



Ricerca di Sistema elettrico

Realizzazione di un elemento di accumulo in calcestruzzo con PCM

E. Veca, A. Miliozzi, G. Napoli, G. Giorgi

REALIZZAZIONE DI UN ELEMENTO DI ACCUMULO IN CALCESTRUZZO CON PCM

E. Veca, A. Miliozzi, G. Napoli, G. Giorgi

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

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: LA2.12 Sviluppo e caratterizzazione di elementi di accumulo termico compatti in calcestruzzo con proprietà termiche incrementate

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Pacco di Lavoro: Raffaele Liberatore, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 I MIX-DESIGN DEL CALCESTRUZZO.....	6
3 I TEST PRELIMINARI SUI MIX-DESIGN.....	7
3.1 GEOMETRIA.....	7
3.2 FASE DI DEGASSAGGIO.....	7
3.3 TERMOCOPPIE.....	8
3.4 COIBENTAZIONE.....	10
3.5 PROCEDURE DI PROVA.....	10
3.6 RISULTATI.....	11
3.7 DISCUSSIONE.....	16
4 IL PROTOTIPO SH02.....	20
4.1 IL CONCETTO BASE.....	20
4.2 IL PROGETTO DI DETTAGLIO.....	20
4.2.1 <i>Il tubo di scambio termico</i>	20
4.2.2 <i>I ferri e le staffe</i>	21
4.2.3 <i>Il mezzo di accumulo</i>	21
4.2.4 <i>La cassaforma</i>	22
4.2.5 <i>La coibentazione</i>	23
5 LA REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO SH02.....	24
5.1 IL TUBO DI SCAMBIO TERMICO.....	24
5.2 I FERRI E LE STAFFE.....	24
5.3 LA CASSAFORMA.....	24
5.4 LE TERMOCOPPIE INTERNE.....	25
5.5 GETTO, SCASSERAMENTO E STAGIONATURA.....	25
5.6 LA COIBENTAZIONE.....	25
6 CONCLUSIONI.....	27
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	28
ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	28

Sommario

Il lavoro riportato nel presente documento è inquadrato nell'ambito della Linea di Attività LA2.12 del progetto 1.2 dell'Accordo ENEA-MiSE 2019-2021 relativa allo "Sviluppo e caratterizzazione di elementi di accumulo termico in calcestruzzo con proprietà termiche incrementate" e descrive il lavoro fatto per arrivare alla realizzazione di tre elementi base di accumulo termico di tipo ENEA-TES-SH02 con un mezzo di accumulo in calcestruzzo contenente differenti quantità di PCM micro-incapsulato.

La prima fase del lavoro è stata dedicata alla caratterizzazione termica preliminare in temperatura, attraverso un ciclaggio termico di carico e scarico del calore tra i 200 ed i 400°C, di tre provini in calcestruzzo/diatomite/PCM con tubo immerso. Tale fase ha consentito di avere delle conferme e delle ulteriori indicazioni circa le prestazioni in regime transitorio dei materiali da analizzare, con particolare riferimento all'entità della loro conducibilità e diffusività termica.

Sulla base di questa e delle precedenti caratterizzazioni, oltre che delle specifiche precedentemente elaborate per gli elementi base di accumulo termico, si è potuto passare alla progettazione di dettaglio degli elementi SH02 e degli accessori quali la cassaforma per il getto del calcestruzzo e la coibentazione necessaria alle prove termiche sugli elementi stessi.

Infine, si è documentata la fase di realizzazione dei componenti progettati, effettuata con il supporto della ditta Cipiccia Calcestruzzi di Narni (Terni). Gli elementi base realizzati, dopo la relativa stagionatura, sono stati, quindi, trasportati presso l'ENEA Casaccia, insieme ai vari componenti della coibentazione.

Gli elementi SH02 sono perciò pronti ad essere sottoposti ad una dettagliata caratterizzazione termica utilizzando l'impianto sperimentale Solteca3.

Questo sarà l'oggetto della seconda fase della presente linea di attività.

1 Introduzione

Il lavoro qui riportato è inquadrato nell'ambito della Linea di Attività LA2.12 del progetto 1.2 dell'Accordo ENEA-MiSE 2019-2021 relativa allo "Sviluppo e caratterizzazione di elementi di accumulo termico in calcestruzzo con proprietà termiche incrementate". In particolare, in questa fase, si procederà, con il supporto della Cipiccia Calcestruzzi di Narni (Terni), alla realizzazione di tre elementi base di accumulo termico di tipo SH02 con un mezzo di accumulo in calcestruzzo contenente differenti quantità di PCM micro-incapsulato.

Nella precedente linea di attività LA2.4 si erano sviluppate tre nuove miscele di calcestruzzo e sali nitrati (sale solare) micro-incapsulati in materiali fossili (diatomite) le cui prestazioni termiche consentissero di incrementare la densità di energia accumulata [1].

I tre mix-design di calcestruzzo additivato con materiale a cambiamento di fase micro-incapsulato, mEPCM erano: i) uno base (senza PCM); ii) uno con il 5% in peso di PCM; iii) uno con il 10% in peso di PCM. Dette miscele sono state caratterizzate, dopo trattamenti termici tra 25 e 400°C, sia termicamente che meccanicamente attraverso la realizzazione di una serie di provini cilindrici pieni [2].

Partendo da dette caratteristiche, è stato, quindi, dimensionato, progettato ed analizzato un elemento di accumulo termico modulare, denominato ENEA-TES-SH02, utilizzando un mezzo di accumulo dello stesso tipo di quelli qui caratterizzati.

Contemporaneamente alla realizzazione dei provini pieni per i tre materiali si sono realizzate anche tre serie di provini con tubo immerso [1], che saranno oggetto di una caratterizzazione termica in temperatura preliminare attraverso un ciclaggio termico di carico e scarico del calore tra i 200 ed i 400°C.

Nel seguito del presente documento vengono descritte le fasi di:

- Caratterizzazione termica preliminare di provini con tubo immerso, per avere una prima stima sulle prestazioni attese per i nuovi materiali sviluppati;
- Realizzazione di detti tre elementi base di accumulo, uno per ogni tipologia di materiale, i quali saranno successivamente soggetti ad una dettagliata caratterizzazione termica utilizzando l'impianto sperimentale Solteca3 realizzato presso l'ENEA Casaccia [3].

2 I mix-design del calcestruzzo

I tre mix-design dei calcestruzzi che verranno utilizzati sono gli stessi sviluppati in [1] e riportati, per semplicità, in **Tabella 2-1**.

Le tre miscele saranno quindi identificate con le lettere A, B e C :

- Miscela **A**: Calcestruzzo base;
- Miscela **B**: Calcestruzzo base + il 5% in peso di PCM;
- Miscela **C**: Calcestruzzo base + il 10% in peso di PCM.

Tabella 2-1 Mix design delle tre miscele di calcestruzzo/mEPCM. Peso dei vari componenti necessari alla realizzazione di 1 m3 (kg/m3) di ciascuna miscela

Componente	Miscela A	Miscela B	Miscela C
Acqua	117	133	148
Cemento (CEM II 42.5R-A/LL)	360	360	360
Sabbia (0-4)	929	853	822
Brecciolini (5-15)	467	371	288
Breccia 15-30	504	407	324
Fibre Nylon (Meraflex)	1	1	1
Fibra metallica (Fibercoll)	50	50	50
Additivo Super-fluidificante (HR350)	4.49	4.49	4.49
mEPCM	0	126	208
Massa Volumica CLS 28gg	2378	2373	2264

Il PCM, in questo caso, è una miscela di nitrati di sodio e potassio (40/60wt% KNO₃/NaNO₃) stabilizzato in forma (SSPCM) attraverso micro-incapsulazione (mEPCM) in diatomite, una farina fossile. Il rapporto tra PCM e diatomite è di 80%/20% in peso. Detti materiali sono stati studiati e realizzati da Cipiccia Calcestruzzi (Narni-TR).

In Tabella 2-2 sono riportate alcune utili proprietà termiche per i vari mix design misurate dopo un trattamento a 200 °C.

Tabella 2-2 Alcune proprietà termiche dei vari mix-design misurate dopo trattamento a 200 °C.

Tipo materiale	Conducibilità W/m.C	Calore specifico J/kg.C
A	1.69	631.03
B	1.60	637.61
C	1.12	731.79

3 I test preliminari sui mix-design

Tre provini cilindrici con tubo immerso della tipologia “tube&shell” e costituiti dai materiali A, B e C sono stati realizzati per caratterizzare il comportamento termico dei calcestruzzi in condizioni termiche transitorie.

3.1 Geometria

I provini cilindrici in configurazione “tube&shell” sono costituiti da:

- Un tubo in acciaio inox, di diametro esterno 20 mm, spessore 1.5 mm e lunghezza 750 mm;
- Un guscio in calcestruzzo di diametro esterno 100 mm e lunghezza 500 mm;
- Una coibentazione in lana di roccia, o similare, di spessore maggiore di 120 mm lateralmente e 50 mm nelle sezioni di base.

Ciascun provino ha un guscio di calcestruzzo di volume 3.77 dm³ e peso circa 9 kg.

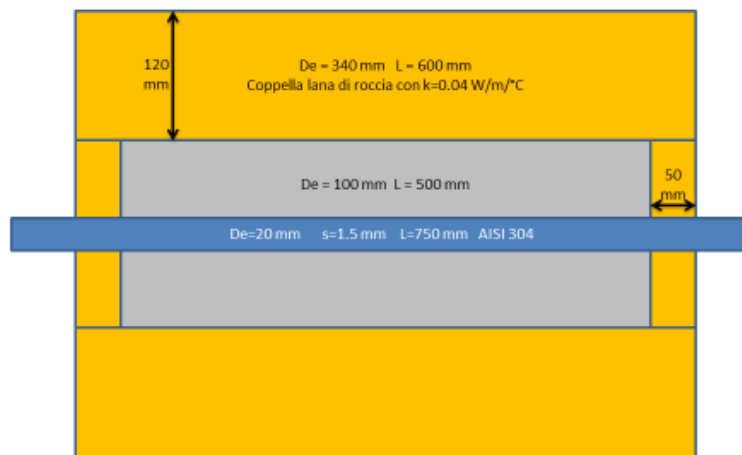


Figura 3-1 Schema e dimensioni dei provini in calcestruzzo con tubo immerso coibentato

3.2 Fase di degassaggio

La procedura di degassaggio dei provini con tubo immerso è analoga a quella adottata per i provini pieni [2] e si basa sull'utilizzo di una camera climatica (Sunrise modello SU340 della ditta Angelantoni). I tre provini sono stati alloggiati contemporaneamente nella camera climatica e sottoposti ad un trattamento termico atto ad eliminare la maggior parte dell'acqua libera presente in essi (Figura 3-2).



Figura 3-2 Camera climatica Sunrise SU340 di Angelantoni e tre provini con tubo immerso alloggiati al suo interno

La procedura di degassaggio dei provini è la seguente:

1. In 1 ora la camera climatica è portata dalle condizioni ambiente a quelle di partenza: umidità relativa 20% e temperatura 20°C;
2. L'umidità relativa rimane al 20%. La temperatura è incrementata da 20°C a 80°C in 2 ore con un rateo di salita di 0.5°C/min;
3. La temperatura è mantenuta costante a 80°C per circa 10 ore al fine di uniformare la temperatura anche all'interno del provino ed evitare elevati gradienti termici. La camera manterrà l'umidità relativa pari al 20%;
4. La temperatura è nuovamente incrementata passando dagli 80°C ai 120°C in 80 minuti, sempre con un rateo di salita di 0.5°C/min. A tale temperatura l'acqua libera presente nel provino di calcestruzzo tende ad evaporare ed ad uscire dallo stesso. Nella camera l'umidità relativa è settata al 20% anche se al di sopra dei 100°C perde di significato;
5. La temperatura è mantenuta costante a 120°C per circa 15 ore al fine di completare l'operazione di degassaggio;
6. La temperatura è quindi portata dai 120°C ai 20°C in 200 minuti, con un rateo di discesa di circa 0.5°C/min. L'umidità relativa è settata sempre al 20%.

Tabella 3-1 Andamento temperatura e umidità relativa di set-point per il degassamento.

tempo	Δt	T	umid. rel.
ore	min	°C	%
0.00	0	20	60
1.00	60	20	20
3.00	120	80	20
13.00	600	80	20
14.33	80	120	20
24.33	900	120	20
32.66	200	20	20

3.3 Termocoppie

Ogni provino include 9 termocoppie disposte su 3 posizioni assiali e 3 radiali secondo lo schema riportati in **Figura 3-3**.

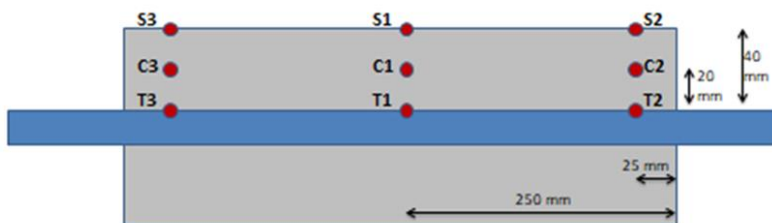


Figura 3-3 Posizionamento delle termocoppie nei provini in calcestruzzo con tubo immerso

Le termocoppie “T” sono solidarizzate al tubo interno, prima della fase di getto del calcestruzzo. Tali termocoppie sono alloggiare all’interno di opportune piastrine a loro volta fermate su tubo attraverso una saldatura o, come nel presente caso, con delle fascette metalliche (Figura 3-4).

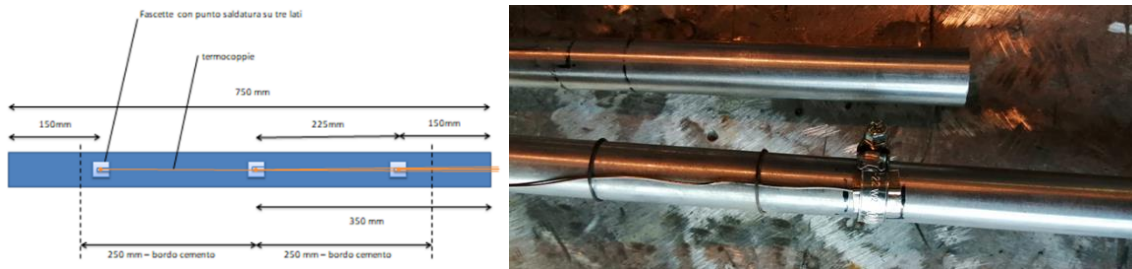


Figura 3-4 schema del posizionamento delle termocoppie “T” e foto del loro bloccaggio attraverso una fascetta metallica per un provino in calcestruzzo con tubo immerso

Invece, le termocoppie indicate con “C” ed “S” sono state posizionate successivamente alla fase di stagionatura e degassaggio del provino. Per posizionare le termocoppie “C” si è provveduto a realizzare dei piccoli fori radiali di profondità 20 mm sul provino, bloccandole con del cemento (Figura 3-5/A). Le termocoppie “S” sono state invece posizionate sulla superficie esterna del provino realizzando in piccolo intaglio e cementandole sulla stessa superficie (Figura 3-5/B).

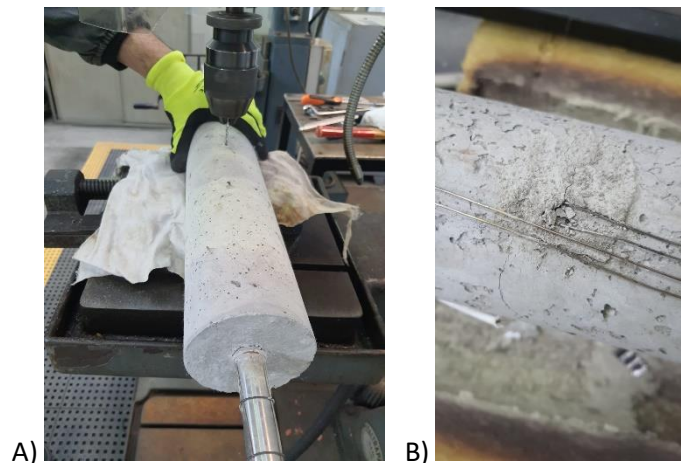


Figura 3-5 Posizionamento delle termocoppie “C” (A) ed “S” (B) per un provino in calcestruzzo con tubo immerso

La posizione nominale sia longitudinale che radiale delle termocoppie è riportata in **Tabella 3-2**.

Tabella 3-2 Posizione nominale sia longitudinale (x) che radiale (r) delle nove termocoppie.

TC	x (mm)	r (mm)
S1	250	50
S2	475	50
S3	25	50
C1	250	30
C2	475	30
C3	25	30
T1	250	10
T2	475	10
T3	25	10

3.4 Coibentazione

Una volta applicate le termocoppie i provini sono stati coibentati utilizzando delle coppelle Teknowool TEK90 in lana di roccia, con densità nominale 90 Kg/m³, diametro interno 100 mm e spessore 120 mm

La loro conducibilità termica, in W/m-°C, è funzione della temperatura secondo quanto mostrato in Tabella 3-3 e nella relazione seguente:

$$k = 5.3 * 10^{-7}T^2 + 9.4 * 10^{-5}T + 0.036$$

Tabella 3-3 Andamento temperatura e umidità relativa di set-point per il degassamento.

Temperatura (°C)	50	100	150	200	250	300
Conducibilità termica (W/m-°C)	0.042	0.051	0.062	0.076	0.093	0.112

Su tale base la resistenza termica è di 5.8 °C/W per una temperatura media di circa 170°C, con una perdita di calore di 45 W, una temperatura di parete di 30°C ed un tempo di raffreddamento superiore a 4 ore.

In **Figura 3-6** un provino con tubo immerso coibentato ed alloggiato sull'impianto sperimentale Solteca-Air.



Figura 3-6 Provino con tubo immerso coibentato ed alloggiato sull'impianto Solteca-Air

3.5 Procedure di prova

Le prove sperimentali di caratterizzazione termica saranno condotte utilizzando l'impianto sperimentale **Solteca Air**. I dettagli di tale impianto sono descritti in un precedente rapporto [6]. Le procedure di prova che sono state adottate sono perfettamente analoghe a quelle utilizzate in precedenza e documentate nello stesso rapporto.

In particolare, sono stati eseguiti, per ogni tipologia di materiale da caratterizzare, quattro distinti test (**Tabella 3-4**): i primi tre sono caratterizzati da 6 cicli di carico e scarico condotti per tre diversi livelli di temperatura tra 200 e 400°C mentre nell'ultimo, condotto a un livello di temperatura tra 200 e 240°C, si sono eseguiti ulteriori 12 cicli.

Tabella 3-4 Tipologia di test da eseguire per ciascun materiale.

ID prova	Temperatura Minima (°C)	Temperatura Massima (°C)	Nr cicli
T1	200	240	6
T2	260	300	6
T3	360	400	6
T4	200	240	12

La procedura di prova per ciascun test consta delle seguenti fasi:

1. Riscaldamento del provino fino al raggiungimento dello stato stazionario relativo alla temperatura minima di prova (rampa a 2°C/min. fino a T_{min} e poi pianerottolo per almeno 5 ore);
2. Rampa di salita della temperatura target dalla temperatura minima alla temperatura massima;
3. Temperatura target costante e pari alla temperatura massima per un certo intervallo temporale, fino alla stabilizzazione della temperatura del provino;
4. Rampa di discesa rapida della temperatura target dalla temperatura massima alla temperatura minima attraverso flusso di aria compressa a temperatura ambiente;
5. Temperatura target costante e pari alla temperatura minima per un certo intervallo temporale, fino alla stabilizzazione della temperatura del provino.
6. Ripetere 2-5 per 6 cicli ogni test predisposto. Nel caso dei test di durabilità (T4) i cicli sono incrementati a 12.

In **Tabella 3-5** sono riportati i parametri caratteristici di ciascuno dei test eseguiti.

Tabella 3-5 Tipologia di test da eseguire per ciascun materiale.

ID prova	T1	T2	T3	T4
Temperatura Minima (°C)	200	260	360	200
Temperatura Massima (°C)	240	300	400	240
Nr cicli	6	6	6	15
Riscaldamento				
Gradiente rampa (°/min)	2°/min	2°/min	2°/min	2°/min
Tempo salita (min)	90	120	170	90
Durata pianerottolo (ore)	5	5	5	5
Tempo complessivo (ore)	6.5	7	7.83	6.5
Ciclo				
Breve isoterma a T_{min} (min)	15	15	15	15
Tempo salita (min)	20	20	20	20
Gradiente rampa salita (°/min)	2°/min	2°/min	2°/min	2°/min
Durata pianerottolo a T_{max} (ore)	2	2	2	2
Durata max raffreddamento (min)	20	20	20	20
Durata ciclo singolo (ore)	2.92	2.92	2.92	2.92
Durata prova (ore)	24	24.5	25.33	41.5

3.6 Risultati

I principali risultati ottenuti hanno riguardato le seguenti grandezze:

- Temperature registrate dalle termocoppie posizionate sul tubo di acciaio (T1, T2, T3) oltre che la temperatura di set-point;
- Temperature registrate dalle termocoppie posizionate a metà dello spessore del provino in calcestruzzo (C1, C2, C3);
- Temperature registrate dalle termocoppie posizionate sulla superficie esterna del provino in calcestruzzo (S1, S2, S3);
- Tensione e corrente elettrica acquisita dal generatore di corrente.

Oltre a queste grandezze sono riportati i parametri dedotti o calcolati a partire dai dati sperimentali, quali:

- Energia termica accumulata all'interno del calcestruzzo;

- Potenza termica trasmessa attraverso il calcestruzzo;
- Potenza termica generata per effetto Joule nel tubo in acciaio;
- Potenza termica volumetrica generata per effetto Joule nel tubo in acciaio.

L'energia termica accumulata all'interno del calcestruzzo è stata stimata, per ogni istante temporale, a partire dalle temperature registrate nelle varie posizioni e dalle proprietà dei materiali, ipotizzando che il provino in calcestruzzo sia costituito da 6 diverse zone cilindriche, come mostrato in **Figura 3-7**. Per ogni zona è calcolata una temperatura media utilizzando i valori delle termocoppie prossime ad essa e quindi, nota la variazione rispetto alla temperatura minima di partenza, l'energia termica accumulata nella zona stessa, che include anche l'eventuale calore latente accumulato quando la temperatura supera quella di fusione del PCM. Sommando i contributi delle diverse zone è possibile stimare l'energia termica accumulata dal provino.

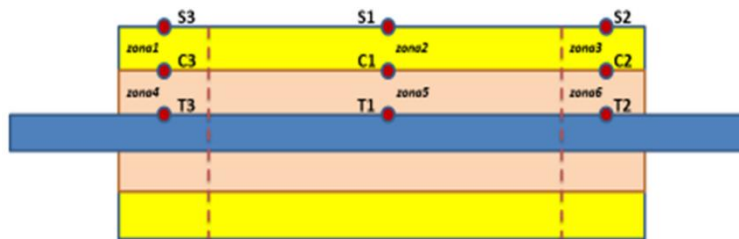


Figura 3-7 Provino con tubo immerso suddiviso in zone per la valutazione del calore accumulato

La potenza termica trasmessa attraverso il calcestruzzo è invece stimata considerando le zone esterne definite in precedenza (Zone 1, 2 e 3) e le relative coppie di temperature registrate (C1-S1, C2-S2, C3-S3). Per ogni zona è valutata la resistenza termica teorica sulla base della classica relazione:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{d_e}{d_m}\right)}{2\pi Lk} \quad (1)$$

e quindi la potenza termica trasmessa:

$$P = \frac{\Delta T}{R} \quad (2)$$

La somma dei tre termini fornisce la potenza termica trasmessa, che, in condizioni di raggiunta stazionarietà (fase Riscaldamento), rappresenta la potenza dispersa verso l'ambiente.

Infine, la potenza termica generata per effetto Joule nel tubo in acciaio è valutata in modo classico a partire dalla corrente misurata che attraversa il tubo in acciaio e dalla resistenza elettrica di quest'ultimo. La resistenza elettrica del tubo di sezione A_{sez} e lunghezza L è data dalla relazione:

$$R_{el} = \frac{\rho_{el}[1 + c_T(T - 20)]L}{A_{sec}} \quad (3)$$

in cui ρ_{el} è la resistività elettrica dell'acciaio a 20°C, considerata pari a 0.714 Ohm·m, e c_T il coefficiente di temperatura, valutato pari a 0.03. Quindi, la potenza termica generata è data dalla relazione:

$$P_{eJ} = R_{el} * I^2 \quad (4)$$

I risultati dei test eseguiti sono riportati in

Tabella 3-6 in funzione del tipo di provino, della prova eseguita e della fase di riscaldamento (R) o ciclaggio (C). Per ogni tipologia di prova sono riportati i risultati relativi sia alla fase di riscaldamento che a quella di ciclaggio. In particolare sono evidenziate le temperature di riferimento della prova: temperatura minima, massima e temperatura ambiente. Sulla base di queste temperature e delle caratteristiche del materiale è

stata valutata l'energia massima accumulabile. Invece l'energia massima accumulata è stata calcolata come descritto in precedenza.

Inoltre, sulla base dei dati relativi alla fase di riscaldamento, è stata ricavata una indicazione sulla conducibilità efficace del materiale (comprensiva di eventuale degrado o danneggiamento) per confrontarla con i valori trovati in origine. A tale scopo è stata determinata, in condizioni quasi stazionarie (fine della fase di riscaldamento) la potenza termica che attraversa il materiale (P_{loss}). Dividendo tale parametro per la superficie esterna del calcestruzzo è stato possibile ottenere il flusso termico uscente (flux). Noto il flusso termico e le temperature della sezione intermedia (T1, C1 e S1) per il caso stazionario, è stato possibile valutare il coefficiente di scambio termico equivalente h ($h = \text{flux} / (T_{S1} - T_{amb})$), i salti termici relativi al guscio di calcestruzzo interno (ΔT_{int}) e a quello esterno (ΔT_{est}) e quindi le relative resistenze termiche:

$$R_{int} = \frac{P_{loss}}{\Delta T_{int}} \quad R_{est} = \frac{P_{loss}}{\Delta T_{est}} \quad R_{tot} = R_{int} + R_{est} \quad (5)$$

Infine i valori apparenti di conducibilità termica sono stati ottenuti sulla base delle seguenti relazioni:

$$k_{1,app} = \frac{\ln\left(\frac{d_m}{d_i}\right)}{(2\pi L)R_{int}} \quad k_{2,app} = \frac{\ln\left(\frac{d_e}{d_m}\right)}{(2\pi L)R_{est}} \quad k_{app} = \frac{\ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{(2\pi L)R_{tot}} \quad (6)$$

In **Figura 3-8** sono riportati, a titolo di esempio alcuni andamenti temporali di temperature, tensioni, correnti e Potenza termica generata per effetto Joule sul provino di tipo A alla temperatura target di 200°C.

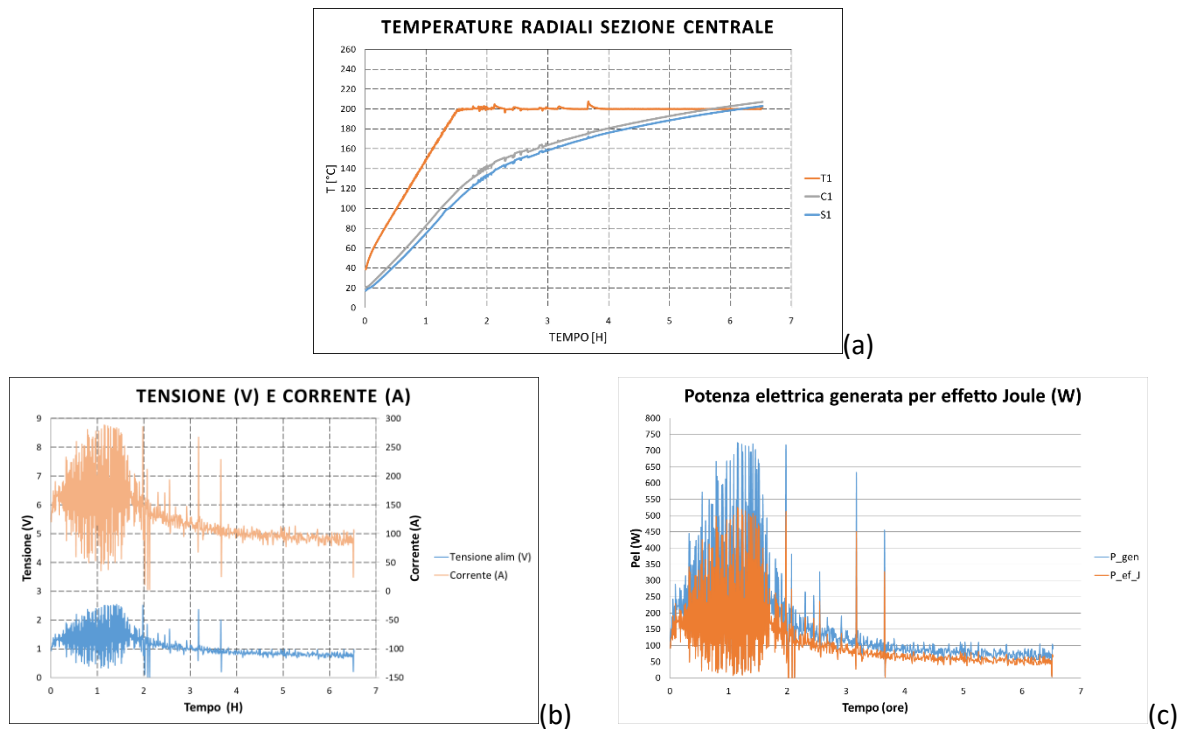


Figura 3-8 Andamenti temporali delle temperature nella sezione centrale del provino A (a), della tensione e corrente dell'alimentatore (b) e della potenza termica generata per effetto Joule sul tubo immerso alla temperatura target di 200°C.

Tabella 3-6 Principali risultati delle prove eseguite.

Parametro	Unità	Provino A				Provino B				Provino C			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Fase Riscaldamento													
Tmin	°C	15.0	15.0	260.0	20.0	20.0	166.2	22.0	150.0	150.0	120.0	40.0	100.0
Tmax	°C	200.0	260.0	360.0	200.0	200.0	260.0	360.0	200.0	200.0	260.0	360.0	200.0
Tamb	°C	15.0	15.0	16.0	14.0	22.0	22.0	22.0	19.0	10.0	10.0	14.0	13.0
E max Wh	Wh	275.05	364.26	148.68	267.62	271.72	154.63	523.27	75.48	83.82	259.89	561.65	151.15
E stored Wh	Wh	268.91	330.13	115.33	243.76	260.64	102.02	490.58	0.92	0.00	195.38	510.36	66.14
	kJ/kg	114.13	140.11	48.95	103.45	109.98	43.05	207.01	0.39	0.00	85.31	222.84	28.88
Fraz. Carico		97.77%	90.63%	77.57%	91.08%	95.92%	65.98%	93.75%	1.22%	0.00%	75.18%	90.87%	43.76%
Stazionario													
T1 staz	°C	214.0	260.0	360.0	199.9	200.1	260.0	360.0	199.9	199.9	260.0	360.4	199.9
C1 staz	°C	204.7	250.3	342.4	193.3	191.0	245.1	338.6	188.4	191.5	246.4	333.4	188.5
S1 staz	°C	200.5	245.3	334.1	189.8	190.2	243.2	334.6	185.5	187.9	240.9	323.5	184.2
Ploss staz	W	70.81	62.27	97.88	40.19	28.85	58.35	74.28	41.47	30.00	47.07	90.25	43.99
flux staz	W/m2	450.80	396.41	623.12	255.86	183.69	371.47	472.87	264.02	190.96	299.67	574.58	280.04
heq_est	W/m2/C	2.43	1.72	1.96	1.46	1.09	1.68	1.51	1.58	1.07	1.30	1.86	1.64
DT_int	°C	9.27	9.63	17.60	6.67	9.07	14.81	21.33	11.55	8.46	13.56	26.98	11.47
DT_est	°C	4.20	5.05	8.30	3.48	0.83	1.98	4.06	2.85	3.53	5.50	9.86	4.27
DT_tot	°C	13.48	14.68	25.90	10.15	9.90	16.78	25.40	14.41	11.99	19.07	36.84	15.74
R_int	C/W	0.13	0.15	0.18	0.17	0.31	0.25	0.29	0.28	0.28	0.29	0.30	0.26
R_est	C/W	0.06	0.08	0.08	0.09	0.03	0.03	0.05	0.07	0.12	0.12	0.11	0.10

Parametro	Unità	Provino A				Provino B				Provino C			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
R_tot	C/W	0.19	0.24	0.26	0.25	0.34	0.29	0.34	0.35	0.40	0.41	0.41	0.36
k1_app	W/m/C	2.67	2.26	1.94	2.11	1.11	1.38	1.22	1.26	1.24	1.21	1.17	1.34
k2_app	W/m/C	2.74	2.01	1.92	1.88	5.67	4.79	2.97	2.36	1.38	1.39	1.49	1.68
k_app	W/m/C	2.69	2.17	1.94	2.03	1.49	1.78	1.50	1.47	1.28	1.26	1.26	1.43
Fase Ciclaggio													
Tmin	°C	200.00	260.00	360.00	200.00	200.00	260.00	360.00	200.00	200.00	260.00	360.00	200.00
Tmax	°C	240.00	300.00	400.00	240.00	240.00	300.00	400.00	240.00	240.00	300.00	400.00	240.00
Tamb	°C	19.00	14.00	12.00	20.00	19.00	20.00	20.00	17.00	10.00	11.00	12.00	13.00
E max	Wh	59.47	59.47	59.47	59.47	73.42	60.38	60.38	73.42	92.25	67.06	67.06	85.65
E stored	Wh	14.54	13.72	20.69	16.23	29.58	19.19	20.74	20.09	25.06	20.84	22.59	22.49
	kJ/kg	6.17	5.82	8.78	6.89	12.48	8.10	8.75	8.48	10.94	9.10	9.86	9.82
Fraz. Carico		24.44%	23.07%	34.80%	27.28%	40.29%	31.78%	34.35%	27.36%	27.17%	31.07%	33.69%	26.26%

3.7 Discussione

I risultati ottenuti dai test effettuati non consentono, in generale, di effettuare delle considerazioni sulla capacità di accumulo dei materiali. Ciò è sostanzialmente dovuto alle dimensioni limitate del provino (meno di 9 kg di calcestruzzo) e, di conseguenza, delle elevate perdite di energia registrate in particolare nelle sezioni di ingresso ed uscita del tubo di acciaio, nonostante la buona coibentazione effettuata. Tali valutazioni potranno essere fatte solo nella fase di caratterizzazione termica di elementi di accumulo di dimensioni molto maggiori (con oltre 300 kg di materiale).

Quanto detto risulta evidente analizzando i grafici in **Figura 3-9**. Sebbene la fase di riscaldamento (a) conduca ad una buona frazione di carico dell'energia (superiore al 90%), il livello di carico del provino (b) durante i ciclaggi non supera il 40%, richiedendo dei tempi ben superiori alle circa 2 ore programmate. In quasi tutti i casi l'energia caricata in un ciclo è inferiore ai 25 Wh, con una leggera dipendenza dal tipo di materiale. Infine, le perdite di calore stimate a fine fase di riscaldamento sono consistenti e stimate tra i 30 ed i 90 W e risultano essere crescenti con la temperatura operativa.

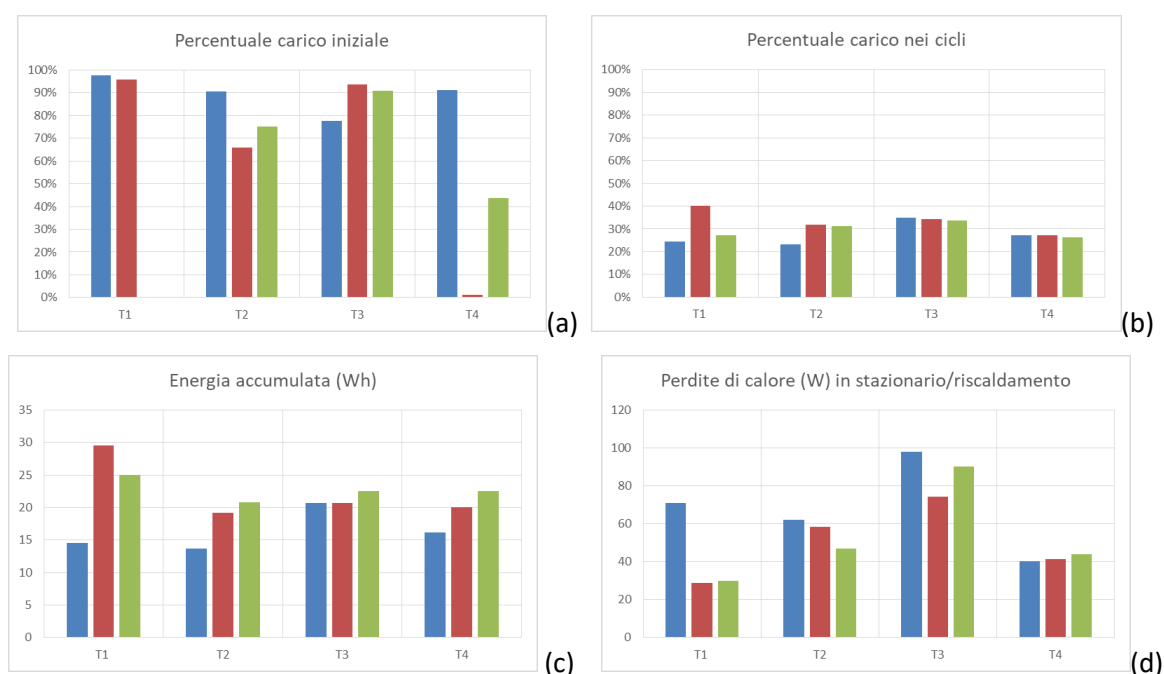


Figura 3-9 Frazione di energia caricate per la fase di riscaldamento (a) e per quella di ciclaggio dei provini. Energia caricata in un ciclo (c). Livello delle perdite di calore stimate a fine fase di riscaldamento.

Ciò che, invece, può essere analizzato è il comportamento termico dinamico dei vari materiali (trasmissione del calore). Infatti, la diffusione del calore in un materiale, legata principalmente alla sua conducibilità termica oltre che alla capacità di accumulo, è uno dei principali parametri che influenzano le prestazioni dei dispositivi di accumulo termico.

La conducibilità termica apparente, calcolata come descritto nel paragrafo precedente, è mostrata in **Figura 3-10**. Questa, risulta essere dell'ordine dei 2 W/m/°C per il materiale A ma inferiore per i materiali contenenti il 5% e 10% di PCM (B e C), rispettivamente 1.5 W/m/°C e 1.3 W/m/°C. Tali valori sembrano non risentire particolarmente della temperatura operativa anche se i massimi si ottengono intorno ai 300°C.

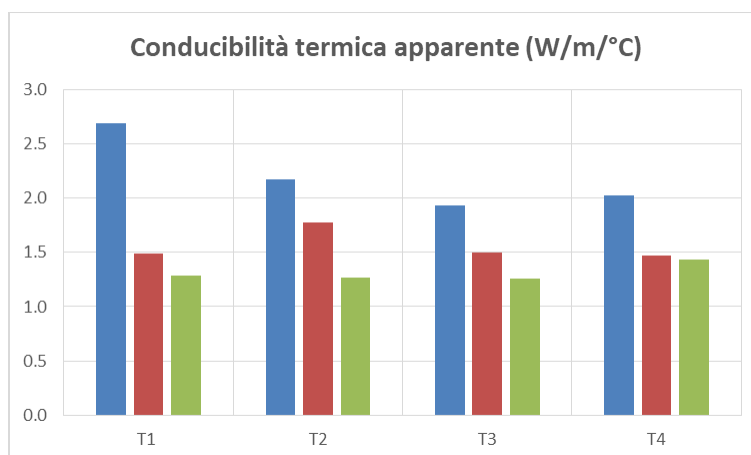


Figura 3-10 Conducibilità termica apparente in funzione del tipo di materiale e della temperatura operativa.

Tali valori risultano essere abbastanza in linea con quelli ricavati dalla caratterizzazione dei soli calcestruzzi [2], come è evidente dal loro confronto in [Tabella 3-7](#) ed in [Figura 3-11](#).

Tabella 3-7 Confronto tra la conducibilità termica calcolata dalle prove sui provini con tubo immerso e quella misurata sui soli materiali in funzione della temperatura operativa.

Parametro	Unità	Materiale A				Materiale BB				Materiale C			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
T rifer.	°C	200	260	360	200	200	260	360	200	200	260	360	200
k apparente	W/m/°C	2.69	2.17	1.94	2.03	1.49	1.78	1.50	1.47	1.28	1.26	1.26	1.43
k misurata	W/m/°C	1.69	1.94	1.62	1.69	1.60	1.44	1.37	1.60	1.12	1.07	0.96	1.12

Dal confronto si può dedurre che:

- La conducibilità termica apparente risulta essere generalmente superiore a quella misurata, anche se molto vicina. Le uniche eccezioni riguardano il materiale B;
- Il materiale A evidenzia una conducibilità termica prossima al target previsto per il materiale base, ovvero ai 2 W/m/°C;
- La conducibilità termica si riduce all'aumentare della percentuale di mEPCM: quella del materiale A è il 30% superiore a quella del materiale B ed il 66% del materiale C;
- La conducibilità termica non varia molto con la temperatura operativa. Per i materiali A e B, passando dai 200 °C ai 260 °C la conducibilità incrementa di un 5-10% per poi ridursi nuovamente oltre i 300°C. Ciò potrebbe essere dovuto ad un iniziale essiccamento (perdita di ulteriore acqua libera) tra i 200 ed i 300 °C e successivamente, oltre i 300 °C alla progressiva comparsa di fessurazioni nel materiale che ne incrementano la resistenza termica.

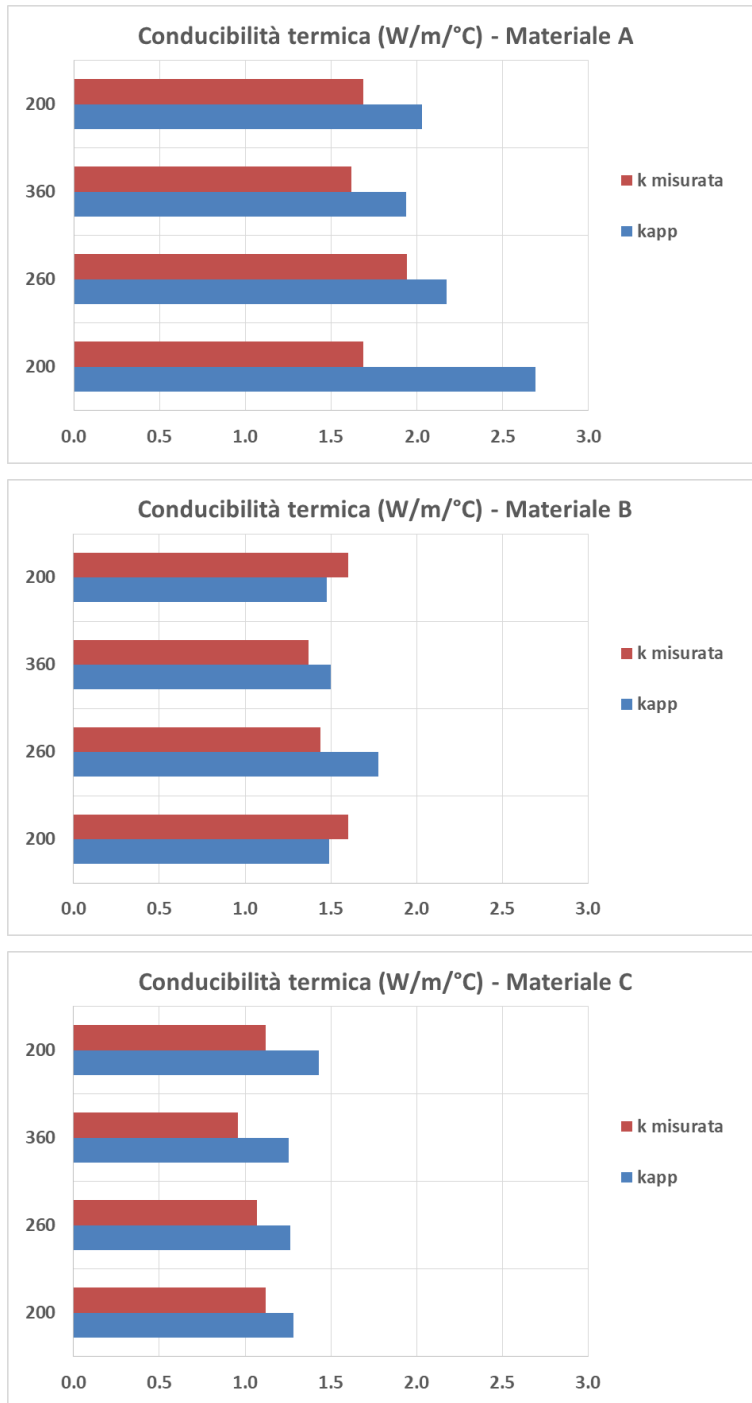


Figura 3-11 Conducibilità termica apparente e misurata in funzione del tipo di materiale e della temperatura operativa.

L'incremento della quantità di mEPCM aggiunto produce, rispetto al materiale A, una riduzione della conducibilità termica ed un, presumibile, contemporaneo incremento della capacità termica, ovvero, ad una sostanziale riduzione delle diffusività termica. Tale circostanza è anche constatabile in **Figura 3-12** dove è mostrato l'andamento delle temperature nella sezione centrale dei provini realizzati con i materiali A, B e C durante i primi due cicli tra 200 e 240 °C della prova T4. In essa, si vede chiaramente che nonostante la temperatura di set-point sia la stessa per tutte le prove e la temperatura delle termocoppie T1 molto simile, gli andamenti delle temperature in C1 ed S1 si differenziano in modo netto. Per il provino con materiale A risulta avere delle temperature molto più elevate degli altri due ed un incremento più rapido. Gli andamenti dei materiali B e C sono simili e certamente rallentati dalla presenza del PCM (cambio di fase tra 220 e 230 °C). Detto rallentamento è leggermente maggiore per il materiale C a causa della maggiore quantità di PCM presente. Ovviamente, la minore temperatura raggiunta dei materiali B e C (inferiore calore sensibile) è comunque compensata dall'energia accumulata come calore latente, non presente nel materiale A.

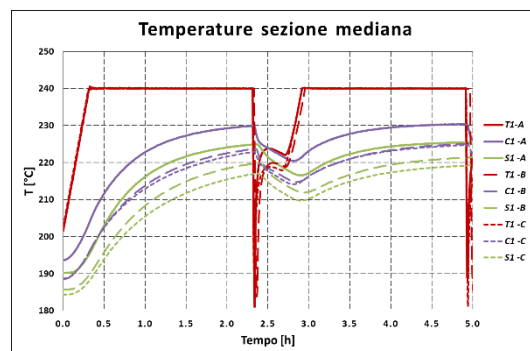


Figura 3-12 Andamento delle temperature della sezione centrale dei provini per i materiali A, B e C durante i primi due cicli della prova T4 tra 200 e 240 °C.

Il test T4 è stato eseguito come prova di durabilità dei materiali. Infatti in esso vengono eseguiti, dopo i precedenti 18 cicli relativi ai test tra 200-240°C (T1), 260-300°C (T2) e 360-400°C (T3), altri 12 cicli per verificare la ripetibilità nel tempo delle prestazioni termiche dei provini. In tutti i casi si può osservare come tutti i cicli, ad esclusione dei primi due di assestamento, si ripetano esattamente identici, evidenziando l'assenza di un progressivo deterioramento del materiale. In **Figura 3-13**, a titolo di esempio, è riportato l'andamento delle temperature della sezione centrale del provino con il materiali A durante tutta la prova T4 (a) e confronto tra i cicli 4 e 12, da cui risulta la loro sovrapposibilità.

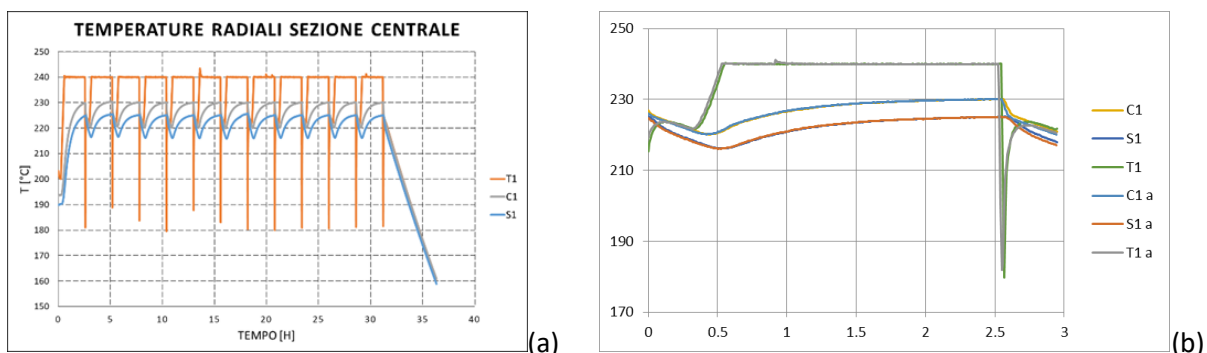


Figura 3-13 Andamento delle temperature della sezione centrale del provino con il materiali A durante tutta la prova T4 (a) e confronto tra i cicli 4 e 12.

4 Il prototipo SH02

4.1 Il concetto base

L'elemento di accumulo termico, denominato SH02, è stato dimensionato [2] sulla base sia dell'elemento SH01 sviluppato e caratterizzato in lavori precedenti [4], sia di un brevetto ENEA esistente [5].

Esso è principalmente costituito da un tubo di scambio termico metallico ed un mezzo di accumulo termico (Figura 4-1), formato da un particolare mix di calcestruzzo ed, eventualmente, una piccola quantità di PCM stabilizzato in forma (micro-incapsulato).

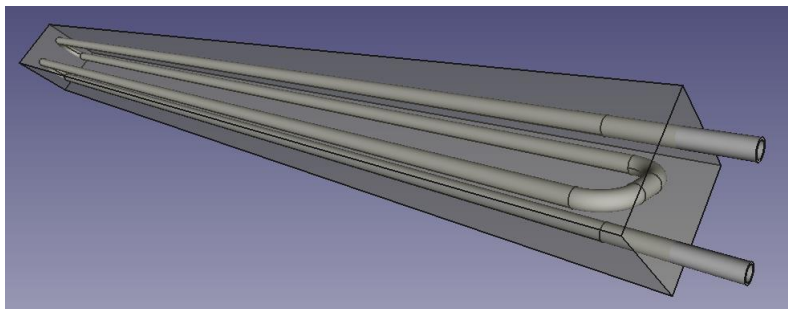


Figura 4-1 Schema di elemento di accumulo termico CLS/mEPCM.

Le specifiche tecniche attraverso le quali è possibile definire nel dettaglio il layout e le dimensioni del nuovo elemento sono riportate nel paragrafo seguente.

4.2 Il progetto di dettaglio

4.2.1 Il tubo di scambio termico

L'elemento di accumulo termico ha una forma di parallelepipedo a base quadrata (Figura 4-2). La base ha un lato di 220 mm ed il parallelepipedo ha lunghezza di 3000 mm. L'elemento occupa un volume pari a circa 0.1452 m³ ed ha una superficie esterna di 2.7368 m².

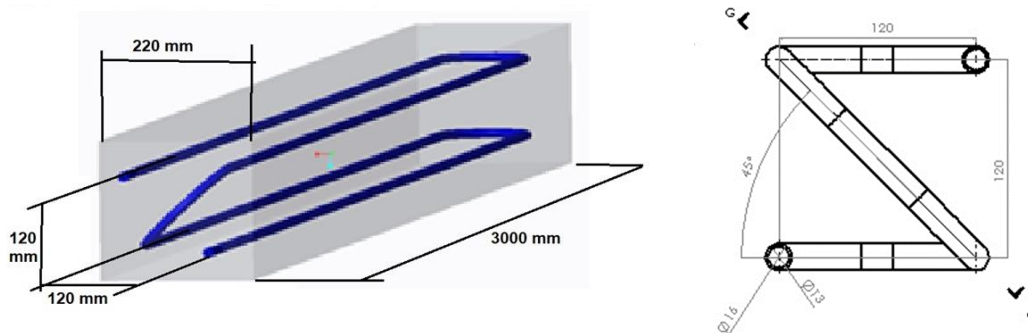


Figura 4-2 Schema di elementi di accumulo termico in calcestruzzo.

All'interno dell'elemento è immerso un tubo metallico di scambio termico a forma di serpentina, la cui configurazione è detta a "Z" (Figura 4-3). All'interno del tubo di scambio transiterà il fluido termovettore, in genere un olio diatermico, deputato alla cessione/recupero del calore al/dal mezzo di accumulo.

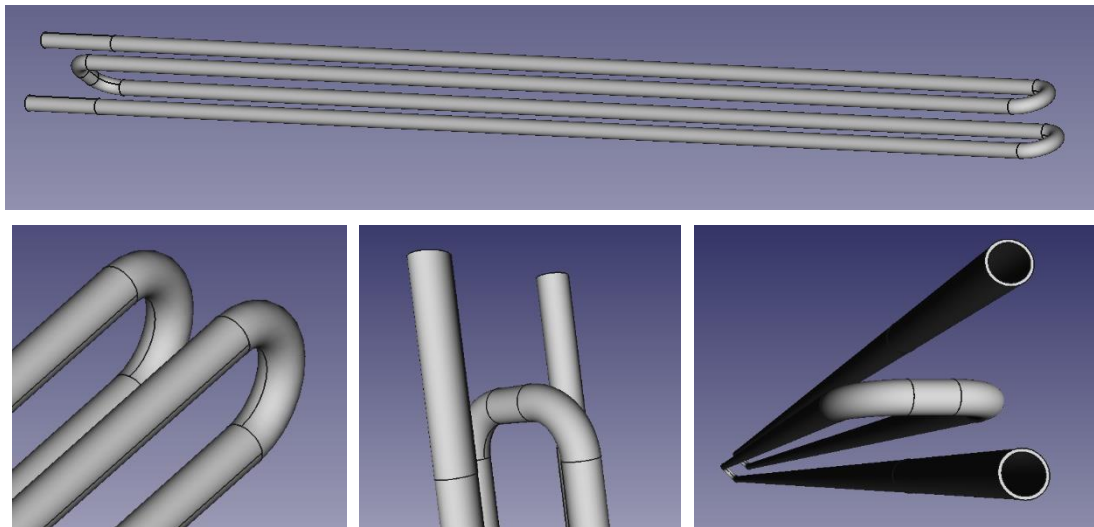


Figura 4-3 Schema di scambiatore a serpentina con configurazione a "Z".

Il tubo di scambio, realizzato in acciaio inox AISI 304, ha diametro esterno 16 mm, spessore 1.5 mm e, quindi, diametro interno di 13 mm. Esso è costituito da 4 tratti rettilinei di lunghezza 2780 mm disposti ai vertici di un quadrato di lato 120 mm (passo tra i tratti di tubo). Due tratti opposti al vertice sono prolungati verso l'esterno di circa 210 mm (ingresso e uscita fluido).

I restanti due tubi della zona ingresso/uscita sono connessi tra loro, lungo la diagonale, con 2 curve a 90° (raggio di curvatura 60 mm) e un breve tratto rettilineo (circa 49.7 mm). I 4 terminali opposti sono invece connessi a coppie tramite 2 curve a 180° (raggio di curvatura 60 mm) poste parallelamente a due lati opposto della base quadrata. La lunghezza del tubo di scambio è di circa 12.15 m (di cui 11.95 m interni all'elemento).

Il suo ingombro interno all'elemento è di circa 2.4×10^{-3} m³ ed il suo peso complessivo di circa 6.56 kg. La distanza minima tra l'asse del tubo di scambio e le pareti esterne dell'elemento è di 50 mm.

4.2.2 I ferri e le staffe

All'interno dell'elemento di accumulo, oltre il tubo di scambio termico, saranno anche presenti una serie di staffe di acciaio di rinforzo che realizzano una gabbia in grado di assicurare un cuprifero di circa 30 mm (Figura 4-4). Si utilizzeranno dei tondini in acciaio B450C di diametro nominale 8 mm.

La gabbia è costituita di due staffe longitudinali di lunghezza 6 m cadauna e 10 staffe trasversali di lunghezza 0.8 m cadauna. Il peso complessivo delle staffe è di circa 8.3 kg ed occuperanno un volume di 1×10^{-3} m³.

4.2.3 Il mezzo di accumulo

Attorno al tubo di scambio, occupando tutto il resto del volume dell'elemento di accumulo, circa 0.1417 m³, si trova il materiale cementizio utilizzato. Questo, che potrà essere di tipo A, B o C, ha mediamente un peso di circa 337.1, 336.4 e 320.9 kg rispettivamente. Il peso complessivo dell'elemento di accumulo sarà allora di circa 351.9, 351.2 e 335.9 kg rispettivamente per ciascuno dei materiali utilizzati.

Da un punto di vista energetico le tre tipologie di elementi di accumulo avranno una capacità termica nominale di 6.1, 6.6 e 7.6 kWh con una percentuale di calore latente dello 0%, 7.1% e 11.8%. L'elemento con il materiale B evidenzia, rispetto a quello con il materiale A, un incremento di capacità termica del 8.5% mentre quello con il materiale C del 15.1%.

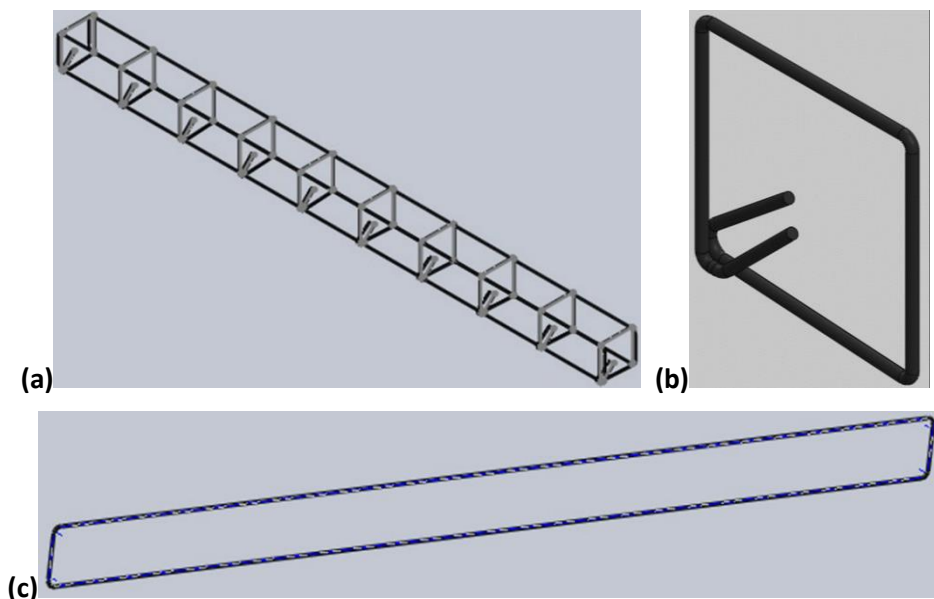


Figura 4-4 Schema del sistema di staffe dell'elemento: a) gabbia; b) staffa trasversale; c) staffa longitudinale.

4.2.4 La cassaforma

Il cassero dovrà essere dimensionato in base al disegno di progetto della trave, essere facilmente rimovibile per poter essere riutilizzabile ed avere necessaria rigidità/indeforabilità.

Qui di seguito, un esempio non vincolante di cassero (vedi Figura 4-5), potrebbe essere costituito da:

- n.1 piano base 3080x400x40 mm;
- n.2 piani longitudinali 3000x220x40 mm;
- n.2 piani trasversali 400x220x40 mm;
- n.4 angolari 220x50x50 mm.

In cui:

- I piani testa coda siano rimovibili e fissabili tramite viti;
- Il piano di testa abbia due fori da 16 mm per consentire la fuoriuscita degli estremi dello scambiatore;
- Siano presenti degli aggrappaggi intermedi per evitare la flessione delle pareti laterali lunghe a causa della pressione idrostatica del calcestruzzo fresco.

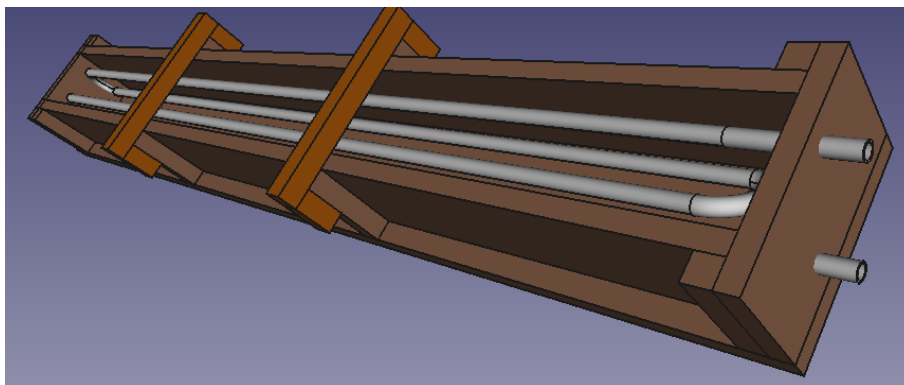


Figura 4-5 Schema del cassero ospitante il tubo di scambio termico.

4.2.5 La coibentazione

In base alle dimensioni degli elementi dovrà essere progettata una coibentazione rimovibile, costituita da pannelli in lana di roccia (tipo Rockwool) di spessore complessivo adeguato (circa 400 mm).

In **Figura 4-6** uno schema di massima dell'elemento base di accumulo termico coibentato. Chiaramente, la realizzazione finale dipenderà fortemente dal tipo di supporto strutturale dell'elemento in oggetto.

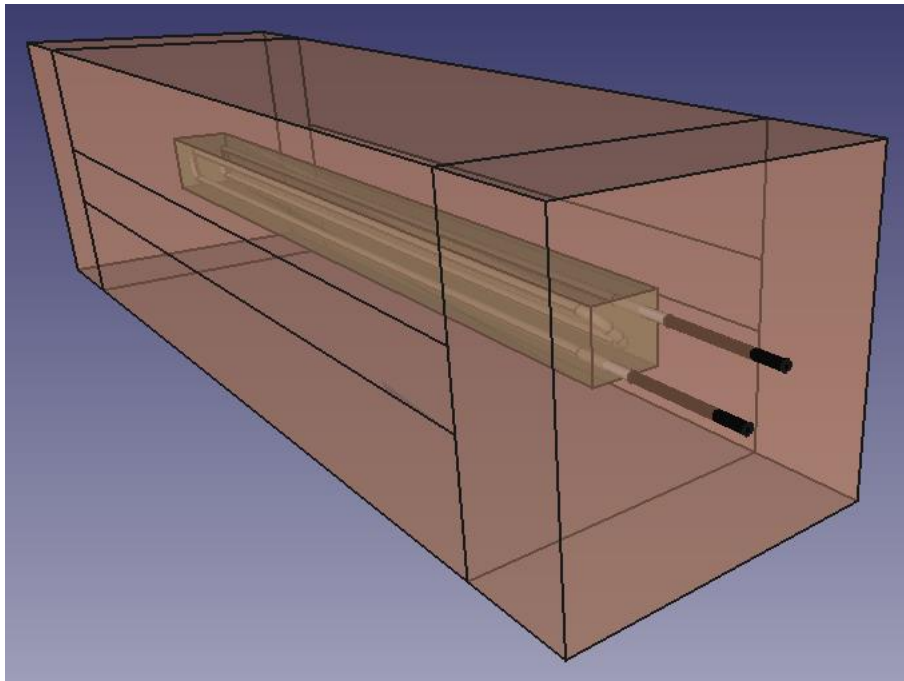


Figura 4-6 Schema di massima della coibentazione di un elemento base di accumulo in calcestruzzo.

5 La realizzazione del prototipo SH02

In questo paragrafo si riportano le varie fasi e modalità di realizzazione del prototipo SH02. Tale realizzazione è stata diretta da ENEA ed eseguita da Cipiccia Calcestruzzi (CC) secondo le specifiche tecniche riportate nel paragrafo precedente. La ditta CC ha curato la progettazione esecutiva dell'elemento di accumulo ed eseguito la realizzazione.

5.1 Il tubo di scambio termico

Il tubo di scambio termico è stato fatto realizzare da una ditta terza, la Nuova Steim di Narni (TR), nel pieno rispetto delle specifiche tecniche stabilite.

5.2 I ferri e le staffe

La gabbia di rinforzo, costituita da due staffe longitudinali e dieci staffe trasversali, utilizzando un tondino da 8 mm, è stata realizzata direttamente da CC sulla base della progettazione eseguita.

5.3 La cassaforma

Anche la cassaforma, interamente realizzata in legno, è stata realizzata da una falegnameria di fiducia di CC. Il cassero è perfettamente conforme alle specifiche tecniche stabilite. Gli aggrappaggi intermedi sono stati invece realizzati da CC in metallo. In si può vedere una foto del cassero con all'interno il tubo di scambio termico e la gabbia di rinforzo.



Figura 5-1 Foto del cassero in legno completo di aggrappaggi metallici. All'interno del cassero sono visibili il tubo di scambio termico e la gabbia di rinforzo.

5.4 Le termocoppie interne

Quattro termocoppie, fornite da ENEA, sono state posizionate all'interno del calcestruzzo in corrispondenza dell'asse dell'elemento di accumulo. Il posizionamento è stato realizzato ancorando le termocoppie tramite fascette plastiche su apposite piastrine saldate sulle staffe trasversali n. 1, 4, 7 e 10.

In pratica, la loro distanza da uno dei due fondi è di circa 50, 1017, 1984 e 2950 mm.

5.5 Getto, scasseramento e stagionatura

Il getto e la vibrazione verranno effettuati con le modalità standard facendo particolare attenzione ad evitare la formazione di bolle di aria e la rimozione delle termocoppie. In particolare, disponendo di un miscelatore di dimensioni limitate si è deciso di effettuare tre gettate separate ma in rapida successione. Dopo ogni gettata il calcestruzzo è stato vibrato tramite un vibratore manuale. Al termine dell'ultima gettata si è proceduto al livellamento della superficie libera.



Figura 5-2 Sequenza relativa alle tre gettate separate. Nelle prime due si nota l'azione di vibratura del calcestruzzo mentre l'ultima è stata fatta dopo la vibratura e livellamento del materiale.

Alla fine di questa fase sono stati serrati sul cassero gli aggrappaggi anti-deformazione.

Lo scasseramento è avvenuto dopo 4 giorni per l'elemento con materiale A e 15 giorni per quelli B e C (con mEPCM). Ciò è dovuto alla elevata resistenza al rilascio dell'acqua libera che manifestano i materiali contenenti il mEPCM.

La stagionatura è stata effettuata, come d'abitudine, a 28gg.

5.6 La coibentazione

La realizzazione della coibentazione è stata realizzata dalla ditta Pontani S.r.L su commessa della Cipiccia Calcestruzzi S.p.A secondo le specifiche elaborate in precedenza. Per realizzare gli spessori indicati (circa 400 mm) sono stati utilizzati dei pannelli Rockwool ProRox® SL 960 (dimensione 600 x 1000 mm e spessore 100 mm).

Con tali pannelli si è rivestito un carrello in dotazione ad ENEA creando una sorta di sarcofago apribile e quindi riutilizzabile. Il tutto è stato quindi protetto con un opportuno lamierino.

In **Figura 5-3** è mostrata la coibentazione realizzata e le varie fasi di assemblaggio.



Figura 5-3 Sequenza fotografica relativa alla realizzazione e messa in opera del sistema di coibentazione riutilizzabile per gli elementi di accumulo termico SH02. (a) carrello di supporto; (b) coibentazione di base; (c) alloggio per elemento; (d) coibentazione laterale; (e) movimentazione elemento per alloggiamento; (f) Coibentazione completata

6 Conclusioni

Il questo documento si è descritto il lavoro fatto per arrivare alla realizzazione di tre elementi base di accumulo termico di tipo ENEA-TES-SH02 con un mezzo di accumulo in calcestruzzo contenente differenti quantità di PCM micro-incapsulato.

La prima fase del lavoro è stata dedicata alla caratterizzazione termica preliminare in temperatura, attraverso un ciclaggio termico di carico e scarico del calore tra i 200 ed i 400°C, di tre provini con tubo immerso. Tale fase ha consentito di avere delle conferme e delle ulteriori indicazioni circa le prestazioni dei materiali da analizzare in un regime transitorio, con particolare riferimento alla loro conducibilità e diffusività termica.

Sulla base di questa e delle precedenti caratterizzazioni, oltre che delle specifiche elaborate per gli elementi base di accumulo, si è potuto passare alla progettazione di dettaglio degli elementi SH02 e degli accessori quali la cassaforma per il getto del calcestruzzo e la coibentazione necessaria alle prove termiche sugli elementi stessi.

Infine, si è documentata la fase di realizzazione dei componenti progettati, effettuata con il supporto della ditta Cipiccia Calcestruzzi di Narni (Terni). Gli elementi base realizzati sono stati quindi trasportati, dopo la relativa stagionatura, presso l'ENEA Casaccia, insieme ai componenti della coibentazione.

Gli elementi SH02 sono perciò pronti ad essere sottoposti ad una dettagliata caratterizzazione termica utilizzando l'impianto sperimentale Solteca3.

Questo sarà l'oggetto della seconda fase della presente linea di attività.

Riferimenti bibliografici

- 1 A. Miliozzi, E. Veca, D. Mele, R. Liberatore, D. Nicolini Produzione di nuovi provini cilindrici con materiale composito PCM, Report RdS_PTR2020_180
- 2 A. Miliozzi, E. Veca, D. Mele, R. Liberatore, D. Nicolini, Caratterizzazione termica ed analisi comparativa di provini con materiale composito PCM, Report RdS_PTR2020_181
- 3 R. Liberatore, A. Miliozzi, D. Nicolini, G. Napoli, G. Giorgi, Messa a punto impianto Solteca3, Report RdS_PTR2020_182
- 4 D. Mazzei, G. Giorgi, R. Liberatore, G. Napoli, A. Miliozzi, Caratterizzazione termica di un elemento di accumulo termico realizzato con calcestruzzo base a temperature medio-alte a seguito di un ripetuto carico ciclico, Report RdS/PAR2019/118.
- 5 A. Miliozzi, GM. Giannuzzi, D. Mazzei, R. Liberatore, T. Crescenzi, D. Mele, "Dispositivo di accumulo termico, sistema modulare incorporante il dispositivo e relativo metodo di realizzazione". Brevetto N. 860/ENEA e n. 102017000129902 presentato il 14/11/2017
- 6 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, ENEA.

Abbreviazioni ed acronimi

CLS	Calcestruzzo
TES	Thermal Energy Storage (Accumulo termico)
PCM	Phase Change Material (Materiale a cambiamento di fase)
mEPCM	micro-Encapsuled PCM (PCM micro-incapsulati)
SSPCM	Shape-Stabilized PCM (PCM