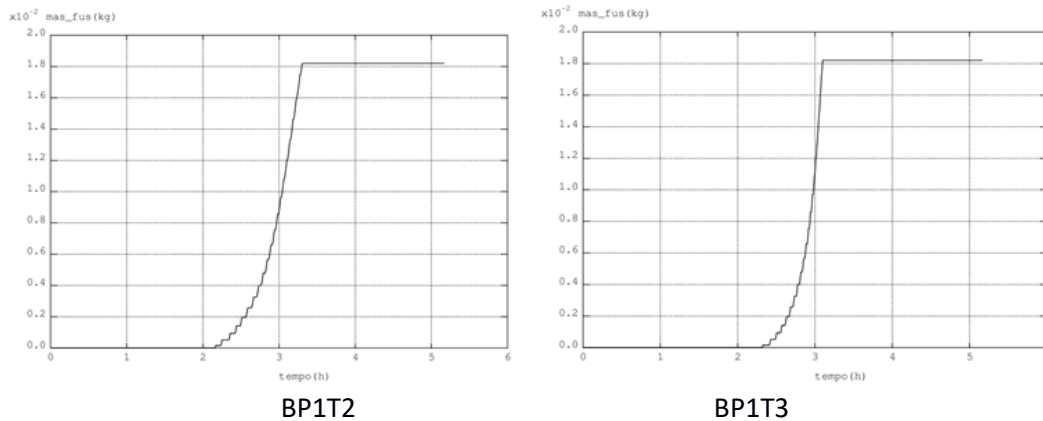


Figura 14- Evoluzione temporale della massa fusa per il provino in CLSP alla temperatura massima di 260°C, a sinistra, e di 360°C, a destra.

2.4.3 Caso 1D assialsimmetrico in regime transitorio ciclico

La seconda serie di simulazioni numeriche del comportamento termico dei provini in calcestruzzo è finalizzata alla valutazione dell'effetto della diffusività termica del mezzo di accumulo, e più in particolare della sua capacità termica, sulla dinamica del transitorio termico.

Tale verifica è stata condotta simulando i primi due cicli relativi ai test B1T4 e BP1T4, entrambi operanti tra i 200 ed i 240°C, rispettivamente in assenza e in presenza di PCM aggiunto.

2.4.3.1 Geometria e Materiali

La geometria e la discretizzazione spaziale sono analoghe a quelle adottate nelle precedenti simulazioni (vedi [Figura 6](#) e [Figura 7](#)).

Anche le caratteristiche base dei materiali sono quelle riportate in precedenza, con l'eccezione della conducibilità e della diffusività termica. In particolare la conducibilità termica nel calcestruzzo è stata aggiornata in base ai risultati precedenti, ossia nel test B1T4 viene fissata a 0.8 W/m/°C nella zona di calcestruzzo interna e a 1.77 W/m/°C in quella esterna, e per il caso BP1T4 viene assunta pari a 1.2 W/m/°C in entrambe le zone. La capacità termica, ovvero la diffusività, del mezzo di accumulo viene invece variata per meglio approssimare i dati sperimentali.

2.4.3.2 Condizioni al contorno e di carico

Anche in queste analisi il carico termico coincide con il flusso corrispondente alla imposizione di una temperatura nota sulla parete esterna dell'acciaio. Tale temperatura, variabile nel tempo, eguaglia la misura sperimentale relativa alla termocoppia T3, che è anche la temperatura di controllo e regolazione dell'impianto Solteca-Air. Tale temperatura varia per le due prove ed è mostrata in [Figura 15](#).

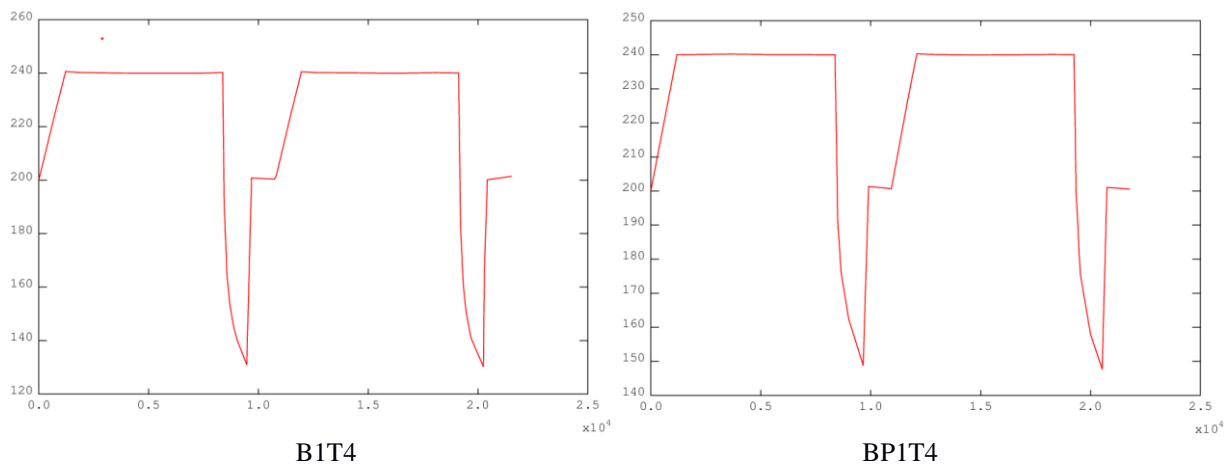


Figura 15- Evoluzione temporale della temperatura interna (T3) del calcestruzzo nelle due prove cicliche

La parete esterna del coibente, invece, scambia calore con l'ambiente circostante per convezione con l'aria, in modo equivalente ai casi stazionari. Le superfici superiori ed inferiori della magliatura sono termodinamicamente di simmetria e quindi adiabatiche.

La distribuzione di temperatura relativa allo stato iniziale del transitorio ciclico è stata ottenuta mediante un transitorio di riscaldamento del tutto analogo a quello simulato in precedenza ma con la temperatura stazionaria leggermente rivista (190°C in B1T4 e 198°C in BP1T4) per ottenere condizioni compatibili con quelle sperimentali. Infatti, durante la prova sperimentale, tra il raggiungimento dello stato stazionario e la

partenza dei cicli termici c'è un breve intervallo temporale, con un conseguente leggero raffreddamento del sistema.

2.4.3.3 La risoluzione

Il problema termico impostato è stato risolto numericamente utilizzando la procedura PASAPAS con un solutore iterativo non-lineare utilizzando un passo temporale di 10 secondi, con salvataggio dei risultati ogni 30 secondi.

La soluzione ottenuta è un campo termico variabile nello spazio (radialmente) e nel tempo. L'andamento temporale della temperatura viene confrontato con i valori sperimentali di alcuni punti di riferimento (C2 e S2), per verificare l'esattezza della risposta dinamica del sistema e quindi del termine capacitivo imposto al calcestruzzo (Figura 16).

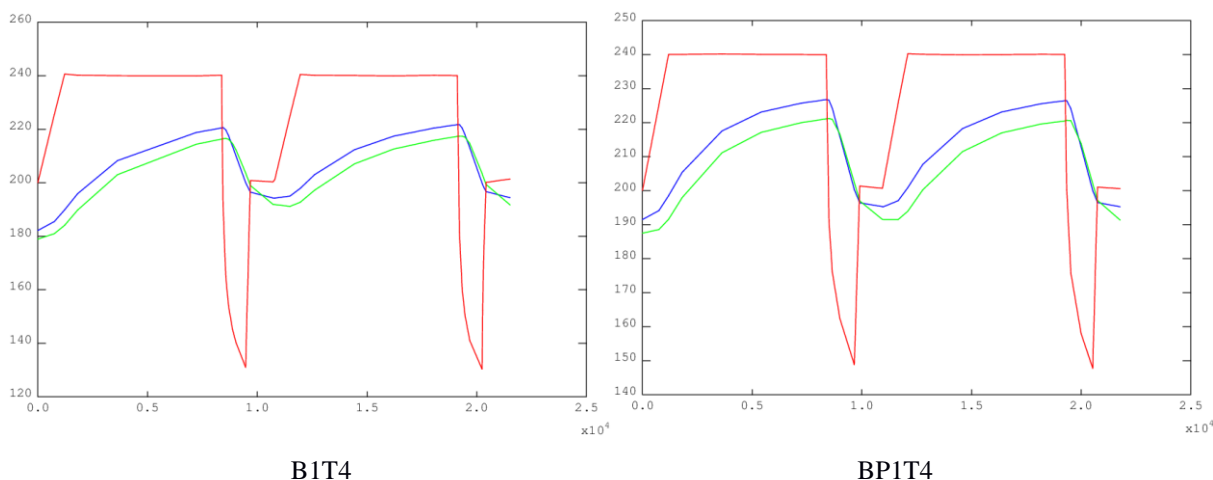


Figura 16- Evoluzione delle temperature sperimentali nei punti di riferimento (T3, C2, S2)

Per ogni prova sperimentale vengono effettuate due simulazioni: nella prima (calcolo A) si adottano i valori di capacità termica provenienti dalla caratterizzazione del materiale, mentre nella seconda (calcolo B) le capacità termiche vengono corrette per meglio approssimare i dati sperimentali.

2.4.3.4 I risultati

I risultati ottenuti sono di seguito illustrati, suddivisi per tipologia di calcestruzzo. In Tabella 12 sono riportati alcuni dei principali risultati ottenuti dalle simulazioni con materiale CLSB e CLSP, assumendo per la sezione di accumulo termico un volume di circa $7.6E^{-06} m^3$ e una massa di $1.81E^{-02} kg$.

Tabella 12 – Principali risultati delle simulazioni con materiale CLSB e CLSP

Dato	Unità	B1T4		BP1T4	
Tipo di calcolo		A	B	A	B
K cls int.	W/m.C	0.8	0.8	1.2	1.2
Cp	J/kg.C	607	1000	638	1200
T(T3) ini	°C	190.00	190.00	198.00	198.00
T(T3) max	°C	240.64	240.64	240.28	240.28
max cal. sen.	Wh	0.155	0.255	0.146	0.256
max cal. lat.	Wh	5.E-12	5.E-12	3.E-02	3.E-02
capacità term. max	Wh	0.155	0.255	0.175	0.285
Perdita calore max	W/m ²	66.2	65.0	65.9	67.0

Provini con calcestruzzo base (CLSB)

Per questa prova sono stati effettuati due differenti calcoli: uno utilizzando il valore di capacità termica del calcestruzzo misurato in laboratorio (calcolo A) e l'altro variando tale valore per meglio approssimare il risultato sperimentale (calcolo B).

In **Figura 17** è mostrata l'evoluzione della temperatura calcolata per i punti delle termocoppie T3, C2 e S2 e, per gli ultimi due, il confronto con i valori sperimentali. Osservando i grafici si nota immediatamente come utilizzando la capacità termica misurata (607 J/kg.C, Calcolo A) le curve sperimentali siano nettamente al di sotto di quelle numeriche. La maggiore rapidità di salita delle curve numeriche (da cui si deduce una maggiore diffusività termica) è correlabile alla sottostima della capacità termica. Incrementando la capacità termica del calcestruzzo (Calcolo B) fino a un valore di circa 1000 J/kg.C si ottengono, per il primo ciclo, delle curve numeriche praticamente sovrapposte a quelle sperimentali. La discrepanza che si nota per il secondo ciclo è dovuta sostanzialmente al maggiore raffreddamento registrato nelle prove sperimentali rispetto al calcolo: la curva, infatti, mantiene la stessa forma di quella sperimentale ma risulta traslata verso l'alto. Una capacità termica del calcestruzzo dell'ordine di 1000 J/kg.C è in linea con i valori classici di letteratura (900 J/kg.C) e con le prime misure effettuate dall'Università di Trento. Il valore di riferimento di circa 607 J/kg.C sembra in effetti troppo basso e ripropone nuovamente la questione relativa alla affidabilità delle misure delle proprietà termiche del materiale.

Si evidenzia come, in questo caso, l'energia termica sia accumulata (**Figura 18**) esclusivamente sotto forma di calore sensibile.

Il provino analizzato ha una capacità termica massima di circa 0.255 Wh. Nel primo ciclo si ottiene un fattore di carico pari a circa l'80% (0.204 Wh), mentre nel secondo ciclo tale parametro raggiunge l'85% (0.217 Wh). Tenendo però conto che la scarica termica del primo ciclo non è completa perché mantiene un 30% del calore massimo, si ricava che i cicli successivi riescono a caricare solo il 55% della capacità termica massima. Ciò dipende dal fatto che il tempo di carica non risulta sufficiente al raggiungimento di uno stato stazionario, e che anche il tempo di scarica è molto limitato.

Il flusso di calore disperso verso l'esterno raggiunge un valore massimo pari a circa 65 W/m² (**Figura 19**).

Test B1T4

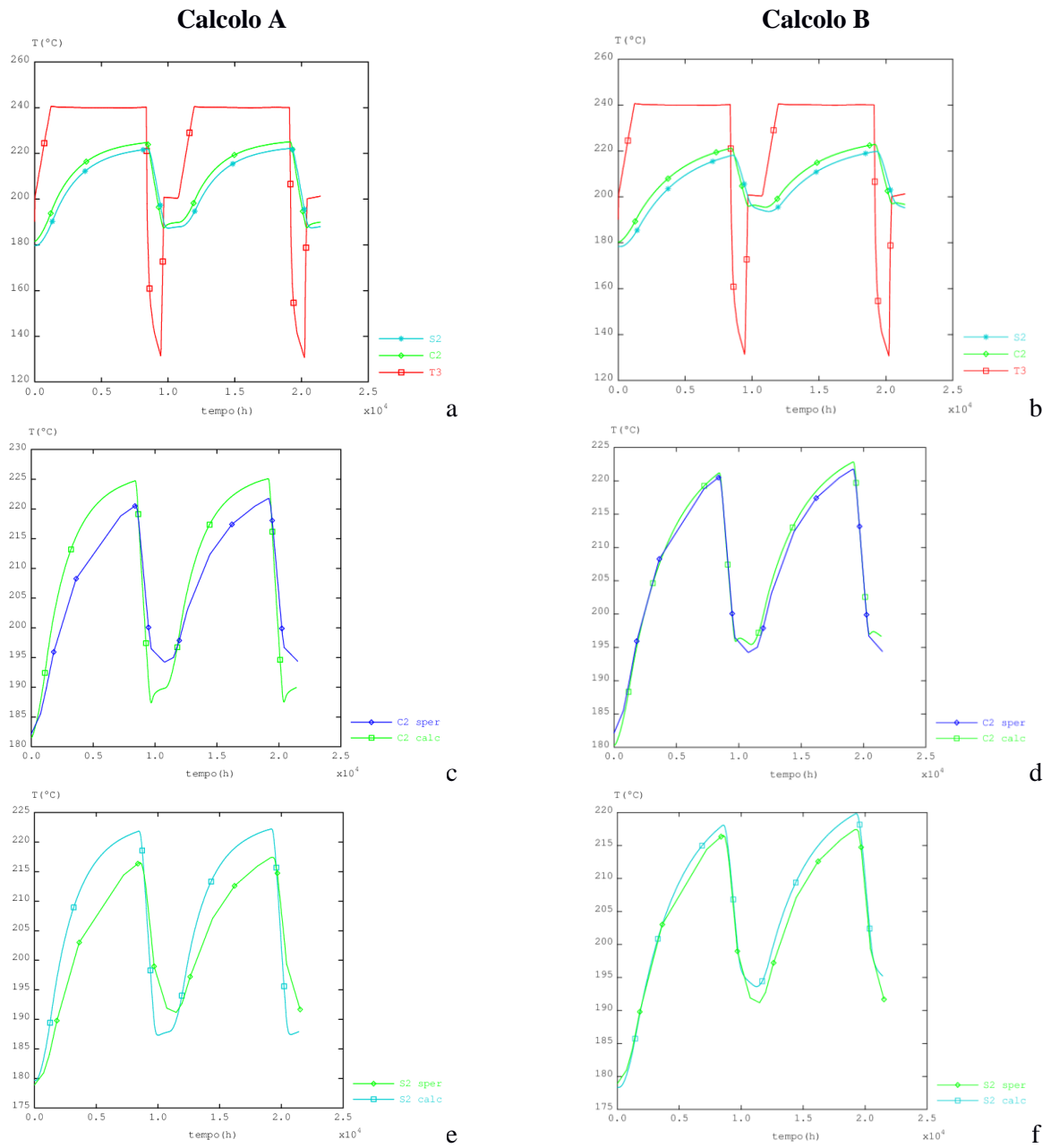


Figura 17- Evoluzione delle temperature sia calcolate che sperimentali nei punti T3 (a, b), C2 (c,d) e S2 (e,f) per i calcoli A e B relativi al calcestruzzo CLSB

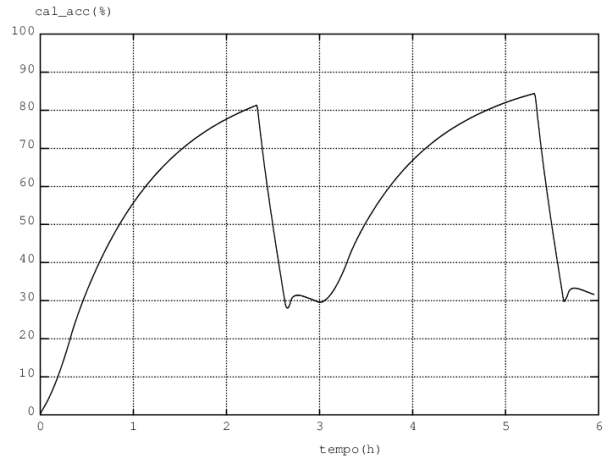
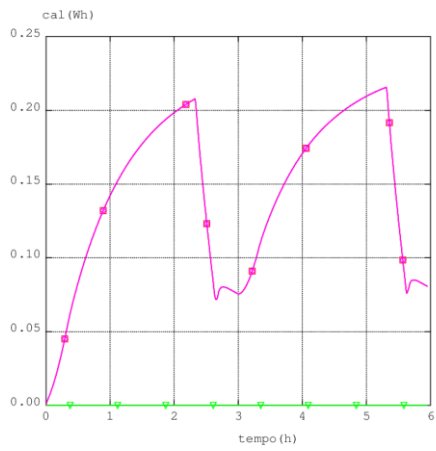


Figura 18- Evoluzione del calore accumulato totale, sensibile e latente, e frazione di calore accumulato per il provino in CLSB

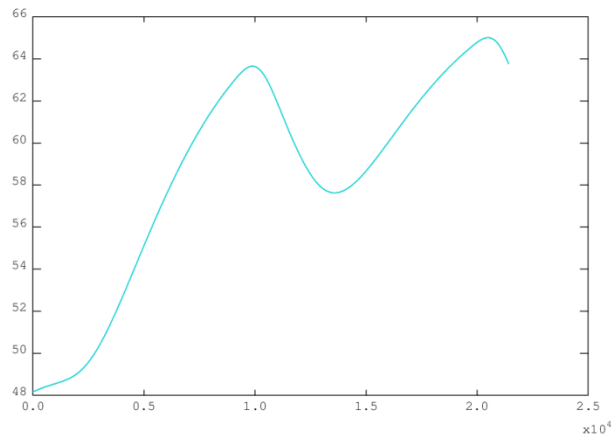


Figura 19- Evoluzione del flusso di calore uscente per il provino in CLSB

Provini con calcestruzzo base e SS-CPCM (CLSP)

Anche per questa prova sono stati effettuati due differenti calcoli: uno utilizzando il valore di capacità termica del calcestruzzo misurato in laboratorio (calcolo A), e l'altro variando tale valore per meglio approssimare il risultato sperimentale (calcolo B).

In **Figura 20** è mostrata l'evoluzione della temperatura calcolata per le termocoppie T3, C2 e S2 e, per le ultime due, il confronto con i valori sperimentali. Osservando i grafici si rileva come, utilizzando la capacità termica misurata (638 J/kg.C, Calcolo A), le curve sperimentali siano nettamente al di sotto di quelle calcolate. La maggiore rapidità di salita delle curve numeriche, da cui si deduce una maggiore diffusività termica, è correlabile alla sottostima della capacità termica. Incrementando la capacità termica del calcestruzzo (Calcolo B) fino a un valore di circa 1200 J/kg.C si ottengono, per il primo ciclo, delle curve calcolate praticamente sovrapposte a quelle sperimentali. La discrepanza che si nota per il secondo ciclo è dovuta sostanzialmente al maggiore raffreddamento registrato nelle prove sperimentali rispetto al calcolo: la curva, infatti, mantiene la stessa forma di quella sperimentale ma risulta traslata verso l'alto.

In questo caso, l'energia termica è accumulata (**Figura 21**) sia sotto forma di calore sensibile (per il 95%), che sotto forma di calore latente (per il 5%). Il contributo limitato del calore latente è attribuibile al fatto che solo una piccola percentuale della massa di PCM disponibile fonde (circa il 20%, **Figura 22**), a causa del limitato tempo di carico disponibile.

Il provino analizzato ha una capacità massima di circa 0.256 Wh. Nel primo ciclo si ottiene un fattore di carico pari a circa 80% (0.205 Wh) che nel secondo ciclo sale a 82% (0.21 Wh). Considerando che lo scarico del primo ciclo non è completo ma mantiene un 20% del calore massimo, si desume che i cicli successivi riescono a caricare solo il 62% della capacità termica massima. Ciò dipende dal fatto che il tempo di carica non risulta sufficiente al raggiungimento di uno stato stazionario, e che anche il tempo di scarica è molto limitato.

Il flusso di calore disperso verso l'esterno raggiunge un valore massimo pari a circa 66 W/m² (**Figura 23**).

Test BP1T4

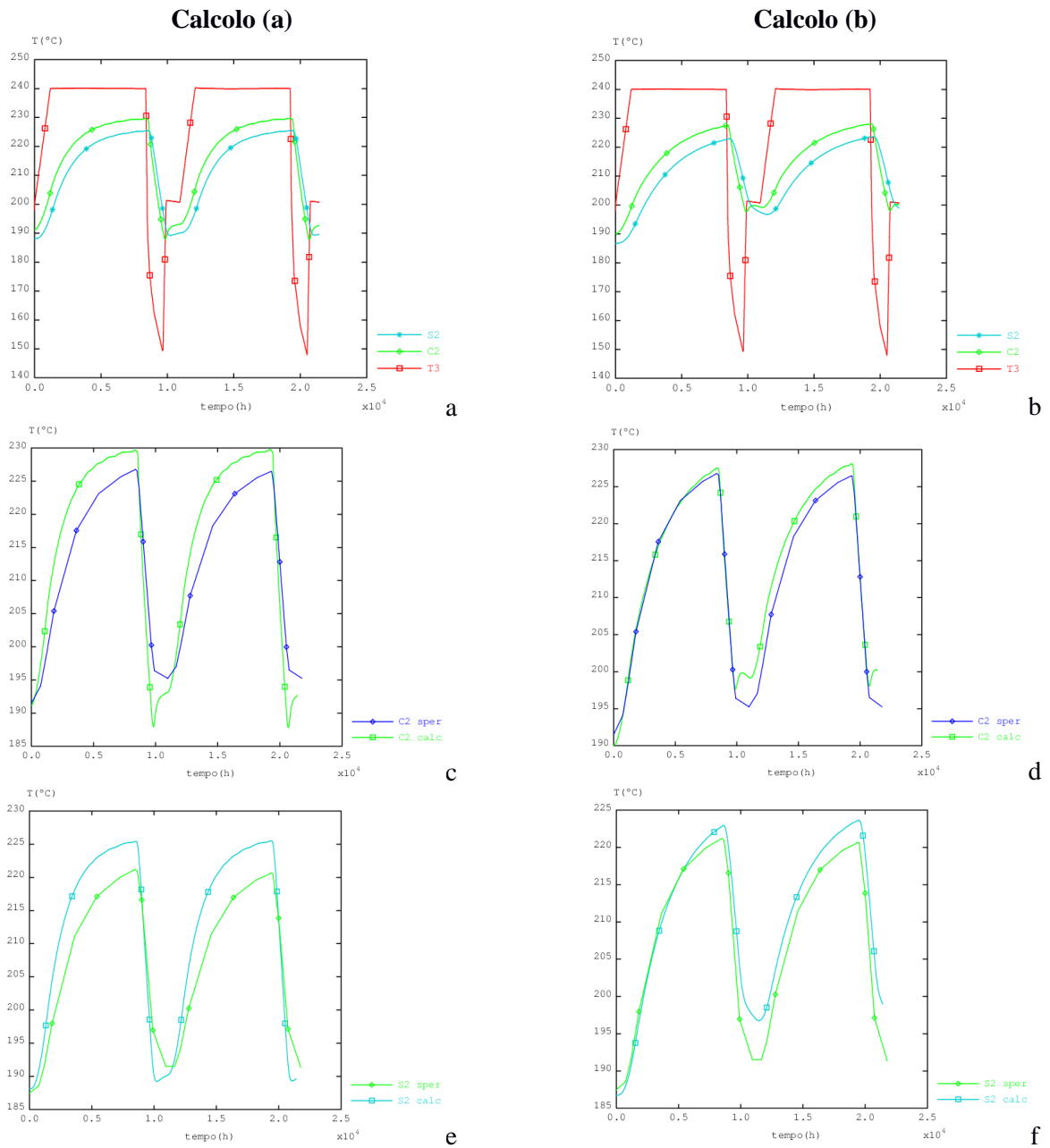


Figura 20- Evoluzione della temperatura, sia calcolata che sperimentale, nei punti T3 (a, b), C2 (c,d) e S2 (e,f) per i calcoli A e B relativi al calcestruzzo CLSP

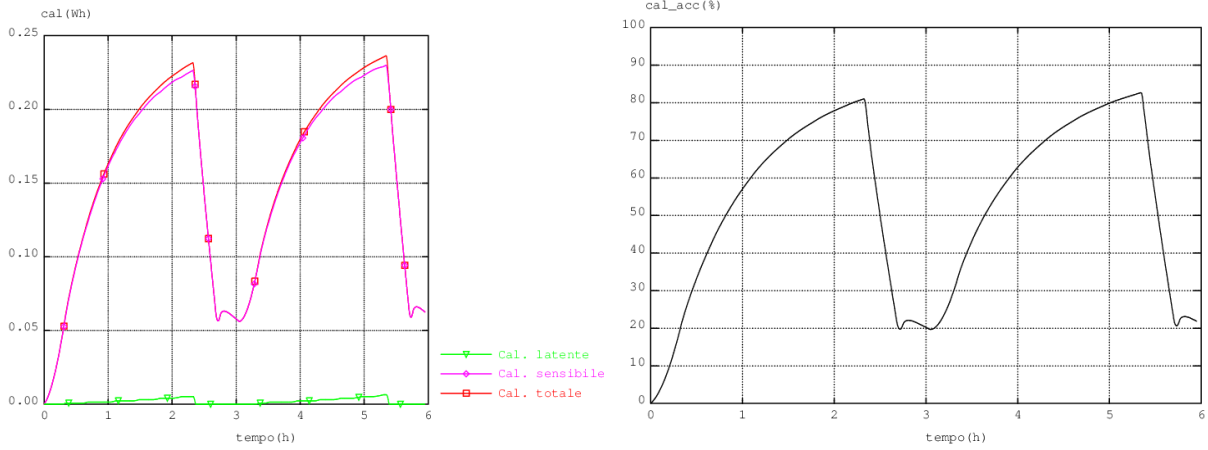


Figura 21- Evoluzione del calore accumulato totale, sensibile e latente e frazione di calore accumulato per il provino in CLSP

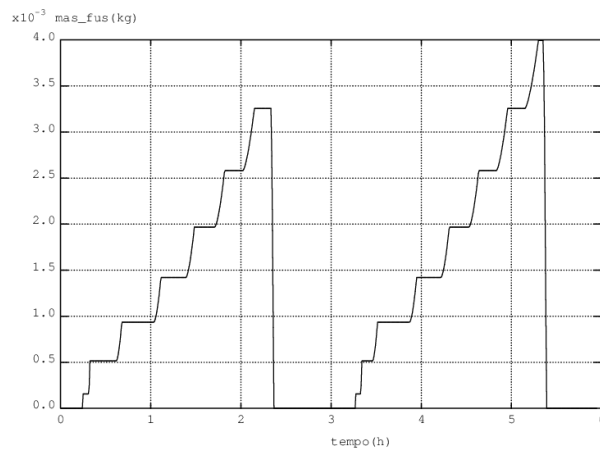


Figura 22- Andamento della massa fusa per il provino in CLSP

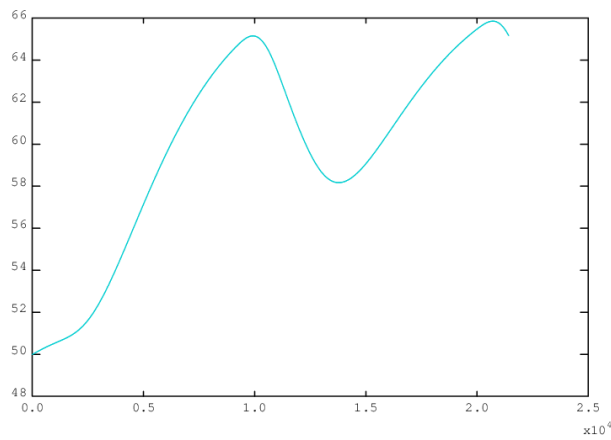


Figura 23- Andamento del flusso di calore uscente per il provino in CLSP

2.4.4 Caso 2D assialsimmetrico

Un'ultima simulazione numerica del comportamento termico dei provini in calcestruzzo è finalizzata, invece, alla verifica della validità delle semplificazioni adottate nei casi precedenti, e ad una valutazione delle condizioni al contorno adottabili in rapporto al comportamento sperimentale del provino.

Tale verifica è stata condotta simulando la fase di riscaldamento per il test B1T4, operante tra i 200 ed i 240°C e in presenza di PCM aggiunto, e mettendo a confronto le temperature calcolate dei principali punti target con quelle sperimentali.

2.4.4.1 Geometria e Materiali

Per la presente analisi è stata considerata la geometria reale del provino, le cui dimensioni sono riportate in [Tabella 1](#), mentre la discretizzazione spaziale adottata è rappresentata in [Figura 24](#).

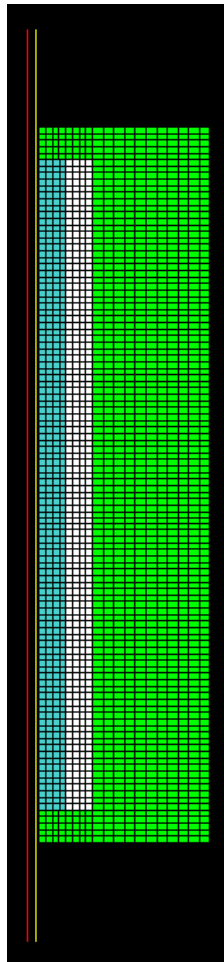


Figura 24- Discretizzazione spaziale del provino in cemento per il test B1T4

Le caratteristiche base dei materiali sono riportate in [Tabella 2](#), [Tabella 3](#) e [Tabella 4](#), ad eccezione della conducibilità termica e della capacità termica, che sono state aggiornate in base ai risultati delle simulazioni precedenti. Inoltre le caratteristiche termo-fisiche dell'aria insufflata nel tubo di scambio sono riportate in [Tabella 5](#).

2.4.4.2 Condizioni al contorno e di carico

A differenza delle simulazioni precedenti, il carico termico non è assimilato ad un flusso termico a temperatura fissata, ma rappresenta quanto avviene realmente durante la fase sperimentale.

Nel procedimento sperimentale il tubo di scambio viene riscaldato attraverso il passaggio di una corrente elettrica che genera, per effetto joule, una densità di potenza variabile nel tempo (sorgente volumetrica). Tale densità di potenza è stata determinata partendo dalla registrazione della tensione elettrica ai capi del tubo e dalla valutazione della sua resistenza elettrica, stimata in circa 0.00486 Ohm.

Di conseguenza l'andamento temporale approssimato della densità di potenza generata è quello riportato in **Figura 25**.

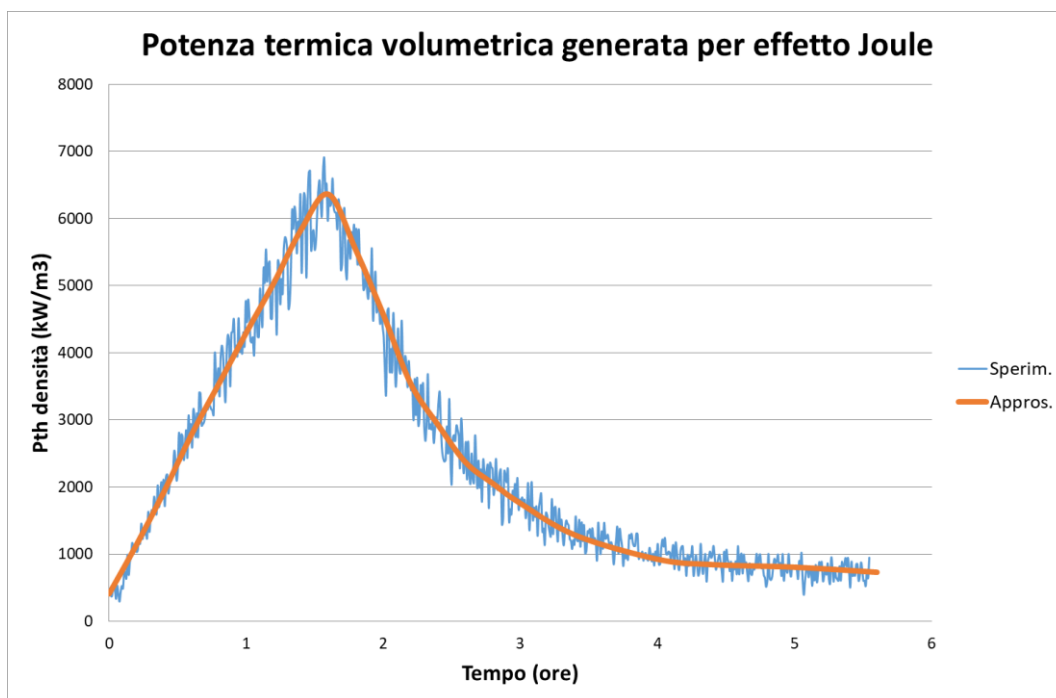


Figura 25- Andamento della potenza termica volumetrica generata per effetto Joule sia misurata sperimentalmente che calcolata

Ovviamente una parte del calore generato nel tubo di scambio si propaga attraverso il provino in cemento, riscaldandolo, mentre un'altra parte è asportata per avvezione dall'aria interna al tubo stesso. L'aria, per effetto del riscaldamento, e quindi della variazione di densità, tende a muoversi a velocità stimabile intorno ad 1 m/s, innescando uno scambio convettivo naturale caratterizzato da un coefficiente pari a circa 8 W/m²/°C (**Tabella 6**).

Una ulteriore parte del calore viene invece dispersa, per effetto del riscaldamento del coibente e del tubo di scambio, verso l'ambiente esterno, che si assume abbia una temperatura di 17°C. Per il coibente si suppone uno scambio termico con aria in sostanziale quiete, a cui si può associare un coefficiente di scambio termico di 5 W/m²/°C, in analogia alle simulazioni precedenti.

Invece, per le superfici delle estremità del tubo ricevitore non coibentate si è ipotizzato uno scambio termico maggiore a causa della turbolenza indotta nell'aria circostante dalle temperature elevate e dal flusso di aria uscente dal tubo stesso: in questo caso è stato assunto un coefficiente di scambio termico di 20 W/m²/°C.

La temperatura iniziale di tutti i materiali è stata ipotizzata costante e pari a quella ambiente. Anche la temperatura di ingresso dell'aria nel tubo ricevitore, in assenza di inversione di flusso, è stata considerata pari a quella ambiente.

2.4.4.3 La risoluzione

Il problema termico impostato è stato risolto numericamente utilizzando la procedura PASAPAS di Cast3M con un solutore iterativo non-lineare e passo temporale di 1 secondo fino ai 1000 secondi, di 10 secondi fino ai 2000 secondi e di 20 secondi fino ai 20000 secondi. Il salvataggio dei risultati presenta la stessa frequenza. La soluzione ottenuta è un campo termico variabile nello spazio, sia radialmente che in altezza, e nel tempo. Il campo termico può essere dunque confrontato con le misure sperimentali relative a punti target del calcestruzzo. In [Figura 26](#), [Figura 27](#) e [Figura 28](#) sono mostrati gli andamenti dei valori sperimentali per detti punti.

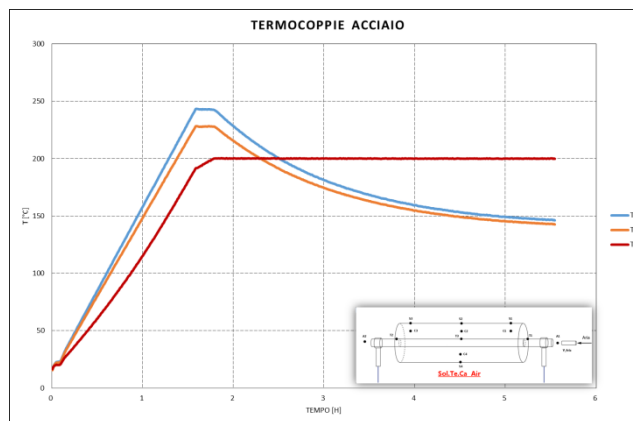


Figura 26- Andamento nel tempo della temperatura registrata nei punti T1, T2 e T3 per il test B1T4

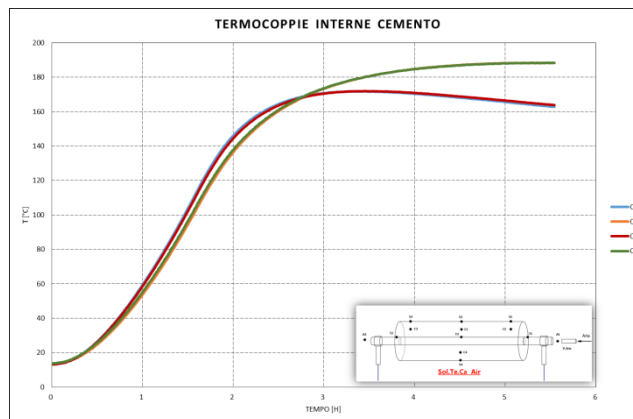


Figura 27- Andamento nel tempo della temperatura registrata nei punti C1, C2, C3 e C4 per il test B1T4

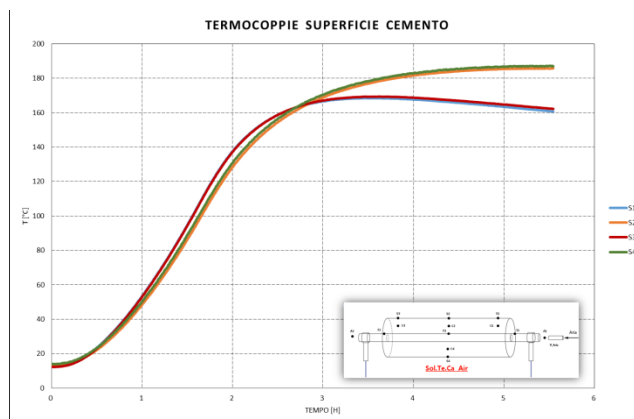


Figura 28- Andamento nel tempo della temperatura registrata nei punti S1, S2, S3 e S4 per il test B1T4

2.4.4.4 I risultati

I risultati ottenuti sono illustrati qui di seguito.

In **Figura 29** e in **Figura 30** sono mostrati rispettivamente i campi termici a inizio e fine transitorio di riscaldamento per l'intero sistema, e i campi termici a fine transitorio di riscaldamento per il provino in cemento e per la coibentazione. Dalle Figure è evidente come la sezione più calda risulti essere quella del provino in cemento, che a fine transitorio ha temperature comprese tra i 138 e i 185 °C. Larga parte della coibentazione più esterna mostra temperature comprese tra 18 e 40°C, ad eccezione delle parti più prossime al tubo di scambio che, per il piccolo spessore adottato, toccano anche punte di 176°C.

In **Figura 31** è invece riportato l'andamento nel tempo della temperatura di ingresso e di uscita dell'aria che fluisce all'interno del tubo di scambio. Ovviamente la sua temperatura di ingresso rimane costante e pari a 17°C, mentre quella in uscita cresce fino a valori di circa 185°C per poi assestarsi intorno ai 110°C. Il riscaldamento evidente dell'aria lungo il suo tragitto ha come conseguenza un peggioramento delle condizioni di scambio termico con il tubo man mano che ci si avvicina alla sezione di uscita. Ciò è evidenziato anche dalla presenza di una sezione più calda nel cemento e nel coibente spostata verso l'uscita del condotto.

Per comprendere se i modelli FEM semplificati adottati in precedenza siano equivalenti al modello completo occorre analizzare ciò che accade nella sezione mediana del provino in cemento, e in particolare nei punti target T3, C2 e S2. In **Figura 32** è mostrato l'andamento calcolato con il modello completo nei predetti punti. Invece, in **Figura 33** tali valori sono messi a confronto con i dati sperimentali per verificarne il grado di approssimazione. Come è possibile osservare, gli andamenti calcolati e sperimentali sono molto simili nella prima ora e mezza di transitorio. Successivamente, i valori tendono a discostarsi: la temperatura di T3 inizialmente è superiore al valore sperimentale, ma poi si riduce per attestarsi a valori inferiori di circa 20°C. Analogo è il comportamento dei punti C2 ed S2, le cui temperature rimangono però sempre inferiori a quelle sperimentali. Ciò potrebbe essere dovuto a una resistenza termica del coibente o dell'ambiente esterno inferiore alle attese, oppure a una densità di potenza sottostimata, anche se nella parte iniziale del transitorio la densità di potenza sembra essere corretta. Al di là di questa differenza, il modello FEM semplificato e quello completo sembrano fornire indicazioni congruenti circa il comportamento termico del provino in esame.

Riguardo il comportamento termico degli altri punti target, in **Figura 34** sono riportati gli andamenti temporali della temperatura calcolata nei punti T1, T2, C1, C3, S1 e S3 (curve nere), a confronto con i rispettivi valori sperimentali. Risulta evidente come le temperature dei punti T1 e T2, a contatto con il tubo metallico e agli estremi del provino in calcestruzzo, siano largamente superiori alle temperature sperimentali, per poi convergere verso queste dopo 3.5 ore di transitorio. Per i punti C1, C3, S1 e S3 il comportamento è analogo al precedente, anche se attenuato dalla resistenza termica del calcestruzzo. Il comportamento anomalo delle termocoppie T1 e T2, poiché la densità di potenza generata sembra essere

corretta (soprattutto nelle fasi iniziali), è quasi certamente dovuto a una non corretta condizione di scambio termico con l'esterno, che sottostima l'entità del calore asportata da quella zona.

Anche lo scambio termico con l'aria interna al tubo metallico sembra, almeno nelle fasi iniziali, essere corretto, per quanto detto per T3 e nonostante l'assunzione sulla reale velocità del fluido all'interno del tubo. Rimane quindi l'incognita delle reali condizioni fluidodinamiche (e, quindi, di scambio termico) che si vengono a determinare nelle zone di imbocco e uscita dell'aria, dove la turbolenza indotta potrebbe determinare dei coefficienti di scambio termico tra tubo metallico e ambiente (ipotizzato pari a $20 \text{ W/m}^2/\text{°C}$), e tra coibente e ambiente in prossimità della zona (ipotizzato pari a $5 \text{ W/m}^2/\text{°C}$) superiori a quelli considerati.

Infine, in [Figura 35](#), sulla base del gradiente di temperatura presente sulla superficie esterna del coibente, è stata valutato l'andamento del flusso termico in uscita dal sistema. Il valore delle flusso termico uscente a fine transitorio si attesta intorno ai 52 W/m^2 determinando quindi una potenza dispersa di circa 30 W.

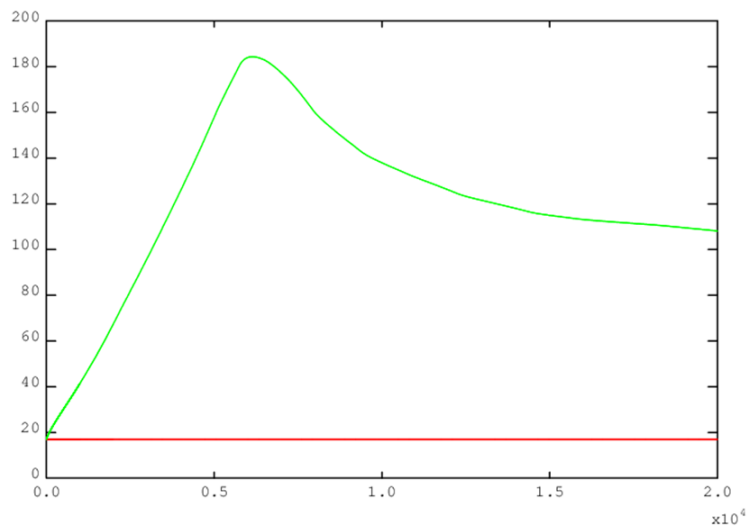


Figura 31- Andamento nel tempo della temperatura di ingresso ed uscita dell'aria che fluisce all'interna del tubo di scambio del provino B1T4 (Ascisse: tempo in sec; Ordinate: temperatura in °C)

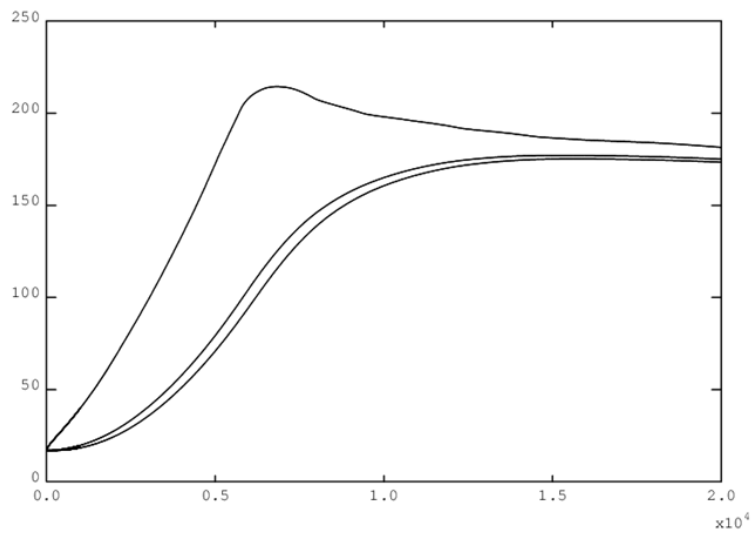


Figura 32- Andamento nel tempo della temperatura calcolata nei punti T3, C2 e S2 per il test B1T4 (Ascisse: tempo in sec; Ordinate: temperatura in °C)

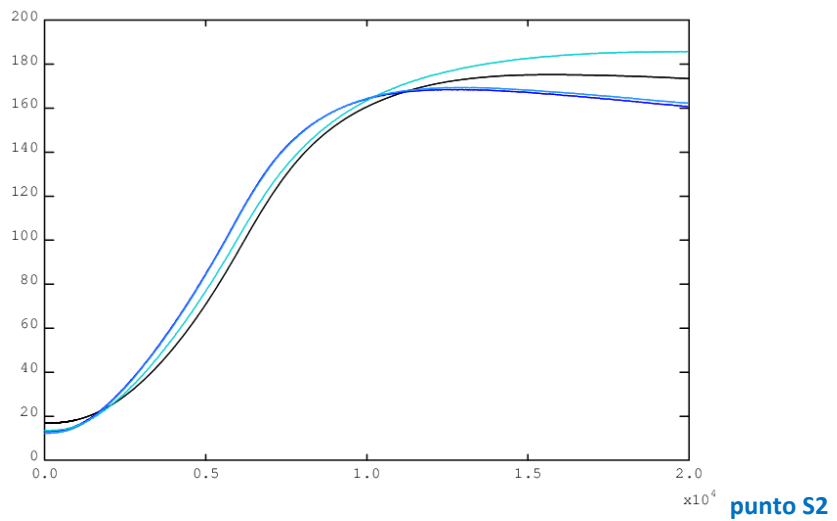
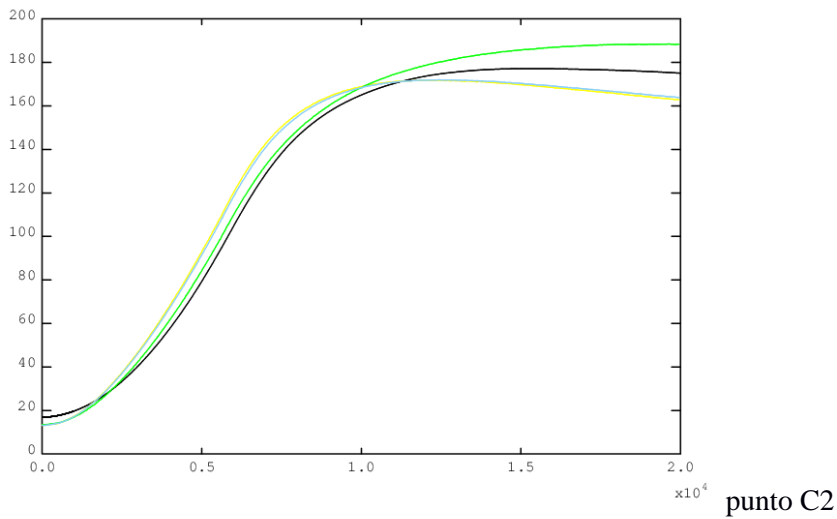
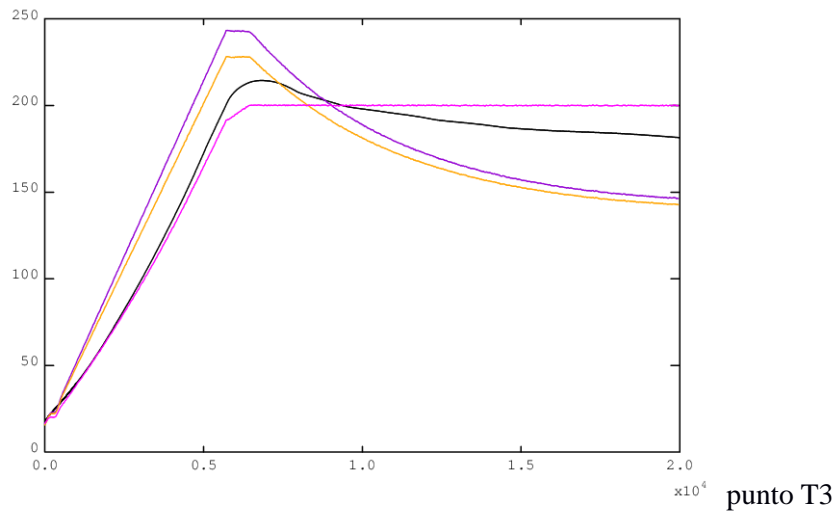


Figura 33- Andamento nel tempo della temperatura calcolata (in nero) nei punti T3, C2 e S2 per il test B1T4 e confronto con i valori sperimentali (rispettivamente curve rosa, verde e turchese) (Ascisse: tempo in sec; Ordinate: temperatura in °C)

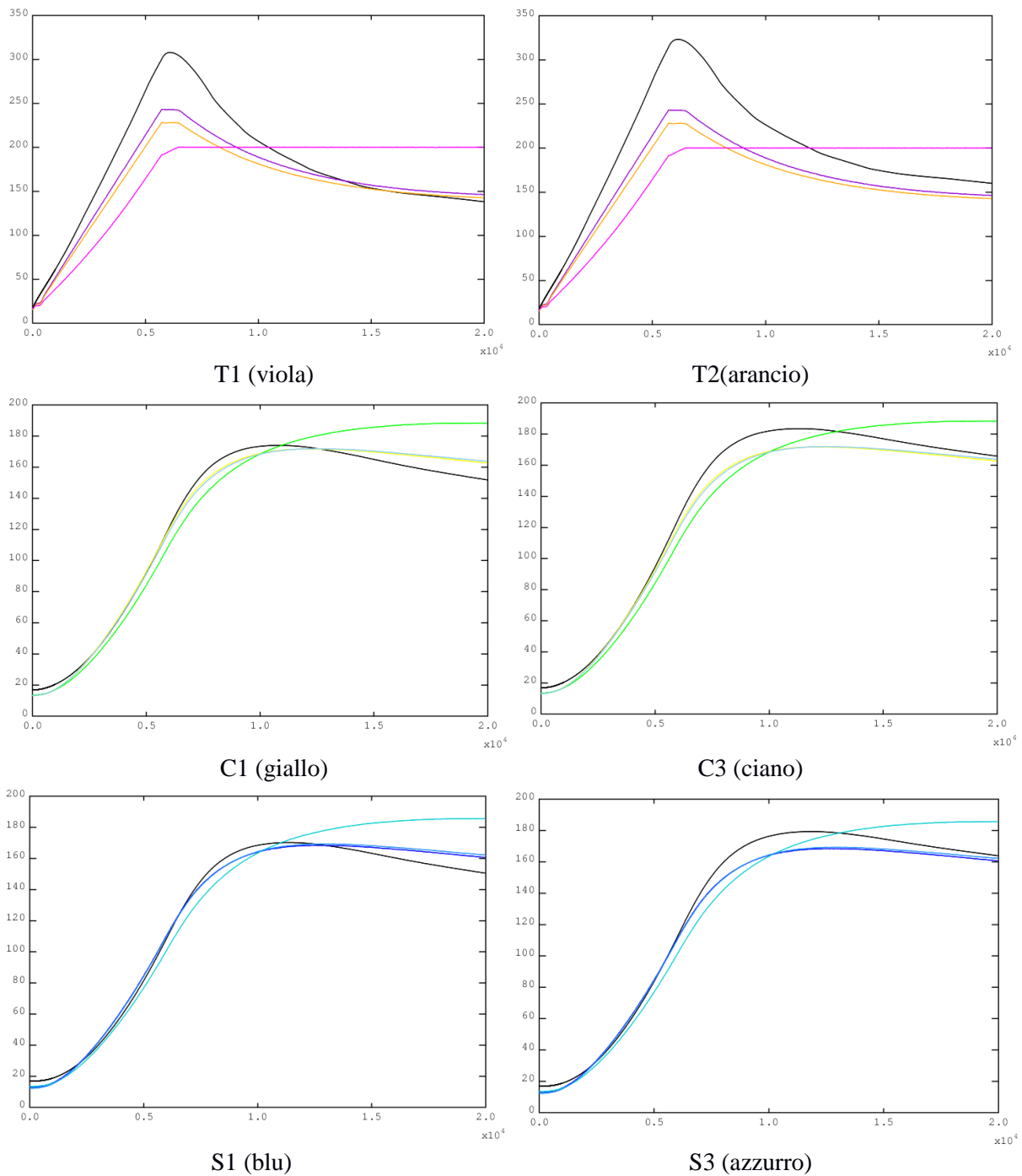


Figura 34- Andamento nel tempo della temperatura calcolata nei punti T1, T2, C1, C3, S1 e S3 per il test B1T4 e confronto con i valori sperimentali (curve calcolate in nero) (Ascisse: tempo in sec; Ordinate: temperatura in $^{\circ}\text{C}$)

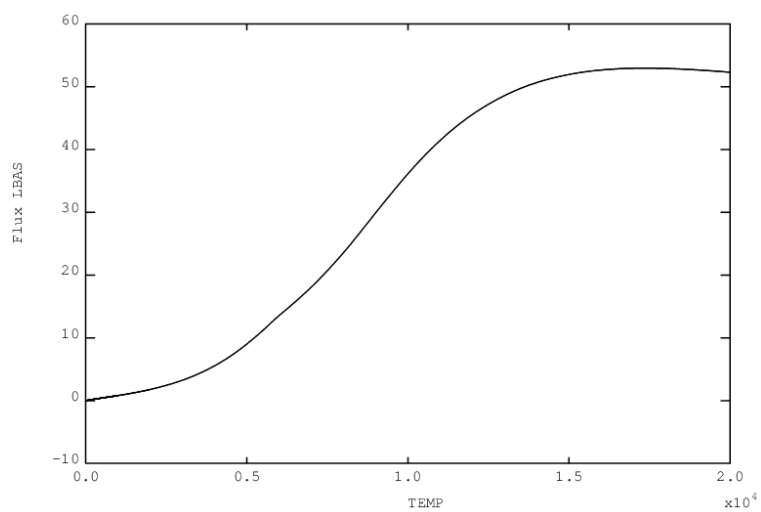


Figura 35- Andamento nel tempo del flusso termico medio uscente dal provino B1T4 (Ascisse: tempo in sec; Ordinate: flusso termico in W/m²)

3 Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati messi a punto e applicati una serie di modelli numerici, basati sul metodo degli elementi finiti (FEM), finalizzati ad approfondire la comprensione del comportamento termico di piccoli elementi di accumulo termico utilizzando calcestruzzo come materiale base.

Le analisi effettuate sono di due tipi:

- Analisi 1D assialsimmetrica in regime transitorio della fase di riscaldamento e di ciclaggio termico dei provini, finalizzata a valutare la conducibilità effettiva e la diffusività termica dei calcestruzzi;
- Analisi 2D assialsimmetrica completa in regime transitorio della fase di riscaldamento per un caso specifico, al fine di validare i modelli precedentemente utilizzati e di ottenere indicazioni sulle condizioni al contorno del caso reale.

I risultati numerici ottenuti per i calcestruzzi con e senza SS-CPCM sono stati messi a confronto con i corrispondenti valori sperimentali.

Le principali assunzioni e risultati di queste analisi sono qui di seguito riassunti:

- Per le analisi 1D assialsimmetriche è stato sviluppato un modello semplificato, rappresentante la sola sezione mediana del provino cilindrico, in cui il dato di input è rappresentato dalla evoluzione temporale della termocoppia più interna (T3);
- Il provino cilindrico in calcestruzzo è stato suddiviso in due gusci, uno interno e uno esterno, per differenziarne il comportamento termico;
- Sono stati analizzati due tipi differenti di calcestruzzo, uno base (CLSB) e l'altro con l'aggiunta di una piccola quantità di PCM (CLSP);
- Le analisi 1D del transitorio di riscaldamento, i cui ultimi istanti corrispondono al raggiungimento di uno stato termico stazionario, sono state utilizzate per stimare la conducibilità termica efficace del materiale;
- Per il materiale CLSB la conducibilità effettiva individuata è pari a 1.77 W/m/C per la zona esterna di calcestruzzo (pari al valore misurato) e a 0.8 W/m/C per quella interna (molto al di sotto del valore misurato). Ciò è indice di una maggiore resistenza termica esercitata dalla zona interna rispetto all'altra. Tale fenomeno può essere attribuito alla presenza di una forte resistenza termica concentrata, come quella derivante dal contatto non perfetto tra tubo e calcestruzzo;
- Per il materiale CLSP la conducibilità effettiva individuata è pari a 1.2-1.3 W/m/C per entrambe le zone (inferiore a quella misurata di 1.82 W/m/C). Ciò è indice di una maggiore resistenza termica del materiale esercitata uniformemente su entrambe le zone, ovvero ad una conducibilità termica inferiore a quella misurata in laboratorio; la riduzione della conducibilità apparente è però significativamente inferiore rispetto alla parte interna del provino CLSB. In questo caso non sono presenti segnali di qualche ipotetica resistenza di contatto;
- Le analisi 1D del transitorio di ciclaggio termico sono state utilizzate per stimare la capacità termica, ovvero la diffusività termica del materiale. In esse, si sono assunti i valori di conducibilità efficace precedentemente valutati;
- Per il materiale CLSB la capacità termica stimata è pari a 1000 J/kg.C per entrambe le zone di calcestruzzo, ben superiore al valore misurato di 607 J/kg.C, ma in linea con i valori classici di letteratura (900 J/kg.C);
- Per il materiale CLSP la capacità termica stimata è pari a 1200 J/kg.C per entrambe le zone di calcestruzzo (ben superiore al valore misurato di 638 J/kg.C);
- Per le analisi 2D assialsimmetriche è stato sviluppato un modello completo con tubo di scambio, calcestruzzo, coibente, flusso di aria interno al tubo che scambia per avvezione. Il carico termico è imposto come una densità di potenza generata nel tubo metallico per effetto joule. Tali analisi del transitorio di riscaldamento (test B1T4) sono finalizzate alla verifica delle semplificazioni adottate nelle analisi 1D, e ad una valutazione delle condizioni al contorno adottabili in rapporto al comportamento sperimentale del provino;

- Dalla analisi della sezione mediana del provino in cemento, in particolare nei punti target T3, C2 e S2, si evince come gli andamenti calcolati e sperimentali siano molto simili soprattutto nella prima fase di transitorio (1.5 h). Successivamente, i valori tendono a discostarsi. Ciò potrebbe essere dovuto a una resistenza termica del coibente o dell'ambiente esterno inferiore alle attese, oppure a una densità di potenza sottostimata, anche se nella parte iniziale del transitorio la potenza sembra essere corretta;
- Dalla analisi degli altri punti target (T1, T2, C1, C3, S1 e S3) risulta evidente come le temperature calcolate dei punti T1 e T2, a contatto con il tubo metallico e agli estremi del provino in calcestruzzo, siano largamente superiori a quelle sperimentali per poi convergere verso questi dopo 3.5 ore di transitorio. Per gli altri punti il comportamento è analogo al precedente, anche se attenuato dalla resistenza termica del calcestruzzo. Il comportamento anomalo delle termocoppie T1 e T2 può essere attribuito ad una non corretta condizione di scambio termico con l'esterno, che sottostima l'entità del calore asportato da quella zona;
- Anche lo scambio termico con l'aria interna al tubo metallico sembra, almeno nelle fasi iniziali, essere corretto, nonostante l'assunzione sulla velocità del fluido all'interno del tubo. Chiaramente rimane l'incognita delle reali condizioni fluidodinamiche e di scambio termico nelle zone di imbocco e uscita dell'aria, dove la turbolenza indotta potrebbe determinare dei coefficienti di scambio termico con l'ambiente superiori a quelli considerati.

In conclusione, i modelli FEM sviluppati risultano idonei alla simulazione del comportamento termico di provini in calcestruzzo utilizzati come sistema di accumulo termico. La loro risposta è però fortemente condizionata sia dalle proprietà del materiale, che devono essere ben misurate, sia dalle reali condizioni al contorno di scambio termico e di eventuale generazione di potenza, che devono essere correttamente valutate.

Le sopra citate considerazioni dovranno essere tenute in debita considerazione nel momento in cui si svilupperanno e testeranno nuove miscele di calcestruzzi ottimizzati e se ne valuteranno le prestazioni, come previsto nelle attività relative al PAR2020.

4 Riferimenti bibliografici

1. A. Miliozzi, D. Mele, E. Veca, R. Liberatore, G. Napoli, G. Giorgi, Caratterizzazione termica di piccoli elementi di accumulo con calcestruzzi e SS-CPCM, Report RdS/PTR2019/120
2. G. Mazzucco, G. Xotta, V. Salomoni, C. Majorana, Progettazione campagna sperimentale su elementi di accumulo termico in calcestruzzo ed analisi dei risultati, Report RdS/PAR2013/231
3. A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi, D. Mele, D. Nicolini, R. Liberatore, E. Veca, Sviluppo ed analisi di nuovi moduli di accumulo termico basati su mescole innovative contenenti cemento e sali nitrati micro-incapsulati in materiali fossili per incrementare la capacità termica del sistema, Rapporto ENEA DTE/STT/2017/26

5 Abbreviazioni ed acronimi

PAR	Piano Annuale di Ricerca
TES	Thermal Energy Storage
LHTES	Latent Heat Thermal Energy Storage
PCM	Phase Change Material
SS-CPCM	Shape Stabilized Composite PCM
CLSB	CaLceStruzzo Base
CLSP	CaLceStruzzo con PCM
HTF	Heat Transfer Fluid
FEM	Finite Element Method
CFD	Computational Fluid Mechanics