



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione termica ed analisi comparativa di provini con materiale composito PCM

A. Miliozzi, E. Veca, D. Mele, R. Liberatore, D. Nicolini

Report RdS_PTR2020_181

CARATTERIZZAZIONE TERMICA ED ANALISI COMPARATIVA DI PROVINI CON MATERIALE COMPOSITO PCM

A. Miliozzi, E. Veca, D. Mele, R. Liberatore, D. Nicolini

Dicembre 2020

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II 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: LA2.4 Sviluppo e caratterizzazione di materiali con proprietà termiche incrementate per accumulo termico in calcestruzzo.

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Pacco di Lavoro: Raffaele Liberatore, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
2.1 CARATTERIZZAZIONE TERMICA E MECCANICA DI PROVINI CILINDRICI PIENI.....	7
2.1.1 <i>Degassaggio e condizionamento termico dei provini cilindrici</i>	7
2.1.1.1 La procedura.....	7
2.1.1.2 La fase preliminare.....	7
2.1.1.3 Il degassaggio.....	8
2.1.1.4 Il condizionamento termico.....	10
2.1.2 <i>Caratterizzazione termica e meccanica dei nuovi materiali</i>	11
2.1.2.1 Densità del materiale.....	11
2.1.2.2 Caratterizzazione termica.....	13
2.1.2.3 Caratterizzazione meccanica.....	18
2.1.3 <i>Analisi comparativa con soluzione precedente</i>	22
2.2 DIMENSIONAMENTO E SPECIFICHE TECNICHE PER UN ELEMENTO DI ACCUMULO TERMICO IN CALCESTRUZZO.....	27
2.2.1 <i>Dimensionamento</i>	27
2.2.2 <i>Specifiche di progetto</i>	29
2.2.3 <i>Il codice di calcolo</i>	30
2.2.4 <i>La geometria</i>	30
2.2.5 <i>I materiali</i>	31
2.2.5.1 Il fluido termovettore (HTF).....	31
2.2.5.2 Il materiale a base cementizia.....	31
2.2.6 <i>Le condizioni al contorno</i>	31
2.2.6.1 Condizione di carico.....	32
2.2.6.2 Perdite di calore verso l'esterno.....	32
2.2.6.3 Campo termico iniziale.....	32
2.2.7 <i>Modelli FEM e tipi di analisi</i>	32
2.2.7.1 Il mesh.....	33
2.2.8 <i>Calcoli e risultati</i>	34
2.2.8.1 Confronto tra le configurazioni a "C" ed a "Z".....	34
2.2.8.2 Confronto tra i tre differenti mezzi di accumulo.....	36
3 CONCLUSIONI.....	39
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	41
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	42
APPENDICE 1: DISTINTA BREVETTO N. ENEA 860.....	43
APPENDICE 2: PRINCIPALI RISULTATI SIMULAZIONE NR 1.....	44
APPENDICE 3: PRINCIPALI RISULTATI SIMULAZIONE NR 2.....	46
APPENDICE 4: PRINCIPALI RISULTATI SIMULAZIONE NR 3.....	48
APPENDICE 5: PRINCIPALI RISULTATI SIMULAZIONE NR 4.....	50

Sommario

Nel presente documento è stata riportata la seconda parte del lavoro svolto all'interno della linea di attività LA2.4 del PAR2020, finalizzata alla caratterizzazione sia termica che meccanica dei nuovi materiali compositi, costituiti da nuove miscele di calcestruzzi additivati con un PCM micro-incapsulato (mEPCM), sviluppati nella prima parte, ed alla analisi e dimensionamento di un prototipo utilizzando detta tipologia di materiali, da realizzare successivamente. Con tali materiali sono stati realizzati numerosi provini cilindrici pieni che sono stati oggetto di caratterizzazione sia termica che meccanica, per verificarne l'utilizzo come mezzi di accumulo termico operanti fino a temperature di circa 300°C. Le proprietà dei provini sono state misurate dopo trattamento degli stessi a diverse temperature di riferimento.

La caratterizzazione delle tre miscele sviluppate (A, senza mEPCM; B, con il 5%wt di mEPCM; C, con il 10%wt di mEPCM) ha evidenziato come: i) il mix A sia un mix base con buone caratteristiche sia termiche che meccaniche; ii) il mix B abbia una migliore capacità termica ma inferiori proprietà di scambio e trasmissione del calore e di resistenza meccanica; iii) il mix C incrementi ancora la capacità termica mentre peggiora le altre caratteristiche legate alla conducibilità termica e alla resistenza meccanica. Per tutti i materiali sono generalmente identificabili tre diversi tipi di comportamento in funzione della temperatura di condizionamento: i) al di sotto dei 200°C, dove i pori del calcestruzzo e, ove presente, quelli del mEPCM presentano un buon contenuto di acqua libera che li riempie parzialmente; ii) tra i 200°C ed i 300°C, dove l'acqua libera è evaporata o continua ad evaporare, creando una serie di vuoti interni al materiale; iii) al di sopra dei 300°C, dove inizia ad essere estratta anche parte dell'acqua legata, riducendo la presa tra cemento ed aggregati e deteriorando il materiale. Tali materiali sono stati anche messi a confronto con analoghi materiali realizzati in anni precedenti rivelando di essere dotati di migliori caratteristiche sia per quanto concerne lo scambio e la trasmissione del calore sia la resistenza meccanica.

In parallelo, è stato dimensionato, progettato ed analizzato un elemento di accumulo termico modulare, denominato ENEA-TES-SH02, utilizzando un materiale dello stesso tipo di quelli qui caratterizzati. Esso è stato dimensionato sulla base delle indicazioni di un precedente brevetto ENEA (n.860 del 2017) e sono state formulate delle specifiche tecniche per la sua realizzazione. Inoltre, attraverso una analisi numerica FEM si è analizzato il suo comportamento termico e verificata la bontà delle scelte effettuate.

Il lavoro impostato dovrà proseguire attraverso una attenta caratterizzazione termica dei materiali sviluppati in temperatura, invece che come post-trattamento termico, attraverso l'utilizzo dei provini cilindrici con tubo immerso, realizzati nella prima parte dell'attività, installati sull'impianto Solteca-Air. Quindi, verranno realizzati gli elementi di accumulo dimensionati in precedenza e caratterizzati termicamente con l'impianto sperimentale Solteca3 realizzato presso l'ENEA Casaccia. Tutto ciò farà parte della linea di attività LA 2.12 "Sviluppo e caratterizzazione di elementi di accumulo termico in calcestruzzo con proprietà termiche incrementate" del PAR2021.

1 Introduzione

Il presente studio è parte integrante del lavoro previsto nell'ambito della Linea di Attività LA4, relativa allo "Sviluppo e caratterizzazione di materiali con proprietà termiche incrementate per accumulo termico in calcestruzzo". Tale attività rientra nel WP2 "Accumulo termico" del Progetto "Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti", afferenti al PAR2020 dell'Accordo di Programma ENEA-MISE 2019-2021.

In una prima fase di questa attività, documentata in [1], sono stati studiati e realizzati una serie di nuovi materiali compositi, costituiti da nuove miscele di calcestruzzi additivati con un PCM stabilizzato in forma (SS-PCM, Shape Stabilized PCM).

Con tali materiali sono stati realizzati numerosi provini cilindrici pieni che sono stati oggetto di caratterizzazione sia termica che meccanica, per verificarne l'utilizzo come mezzi di accumulo termico operanti fino a temperature di circa 300°C.

In parallelo, verrà dimensionato, progettato ed analizzato un elemento di accumulo termico modulare, denominato ENEA-TES-SH02, in composito cementizio. Elementi di questo tipo saranno realizzati, con diversi materiali, e caratterizzati termicamente, utilizzando l'impianto Solteca3 realizzato presso l'ENEA Casaccia nel prossimo PAR2021, linea di attività LA 2.12 "Sviluppo e caratterizzazione di elementi di accumulo termico in calcestruzzo con proprietà termiche incrementate".

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Caratterizzazione termica e meccanica di provini cilindrici pieni

2.1.1 Degassaggio e condizionamento termico dei provini cilindrici

Tutti i provini cilindrici pieni prodotti, prima di essere caratterizzati sia termicamente che meccanicamente, sono stati sottoposti ad una fase di degassaggio (eliminazione dell'acqua libera) ed a un trattamento termico a una delle temperature previste dal progetto (200 o 300 o 400 °C).

2.1.1.1 La procedura

La procedura per il degassaggio e il condizionamento termico di provini in calcestruzzo consta di tre fasi distinte:

- Fase preliminare: misurazione delle dimensioni e del peso;
- Fase di degassaggio: eliminazione dell'acqua libera presente nel calcestruzzo;
- Fase di condizionamento termico: trattamento ad una determinata temperatura.

2.1.1.2 La fase preliminare

Obiettivo di questa fase è quello di identificare e misurare le dimensioni ed il peso dei provini cilindrici pieni realizzati, secondo quanto suggerito dalla EN 12390-1 [2] ed EN 12390-7 [7]. I provini saranno 30 per ogni serie realizzata.

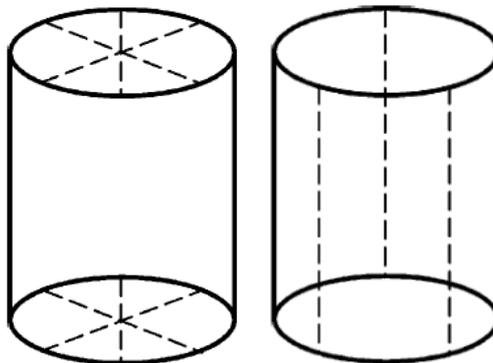


Figura 2-1 Linee di riferimento per la misura delle dimensioni di un provino secondo normativa

La procedura consta dei seguenti passi:

0. Inizio;
1. Identificare il provino;
2. Analisi dello stato di ogni provino segnalando e fotografando eventuali difetti (cricche) che possono essere rilevanti;
3. Tracciare su una sezione circolare di 3 diametri ruotati di circa 60° l'uno dall'altro e, in corrispondenza di essi, di 3 altezze sul lato cilindrico (**Figura 2-1**);
4. Misurare i 3 diametri con un calibro possibilmente digitale;
5. Misurare le 3 altezze con un calibro possibilmente digitale;
6. Pesare il provino con una bilancia di precisione;
7. Ritornare al punto 1 finché non sono terminati i provini, poi proseguire;

8. Selezionare i provini identificati con i numeri da 01 a 03 (i primi 3 di ogni tipologia, in tutto 6). Questi non vanno sottoposti ad alcun trattamento. La loro temperatura di riferimento sarà quella ambiente;
9. Avvolgere i provini selezionati in una pellicola trasparente “impermeabilizzante”, per evitare il possibile riassorbimento dell’umidità ambiente;
10. Degassare i provini successivi;
11. Fine.

Il materiale utilizzato in questa fase è: un pennarello indelebile, un calibro, una macchina fotografica, una bilancia di precisione (Kern PRJ 6200-2M) ed un rotolo di pellicola trasparente.

2.1.1.3 Il degassaggio

La procedura di degassaggio dei provini si basa sull’utilizzo di una camera climatica (Sunrise modello SU340 della ditta Angelantoni).



Figura 2-2 Camera climatica Sunrise SU340 Angelantoni e disposizione di alcuni provini

Il processo di degassaggio in camera climatica consta sostanzialmente di cinque passi:

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 mantiene l’umidità relativa pari al 20%;
4. La temperatura è nuovamente incrementata passando dagli 80°C ai **105°C** in **50 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 **105°C** per circa **10 ore** al fine di completare l’operazione di degassaggio;
6. La temperatura è quindi portata dai 105°C ai **28°C** in **2.5 ore**, con un rateo di discesa di circa 0.5°C/min. L’umidità relativa è settata sempre al 20%.

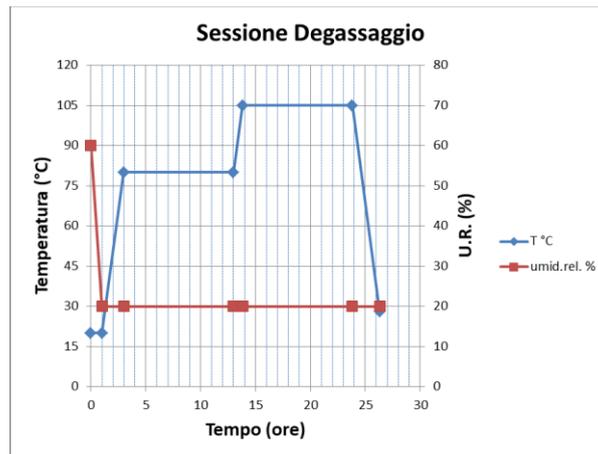


Figura 2-3 Andamento della temperatura e dell'umidità relativa di set-point.

Tabella 2-1 Andamento temperatura e umidità relativa di set-point per il degassamento.

tempo	T	umid.rel.
ore	°C	%
0.00	20	60
1.00	20	20
3.00	80	20
13.00	80	20
13.83	105	20
23.83	105	20
26.33	28	20

Nel caso dei provini cilindrici pieni, la procedura completa può essere così descritta:

0. Inizio ;
1. Posizionare i provini (24 per ogni tipologia) in camera climatica equamente distribuiti sui due piani e distanziati;
2. Impostare la camera per l'esecuzione del ciclo di degassaggio ed esegui;
3. Raffreddare i provini, estrazione e se necessario ripristinare le scritte identificative;
4. Effettuare una analisi visiva di un provino segnalando e fotografando eventuali difetti (cricche) che possono essere rilevanti;
5. Pesare il provino;
6. Tornare al punto 4 finché non sono terminati i provini, poi proseguì;
7. Avvolgere i provini in una pellicola trasparente "impermeabilizzante", per evitare il possibile riassorbimento dell'umidità ambiente;
8. Selezionare i provini identificati con i numeri da 04 a 06 (3 per ogni tipologia, 6 in totale): questi hanno terminato il loro trattamento. La loro temperatura di riferimento sarà di 105°C. Gli altri provini saranno invece assoggettati ai trattamenti termici successivamente descritti;
9. Fine.

2.1.1.4 Il condizionamento termico

I restanti provini cilindrici pieni (18 per tipologia di materiale e a gruppi di 6) sono stati trattati termicamente a 200, 300 e 400°C, utilizzando un forno programmabile modello LHT-6/120 della Carbolite.



Figura 2-4 Forno CARBOLITE modello LHT-6/120 e disposizione di alcuni provini.

La temperatura di set-point ipotizzata varia secondo gli schemi seguenti, in cui si è ipotizzato che la temperatura minima del forno sia comunque intorno ai 50 °C.

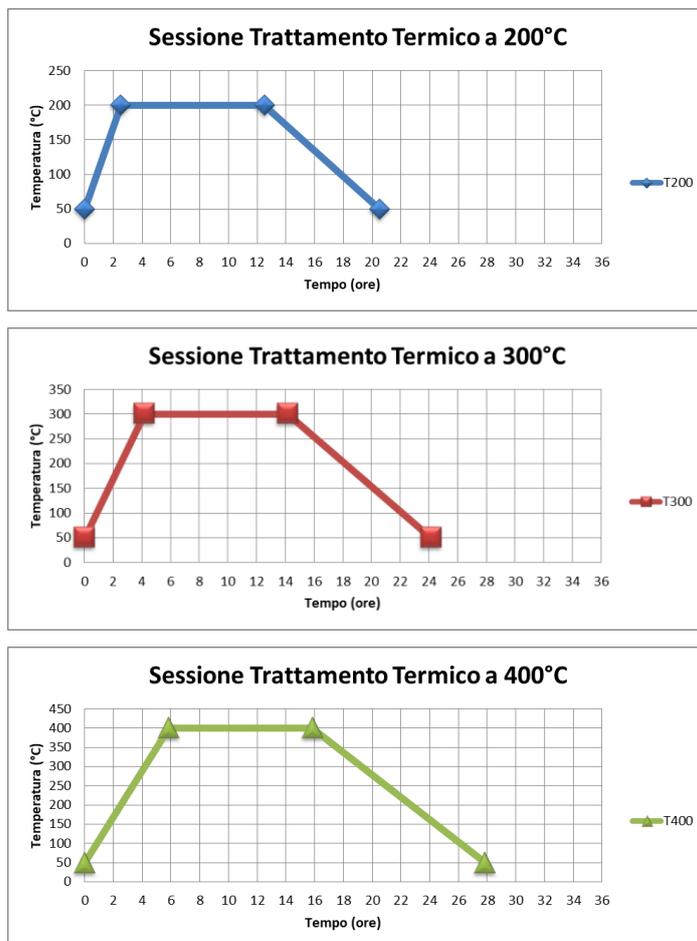


Figura 2-5 Andamento della temperatura di set-point durante le fasi di trattamento termico a 200°C, 300°C e 400°C.

Tabella 2-2 Principali parametri di set-point per le fasi di trattamento termico a 200°C, 300°C e 400°C.

T200	Step	1	2	3
Programma T	Unit	Rampa	Stasi	Fine
Set point	°C	200		Reset
Velocità	°C/min	1		
Durata	min		600	
Tempo tot 20.50 h	ore	2.50	10	8
T300	Step	1	2	3
Programma T	Unit	Rampa	Stasi	Fine
Set point	°C	300		Reset
Velocità	°C/min	1		
Durata	min		600	
Tempo tot. 24.17 h	ore	4.17	10	10
T400	Step	1	2	3
Programma T	Unit	Rampa	Stasi	Fine
Set point	°C	400		Reset
Velocità	°C/min	1		
Durata	min		600	
Tempo tot 27.83 h	ore	5.83	10	12

La procedura, da ripetere 3 volte per ciascuna tipologia, facendo assumere a T_0 i valori di 200, 300 e 400 °C può essere così descritta:

0. Inizio;
1. Posizionare in forno 6 provini pieni dopo aver rimosso la pellicola;
2. Impostare il forno per l'esecuzione del ciclo di trattamento alla temperatura di T_0 ;
3. Eseguire il ciclo di condizionamento a T_0 ;
4. Raffreddare i provini e ripristinare, se necessario, le scritte identificative;
5. Effettuare analisi visiva dei provini estratti segnalando e fotografando eventuali difetti (cricche) che possono essere rilevanti;
6. Pesare i provini;
7. Avvolgere in una pellicola trasparente "impermeabilizzante", per evitare il possibile riassorbimento dell'umidità;
8. Fine.

2.1.2 Caratterizzazione termica e meccanica dei nuovi materiali

I provini pieni di calcestruzzo e calcestruzzo con mEPCM dovranno essere oggetto di una serie di caratterizzazioni atte a definire le proprietà sia termiche che meccaniche, sia a freddo che dopo una fase di degassaggio ed una di condizionamento termico alle temperature previste dal progetto (20°C, T ambiente; 105°C, T massima degassaggio; 200°C; 300°C e 400°C).

2.1.2.1 Densità del materiale

La densità dei vari mix-design è stata calcolata come rapporto tra peso/volume, questo ultimo è stato stimato come valore medio delle 3 altezze e 3 diametri misurati per ogni provino di cemento, seguendo la procedura illustrata in precedenza. In Tabella 2-3 sono riportate le densità medie per i provini pieni stagionati

(20°C), per quelli degassati (105°C) e per quelli trattati termicamente rispettivamente a 200, 300 e 400°C. Dette densità sono anche messe a confronto con quelle iniziali derivate dalle formule dei tre mix-design.

Tabella 2-3 Densità dei mix-design per il calcestruzzo fresco e stagionato ed in funzione della temperatura di trattamento termico.

Densità	Formula	20°C*	105°C**	200°C	300°C	400°C
Mat. A	2435.0	2378.0	2327.1	2256.7	2245.0	2228.3
dev_st	-	25.4	22.9	21.6	16.4	29.3
var_peso	2.40%	-	-2.14%	-5.10%	-5.59%	-6.29%
Mat. B	2305.0	2373.0	2323.3	2198.3	2198.3	2180.0
dev_st	-	17.4	18.1	14.7	27.1	19.0
var_peso	-2.87%	-	-2.09%	-7.36%	-7.36%	-8.13%
Mat. C	2206.0	2264.7	2202.5	2075.0	2045.0	2030.0
dev_st	-	56.5	37.4	28.8	48.9	42.4
var_peso	-2.59%	-	-2.75%	-8.38%	-9.70%	-10.36%

*valore medio di tutti i provini; **valore medio di tutti i provini che hanno effettuato il degassamento.

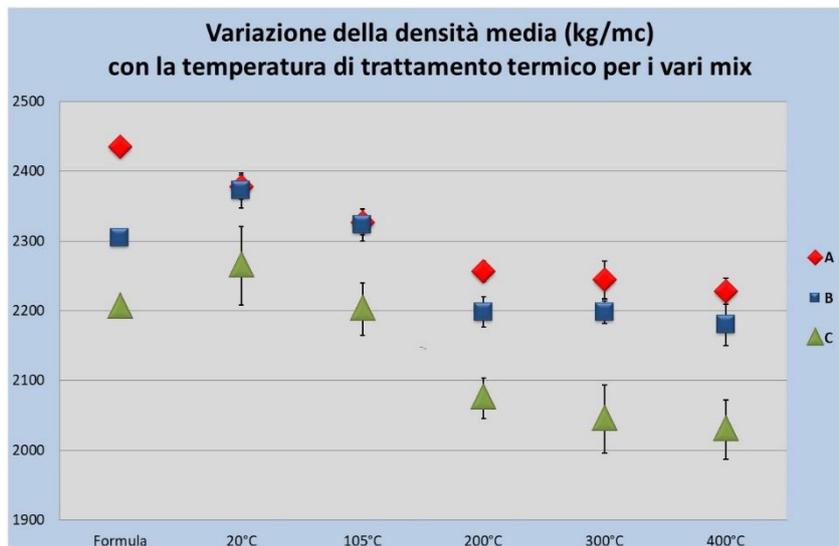


Figura 2-6 Densità dei vari mix-design per il calcestruzzo fresco e stagionato ed in funzione della temperatura di trattamento termico.

Esaminando i risultati ottenuti si possono fare le seguenti considerazioni:

- Provini tipo A:
 - La densità dei provini stagionati è di circa 2378kg/m³ ed inferiore del 2.5% rispetto a quella della formula, ciò è dovuto alla perdita di acqua libera durante i 28gg di stagionatura;
 - Dopo il degassamento si nota un'ulteriore calo in peso del 2.1% a cui si aggiunge un ulteriore calo del 3% dopo il trattamento a 200°C;
 - Quest'ultimo valore di densità rimane costante anche dopo il trattamento a 300°C, segno di assenza di ulteriore acqua libera disponibile, mentre torna a calare, circa dello 0.7%, dopo il trattamento a 400°C, dove probabilmente si inizia ad estrarre anche parte dell'acqua legata;
 - Sono identificabili tre zone diverse: i) quella tra i 20 ed i 105 °C, in cui si ha perdita costante dell'acqua libera; ii) quella tra i 200 ed i 300 °C dove l'acqua libera presente è ormai molto limitata;

- iii) quella oltre i 400°C, dove si inizia ad estrarre anche parte dell'acqua di legame con conseguente inizio di deterioramento del materiale;
- Il trattamento a 105 °C avrebbe dovuto estrarre la maggior parte dell'acqua libera presente nel calcestruzzo. Invece, dopo il trattamento a 200 °C è stata estratta una quantità di acqua libera anche superiore alla precedente. Ciò è indice del fatto che o la temperatura di degassamento dovrebbe essere maggiore di 105°C o che i tempi di trattamento sono troppo brevi (attualmente isoterma per 10 ore). Probabilmente occorrerà rivedere entrambi i parametri;
- Provini tipo B (con 5%wt di mEPCM):
 - Per tale materiale si possono individuare le stesse tre zone di comportamento precedenti;
 - Nella prima zona, il calcestruzzo stagionato ha una densità di circa 2373kg/m³. Tale densità, come quella dopo degassamento, risulta essere molto prossima a quella del cls senza mEPCM e superiore a quella calcolata tramite la formula della miscela. Ciò costituisce una anomalia le cui cause andrebbero verificate. Ciò potrebbe essere causato da un valore di densità non corretto assegnato al mEPCM (1400kg/m³) oppure da un anomalo assorbimento di acqua durante la stagionatura (invece di perdita);
 - La presenza di molta acqua libera è anche testimoniata da calo di peso molto importante che avviene dopo il trattamento a 200°C: oltre il 7% rispetto ai provini stagionati dello stesso tipo e il 2% circa rispetto a quelli di tipo A dopo lo stesso trattamento;
- Provini tipo C (con 10%wt di mEPCM):
 - I comportamenti delle densità per questo materiale ricalcano sostanzialmente quelli del materiale di tipo B con la differenza che i valori sono molto più bassi, indice della probabile presenza di acqua libera in un mezzo con maggiore porosità;
 - La maggiore presenza di acqua è anche testimoniata dal forte calo in peso che avviene dopo il trattamento a 200°C e che prosegue anche dopo quello a 300°C.

2.1.2.2 Caratterizzazione termica

Le principali proprietà termofisiche misurate per i diversi materiali sono:

- Densità;
- Conducibilità termica;
- Capacità termica volumetrica (solo calore sensibile);
- Diffusività termica.

Da queste proprietà termofisiche, sono stati valutati tre parametri essenziali:

- Calore specifico;
- Effusività termica.
- Calore latente (valutata in base alla quantità di PCM, vedi [1]).

Le misure in questione sono state eseguite mediante un apposito apparato di misura, ISOMET, modello 2104, rappresentato in [Figura 2-7](#). Per ognuno dei provini in cemento misurati sono state acquisite le misure relative a tre punti differenti di una superficie liscia di base.



Figura 2-7 Dispositivo di misura della conducibilità termica (ISOMET, mod.2104).

Per la misura è stato utilizzato un probe a membrana, il quale è stato direttamente sovrapposto al lato liscio di ogni provino e pressappoco al centro della superficie. Ogni materiale è stato sottoposto al test per almeno quattro volte: ogni provino inviato è stato sottoposto a prova sulle due basi del cilindro. Il range di conducibilità di suddetta sonda è compreso tra 0.30 W/mK e 2 W/mK. I test effettuati hanno consentito di ottenere in output i valori della conducibilità termica (k), della capacità termica specifica di volume (C) e della diffusività termica (α). Questa ultima è dedotta dalle altre due. Sono stati, quindi, calcolati il calore specifico (c_p) e l'effusività (ϵ).

La capacità termica specifica (o calore specifico) si calcola dalla capacità termica volumetrica tenendo conto del fatto che la densità del materiale (misurata nella fase preliminare) diminuisce con l'aumentare del contenuto di mEPCM nella matrice, secondo la relazione seguente:

$$c_p [J K^{-1} kg^{-1}] = C_v [J K^{-1} m^{-3}] / \rho [kg m^{-3}]$$

La diffusività termica α (o inerzia in trasmissione) è un indicatore dinamico di prestazione. Fisicamente, indica la velocità con cui il profilo di temperatura si muove attraverso il materiale. Valori elevati di diffusività termica consentono ai materiali di trasmettere le fluttuazioni del flusso di calore perimetrale più rapidamente rispetto ai materiali con valori corrispondentemente bassi. La diffusività termica è il rapporto tra la conducibilità termica e la capacità di calore volumetrico ed è calcolata secondo l'equazione:

$$\alpha [m^2 s^{-1}] = \frac{k [W K^{-1} m^{-1}]}{\rho [kg m^{-3}] * c_p [J K^{-1} kg^{-1}]}$$

dove k è la conducibilità termica, ρ la densità e c_p il calore specifico (ovvero la capacità di accumulo di calore di un materiale per unità di volume).

Anche l'effusività termica ϵ (o inerzia di assorbimento) è un indicatore dinamico di prestazione: indica la sua capacità di scambiare energia termica con il suo ambiente. Essa combina la capacità volumetrica di calore con la conducibilità termica di un materiale bulk. Una elevata effusività termica è caratterizzata da una elevata conducibilità termica ed una elevata massa termica. Maggiore è l'effusività termica, più velocemente il materiale può essere attivato termicamente e più carico termico può essere immagazzinato durante il processo termico dinamico. L'effusività termica viene calcolata in base all'equazione:

$$\epsilon [W K^{-1} m^{-2} s^{-1/2}] = \sqrt{k [W K^{-1} m^{-1}] * \rho [kg m^{-3}] * c_p [J K^{-1} kg^{-1}]}$$

Queste ultime due proprietà derivate, nonostante contengano le stesse variabili, descrivono caratteristiche diverse dei materiali per quanto riguarda il suo comportamento termico in condizioni dinamiche. In particolare, la diffusività definisce la velocità con cui la temperatura del materiale si adatta alla temperatura circostante, mentre l'effusività valuta la capacità del materiale di scambiare energia termica con l'ambiente circostante. In breve, i materiali con alti valori di diffusività trasmettono le fluttuazioni del flusso di calore perimetrale più rapidamente rispetto ai materiali con valori bassi, mentre i materiali con alti valori di effusività assorbiranno più rapidamente un flusso di calore superficiale. La diffusività termica domina principalmente la capacità di attivazione del PCM in strati più profondi e di conseguenza i tempi di carica, così come l'effusività termica domina il flusso di calore superficiale e gli scambi di calore passivo con l'ambiente interno. Pertanto, è necessario un buon equilibrio tra le due proprietà al fine di ottenere un

materiale in grado di immagazzinare elevate quantità di energia termica in un rapido processo di trasferimento del calore, consentendo brevi cicli di carica e scarica e quindi adeguato per essere utilizzato in componenti potenziati da elementi con PCM.

I valori così misurati o calcolati sono quindi stati raggruppati in terne afferenti a provini caratterizzati dalla stessa temperatura di riferimento o condizionamento e mediati. In **Tabella 2-4** sono riportati i valori medi della caratterizzazione termica in funzione e del tipo di materiale e della temperatura di riferimento. Gli stessi valori sono mostrati in **Figura 2-8**. Occorre sottolineare che la capacità termica volumetrica non contempla il contributo eventuale del calore latente derivante dal PCM.

Tabella 2-4 Proprietà termiche misurate ed indirette dei vari mix-design.

Tipo materiale	Tref °C	Densità (kg/m3)	conducibilità W/m.C	Capac. Vol. J/m ³ .C	Diffusività (m ² /s)	c _p J/kg.C	effus J s ^{0.5} /m ² .C
A	20	2390.00	1.90	1.45E+06	1.31E-06	605.23	1655.92
A	105	2333.33	1.94	1.46E+06	1.33E-06	627.08	1683.29
A	200	2250.00	1.69	1.42E+06	1.20E-06	631.03	1549.26
A	300	2233.33	1.94	1.47E+06	1.32E-06	659.66	1687.84
A	400	2203.33	1.62	1.46E+06	1.12E-06	662.61	1624.21
B	20	2336.67	1.98	1.48E+06	1.33E-06	633.15	1711.75
B	105	2346.67	1.56	1.49E+06	1.05E-06	634.89	1524.98
B	200	2263.33	1.60	1.44E+06	1.11E-06	637.61	1520.55
B	300	2256.67	1.44	1.43E+06	1.01E-06	633.63	1430.98
B	400	2253.33	1.37	1.43E+06	9.62E-07	633.16	1553.21
C	20	2373.33	1.46	1.54E+06	9.44E-07	650.31	1498.45
C	105	2333.33	1.57	1.54E+06	1.02E-06	660.31	1554.57
C	200	2186.67	1.12	1.60E+06	7.00E-07	731.79	1336.44
C	300	2196.67	1.07	1.49E+06	7.22E-07	676.58	1260.96
C	400	2176.67	0.96	1.51E+06	6.35E-07	695.34	1470.81

Esaminando i risultati ottenuti si possono fare le seguenti considerazioni:

- Provini tipo A:
 - La capacità termica è sostanzialmente costante e pari a circa 1.46 MJ/(m³ °C), esclusa una leggera flessione ai 200°C;
 - Il calore specifico cresce in modo quasi lineare con la temperatura di trattamento passando dai 605 J/(kg °C) a 20 °C ai circa 660 J/(kg °C);
 - La conducibilità termica è in linea con il target imposto (2 W/(m °C)) con un valore superiore a 1.9 W/(m °C) fino ai 200°C dove si riduce a 1.7 W/(m °C), per poi aumentare fino a 1.94 W/(m °C) a 300°C e, quindi, decrescere nuovamente;

La diffusività e l'effusività termica del materiale seguono in modo stretto l'andamento della conducibilità termica.

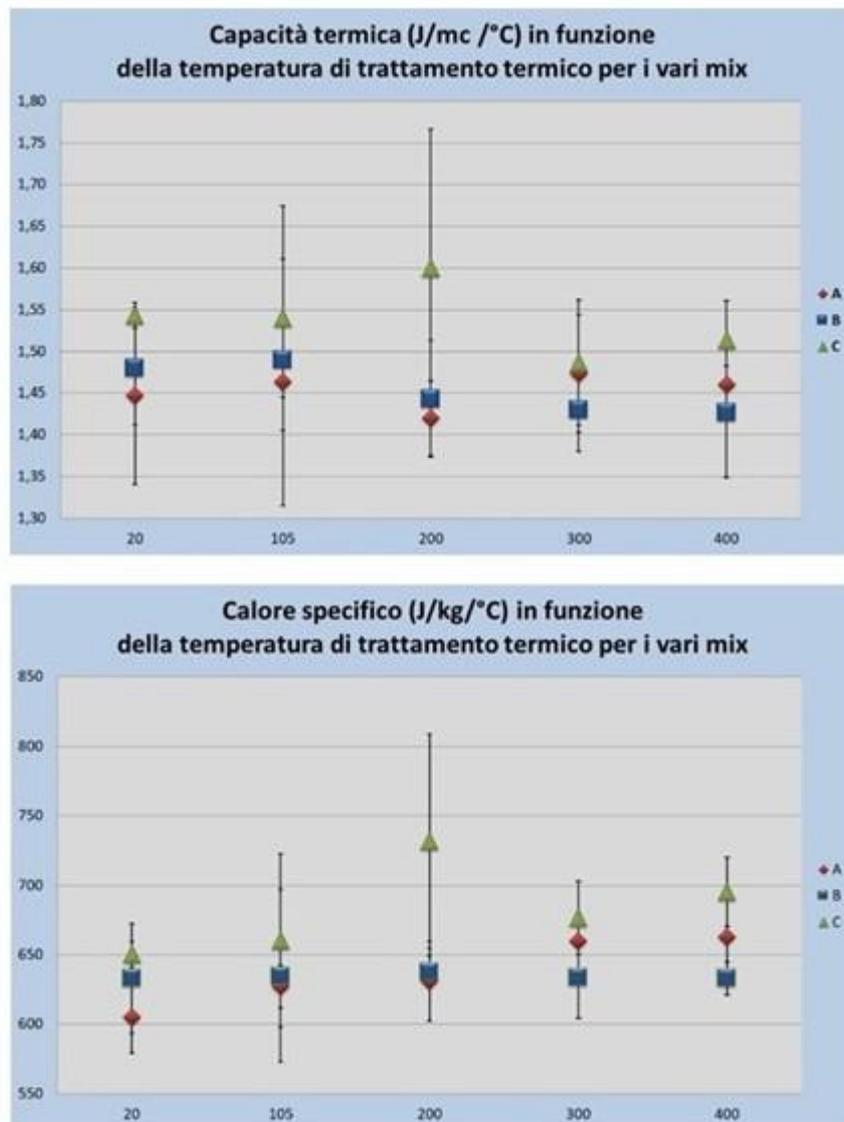


Figura 2.8 Variazione con la temperatura di condizionamento della capacità termica (misurata) e del calore specifico (calcolato) per i vari mix-design.

- Provini tipo B:
 - La capacità termica decresce con la temperatura di trattamento, rimanendo superiore a quella del mix A fino a 200°C (+2%) per poi manifestare dei valori inferiori (-2%);
 - Il calore specifico, quindi, costante e pari a circa 630 J/(kg °C). Tale valore risulta inferiore a quello del mix A al di sopra dei 200°C. La causa di ciò potrebbe risiedere nella presenza dei vuoti nel mEPCM, precedentemente riempiti con acqua libera;
 - La conducibilità termica a 20°C è perfettamente in linea con il target imposto (2 W/(m °C)) ma subito dopo il degassamento si riduce a circa 1.5 W/(m °C), calando ulteriormente a 1.4 W/(m °C) ai 400°C. Rispetto al mix A è evidente una sensibile diminuzione probabilmente dovuta ai suddetti vuoti;
 - Anche in questo caso la diffusività e l'effusività termica del materiale seguono in modo stretto l'andamento della conducibilità termica, risultando inferiori al mix A.

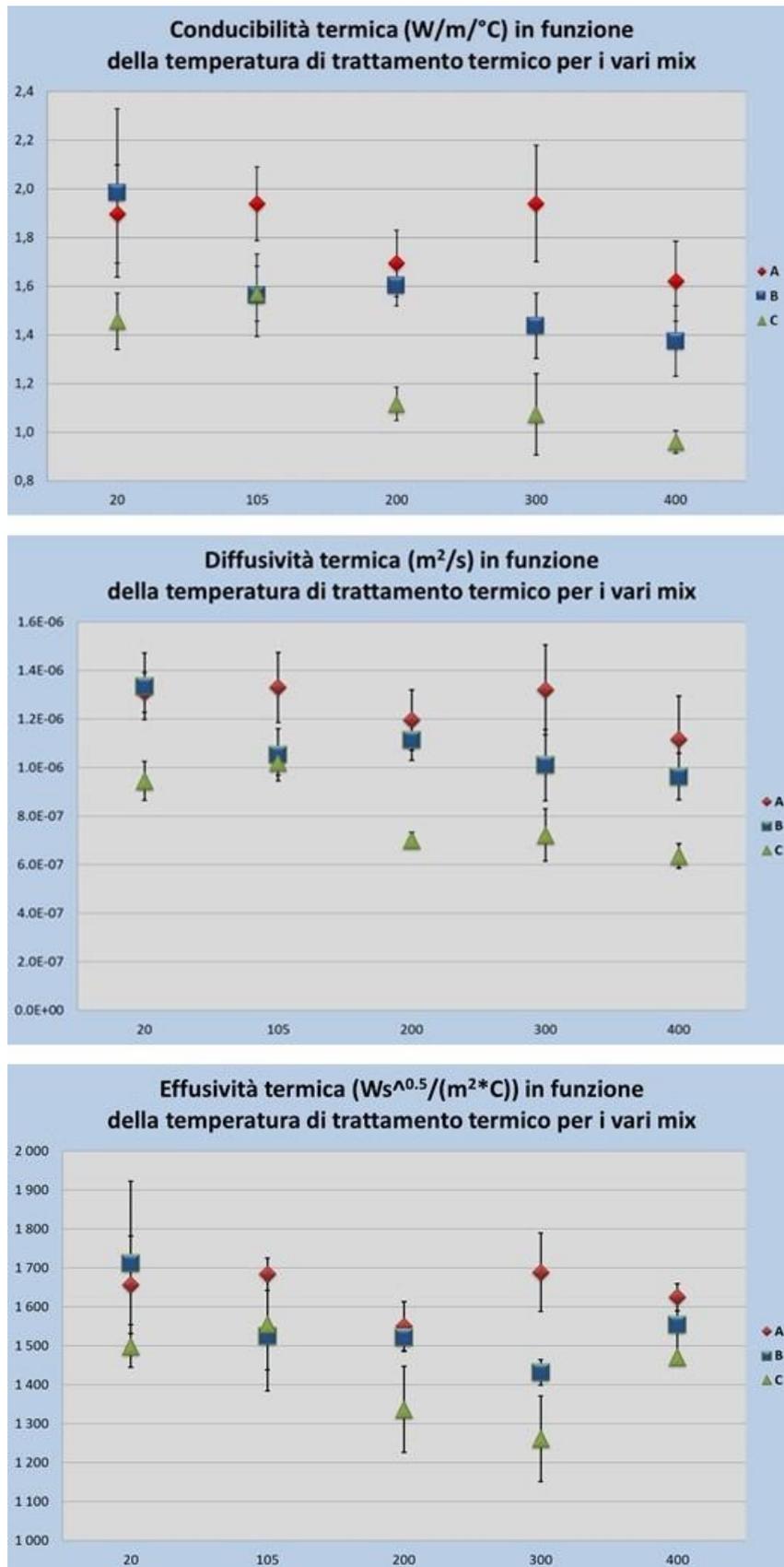


Figura 2-8 Variazione con la temperatura di condizionamento della conducibilità termica (misurata) e della diffusività ed effusività termiche (calcolate) per i vari mix-design.

- Provini tipo C:
 - La capacità termica risulta essere superiore di circa il 5% di quella dei provini A e B e ne segue l'andamento;
 - Anche il calore specifico risulta superiore e crescente con la temperatura di trattamento, passando dai 650 J/(kg °C) a 20°C ai 695 J/(kg °C) a 400°C. Tale incremento potrebbe essere imputabile alla presenza di una più elevata quantità di PCM (10% circa);
 - La conducibilità termica risulta essere, invece, molto inferiore a quella degli altri mix passando da 1.4 W/(m °C) a 20°C fino a 0.9 W/(m °C) a 400°C. Il motivo può ancora una volta essere identificato nella elevata porosità presente mEPCM;
 - Anche in questo caso la diffusività e l'effusività termica del materiale seguono in modo stretto l'andamento della conducibilità termica, risultando inferiori al mix A.

2.1.2.3 Caratterizzazione meccanica

La caratterizzazione meccanica dei provini cilindrici pieni viene fatta con due tipi di prove:

- resistenza alla compressione;
- resistenza a trazione indiretta.

Le prove di **resistenza alla compressione** dei provini sono eseguite con una macchina conforme a EN 12390-3 [4]. I campioni vengono caricati fino a rottura, registrato il carico massimo sostenuto dal campione e calcolata la resistenza a compressione del calcestruzzo. Le due sezioni circolari dei provini cilindrici sono state opportunamente rettificata e lisciate prima del caricamento.

Durante il caricamento la velocità di carico è imposta costante nell'intervallo 0.6±0.2 MPa/s (N/mm²·s). Dopo l'applicazione dell'iniziale carico, che non supera circa il 30% del carico di rottura, si applica il carico al campione, senza shock, e si aumenta continuamente a velocità costante (±10%), fino a quando non è possibile sostenere un carico maggiore.

Al termine va anche valutato il tipo di rottura occorso: nelle figure che seguono sono mostrati degli esempi di rottura del campione che evidenziano se il test ha proceduto in modo soddisfacente, oppure, in modo insoddisfacente. Se la rottura non è soddisfacente, questo deve essere registrato con riferimento alla lettera del modello di rottura più vicina a quella osservata. Le rotture insoddisfacenti possono essere causate da una insufficiente attenzione alle procedure di test, in particolare il posizionamento del campione, o da un guasto alla macchina di prova.

La resistenza a compressione è data dall'equazione:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

dove

- f_c è la resistenza a compressione, in MPa (N/mm²);
- F è il carico massimo in a rottura, in N;
- A_c è l'area della sezione trasversale del campione su cui agisce la forza di compressione, calcolata dalla dimensione designata del campione (vedere EN 12390-1) o dalle misurazioni sul campione, in mm².

La resistenza a compressione è espressa con l'approssimazione di 0.1 MPa (N/mm²)

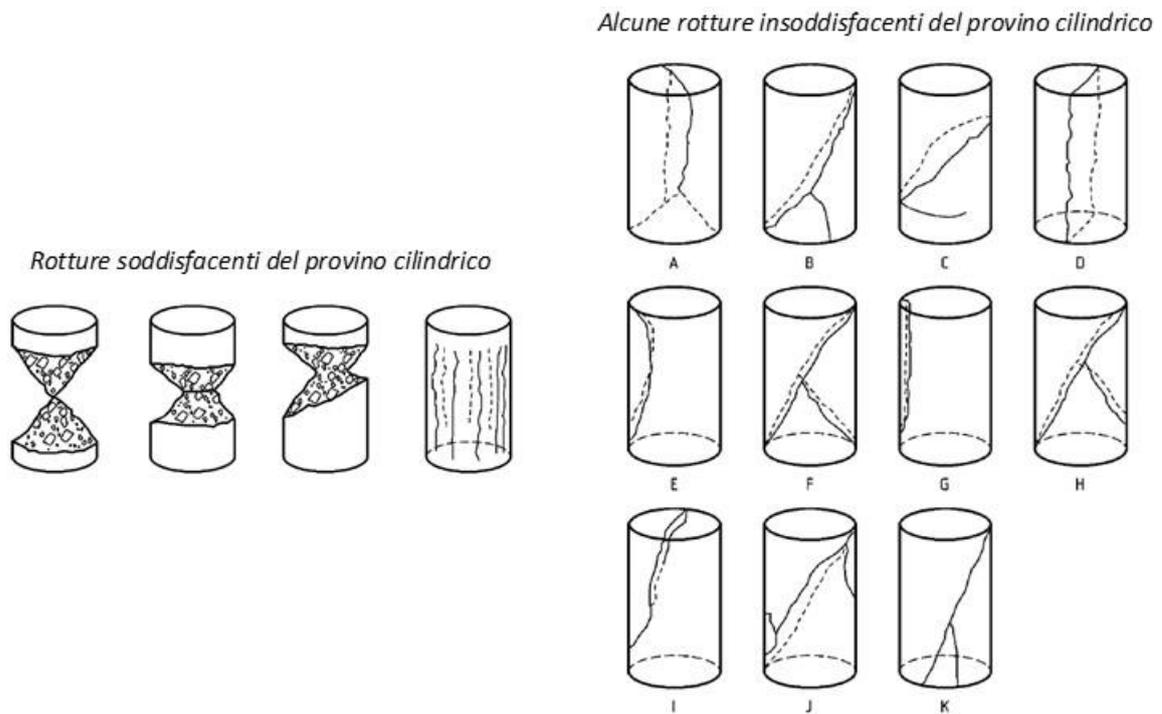


Figura 2-9 Esempi di rotture soddisfacenti o insoddisfacenti di un provino cilindrico sottoposto a prova di resistenza a compressione.

Le prove di resistenza a **trazione indiretta** di un provino cilindrico sono eseguite applicando una forza di compressione ad una zona ristretta, per tutta la lunghezza del cilindro. La risultante forza di trazione ortogonale provoca la rottura del provino per trazione indiretta. L'attrezzatura utilizzata è una macchina di prova secondo EN 12390-4 ed un dispositivo di centratura opzionale per il posizionamento del provino [6].

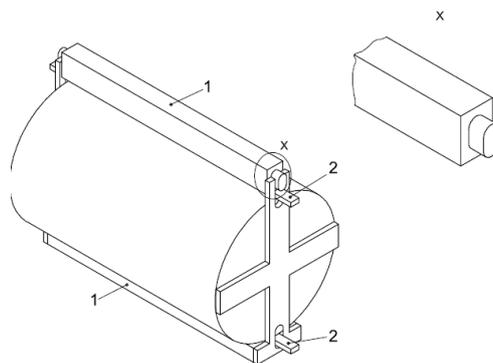


Figura 2-10 Esempio di dispositivo di centratura per provini cilindrici.

La velocità di carico è costante entro il campo 0,04 e 0,06 MPa/s, ed il carico applicato senza colpi e aumentato continuamente, alla prescelta velocità costante ($\pm 1\%$), fino a quando non possa essere sopportato un carico maggiore.

La velocità di carico richiesta della macchina di prova è data dalla formula:

$$R = \frac{\pi s L d}{2}$$

dove:

- R è la velocità di incremento del carico, in N/s;
- L è la lunghezza del provino, in mm;
- d è la dimensione nominale del provino, in mm;
- s è la velocità di incremento della pressione, in MPa/s o N/mm²/s.

La resistenza a trazione indiretta è data dalla formula:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi Ld}$$

dove:

- f_{ct} è la resistenza alla trazione indiretta, in MPa o N/mm²;
- F è il carico massimo, in N;
- L è la lunghezza della linea di contatto del provino, in mm;
- d è la dimensione nominale del provino, in mm.

Le prove di caratterizzazione meccanica dei provini hanno fornito i seguenti risultati, mediate sulle terne di provini condizionati alla medesima temperatura di riferimento:

Tabella 2-5 Resistenza a compressione ed a trazione indiretta dei mix-design in funzione della temperatura di trattamento termico.

Id	T °C	f_c N/mm ²	f_{ct} N/mm ²
A	20	42.63	9.25
A	105	35.72	7.28
A	200	29.62	6.65
A	300	30.26	6.03
A	400	23.25	7.23
B	20	25.39	3.26
B	105	25.39	4.11
B	200	25.39	3.33
B	300	21.02	2.97
B	400	9.89	1.48
C	20	18.05	2.42
C	105	19.09	3.15
C	200	20.74	2.77
C	300	20.08	2.35
C	400	12.49	1.49

Per quanto riguarda le prove di compressione il tipo di rottura avvenuto non è disponibile poiché la presenza di una elevata quantità di fibre metalliche impedisce al provino di evolvere verso una delle configurazioni classificate secondo la normativa e precedentemente esposte.

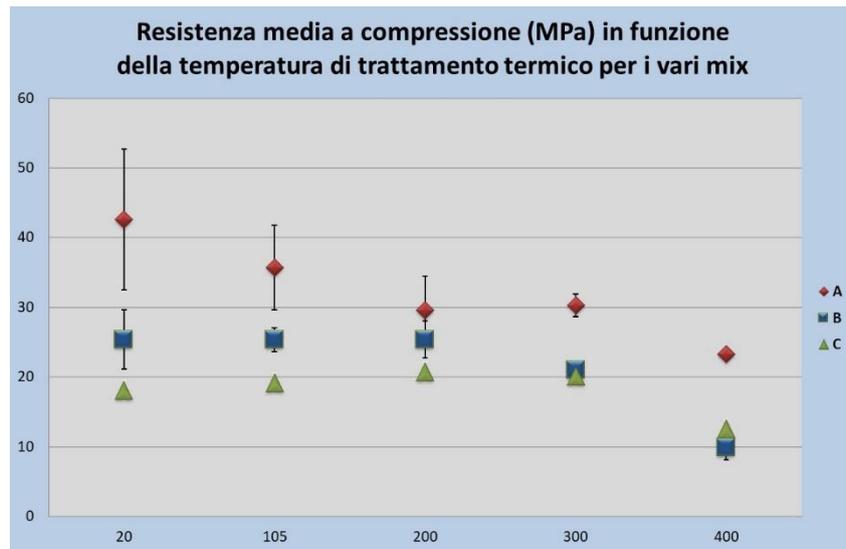


Figura 2-11 Resistenza media a compressione (MPa) per i vari mix-design in funzione della temperatura di trattamento termico.

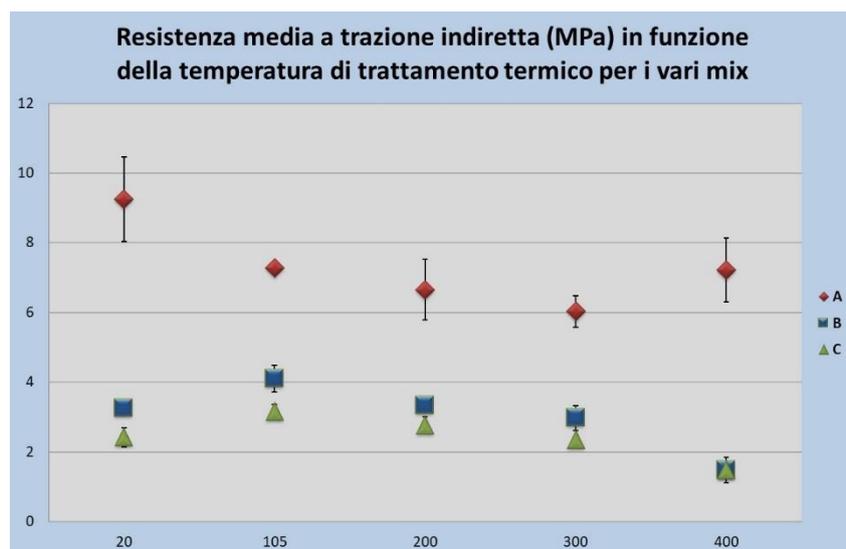


Figura 2-12 Resistenza media a trazione indiretta (MPa) per i vari mix-design in funzione della temperatura di trattamento termico.

I risultati ottenuti hanno evidenziato quanto segue:

- Provini tipo A:
 - la resistenza a compressione f_c è, come atteso, molto elevata a 20°C superando i 40 MPa, a causa della elevata presenza di fibre metalliche. All'aumentare della temperatura di condizionamento questa tende a diminuire in modo quasi lineare fino a circa 23 MPa;
 - il forte effetto delle fibre metalliche si evidenzia anche per la resistenza a trazione indiretta. A 20°C la f_{ct} vale oltre i 9 MPa per poi attestarsi, alle altre temperature di condizionamento, mediamente intorno ai 7 MPa;
- Provini tipo B:
 - la presenza del 5%wt mEPCM riduce fortemente la resistenza iniziale a compressione (25 MPa a 20°C) rimanendo però pressoché costante fino a temperature di trattamento di circa 200°C. Oltre tali

temperature, forse a causa dei vuoti creati dalla evaporazione dell'acqua, quella libera prima e di legame poi, la resistenza si riduce in modo quasi lineare fino a circa 22 MPa;

- un andamento simile a quello della compressione si evidenzia anche per la resistenza a trazione indiretta. Fino ai 300°C la f_{ct} ha un valore di circa 3 MPa e, successivamente, si riduce a circa 1.5 MPa;
- Provini tipo C:
 - incrementando il mEPCM al 10%wt sia la resistenza a compressione che quella a trazione indiretta si riducono rispetto al mix B mantenendo, però, lo stesso andamento in funzione della temperatura di condizionamento. Tale riduzione è stimabile intorno al 25%.

2.1.3 Analisi comparativa con soluzione precedente

In questo paragrafo si metteranno a confronto i dati delle proprietà dei materiali qui sviluppati (A e B) con quelli di materiali analoghi sviluppati alcuni anni prima (anno 2016, A0 e B0), che sono stati caratterizzati durante il PAR2019 (vedi rapporto [16]). In particolare, si confrontano le proprietà sia dei cementi base (A e A0) che di quelli con l'aggiunta di circa il 5% di PCM (B e B0). Tali proprietà sono illustrate da Figura 2-13 a Figura 2-20 e qui di seguito commentate.

Prima di procedere al confronto si ricorda brevemente le principali differenze tra i relativi mix-design:

Tabella 2-6 Principali differenze tra i materiali cementizi realizzati nel 2016 e nel 2020.

Caratteristica	Mix 2016	Mix 2020
Dimensioni provini	D=100mm; H=200mm	Identiche
Cemento	Portland CEM 42.5	Identico
Aggregato	Sabbia, ghiaia	Sabbia, breccia
Fluidificante	Assente	Presente, adatto per bassi a/c
Fibre plastiche	Polipropilene, riciclate, 1 kg/m ³	Polipropilene, nuove, 1 kg/m ³
Fibre metalliche	Trucioli di lavorazione 77 kg/m ³	Fibre corte sottili 50 kg/m ³
mEPCM	SS/Diatomite 80/20 Alta T in fusione Pressione ambiente	SS/Diatomite 80/20 Bassa T in solvente (acqua) In depressione
Miscelamento	Unico mix per 0% e 5% PCM. Estratto 50% mix per gettate A0 Unico al resto il mEPCM. Estratto rimanente per gettata B0 Pericolo mix cls non omogeneo (deposito cariche metalliche in B0)	Due mix diversi (A, B) realizzati in giorni differenti Il mEPCM sostituisce parte dell'aggregato Pericolo mix non omogeneo causa grovigli fibre metalliche
Vibratura	Su tavola vibrante	Con vibratore manuale
Misure	Media di misure relative a 3 diversi provini per ogni temperature di riferimento	Valore della misura relativa a un solo provino per ogni temperature di riferimento

La **densità** dei materiali base (Figura 2-13, A e A0) dopo stagionatura risulta essere molto simile. Quella del mix 2016 è superiore a causa della maggiore quantità di carica metallica utilizzata. A seguito dei trattamenti termici effettuati, il materiale A riduce la propria densità in modo evidente soprattutto sopra i 200°C. Ciò, invece, non accade per il materiale A0, la cui riduzione è molto contenuta. Evidentemente, in quest'ultimo, è presente e viene rilasciata una quantità di acqua libera molto inferiore. Osservando, invece, la densità dei materiali con il 5% di PCM (B e B0), si nota come il materiale B segua il comportamento di quello A con una perdita di peso più accentuata dovuta alla maggiore quantità di acqua libera trattenuta dal mEPCM. Per il

materiale B0 avviene sostanzialmente la stessa cosa ma con una anomalia di partenza: il materiale presenta una densità molto superiore a quella di B ed anche di A0. Una possibile ipotesi, confermata anche da alcune delle altre misure seguenti, è che il metodo di miscelamento non abbia consentito di ottenere delle gettate A0 e B0 omogenee e che si siano accumulata una maggior quantità di carica metallica sulla seconda, rendendola più pesante.

Per quanto riguarda la **resistenza a compressione f_c** (Figura 2.14) dei vari materiali si può osservare quanto segue:

- Il confronto è possibile solo per due temperature di riferimento (20°C e 400°C) poiché per il mix 2016 erano disponibili solo queste misure;
- La f_c di A ed A0 è simile sia a 20°C che a 400°C, con quelle relative alla seconda temperatura ridotte di circa il 30%;
- Il mix B risulta possedere una resistenza f_c inferiore ad A e A0 sia a 20°C (di circa il 20%) che a 400°C (circa il 50%) ma anche di B0. Quest'ultimo mostra addirittura valori confrontabili ad A ed A0, a testimonianza di una maggiore possibile presenza di carica metallica.

Invece per la **resistenza a trazione indiretta f_{ct}** (Figura 2.15):

- La f_{ct} di A è largamente superiore a quella di A0 a tutte le temperature di riferimento e si riduce meno all'aumentare della temperatura di condizionamento;
- Anche la resistenza f_{ct} di B rimane generalmente superiore a quella di B0. Tali valori, largamente inferiori a quelli di A ma superiori ad A0, si riducono all'aumentare della temperatura di condizionamento;
- Tali comportamenti possono trovare giustificazione nella differente tipologia di carica metallica adottata. Nei mix A e B si sono utilizzate delle fibre metalliche sottili e lunghe mentre nei mix A0 e B0 dei trucioli metallici più spessi e corti. Le fibre metalliche, sebbene utilizzate in minore quantità, hanno evidenziato una migliore tenuta del calcestruzzo quando soggetto ad azioni di trazione.

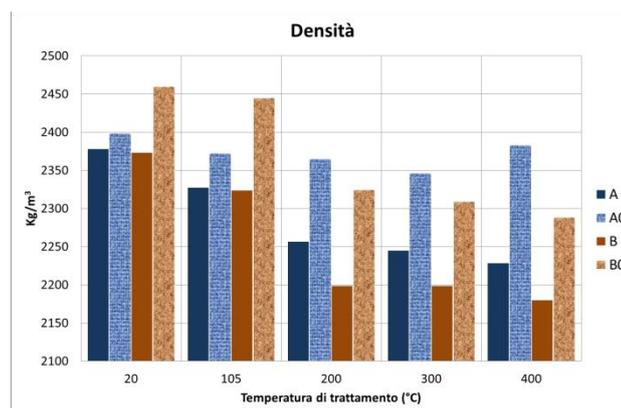


Figura 2-13 Confronto materiali 2016 e 2020: densità.

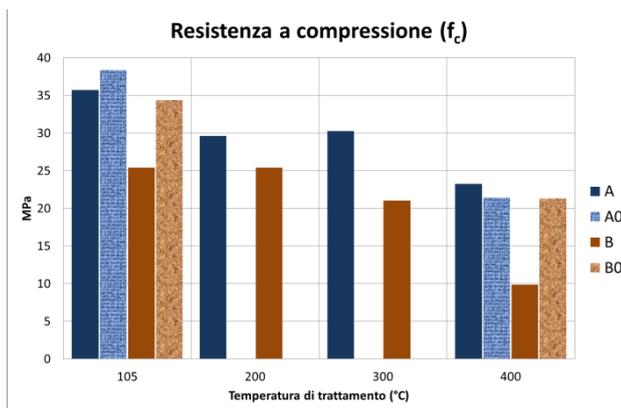


Figura 2.14 Confronto materiali 2016 e 2020: resistenza a compressione.

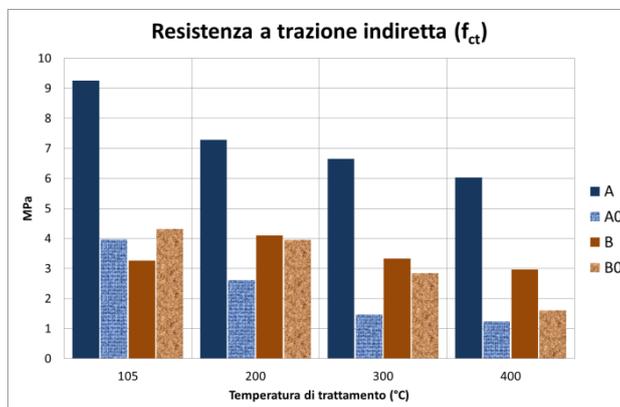


Figura 2.15 Confronto materiali 2016 e 2020: resistenza a trazione indiretta.

Invece, per quanto riguarda le principali caratteristiche termiche si può osservare che:

- **Conducibilità termica** (Figura 2-16): questa è abbastanza simile per i mix A e A0 (a 20°C prossima al valore target di 2 W/(m °C)). Quella del mix B, invece, risulta essere, come atteso, inferiore a causa della presenza del mEPCM. Anche in questo caso il mix B0 ha un comportamento anomalo con valori di conducibilità molto elevati e che testimonierebbero la presenza di una elevata quantità di carica metallica;
- **Capacità termica** (Figura 2-17): il calore accumulato per unità di volume (solo calore sensibile senza contributo di quello latente) risente molto della densità del materiale e, di conseguenza, risulta maggiore per i mix 2016 e minore per quelli 2020. Tra questi il mix B0 sembra avere una maggiore capacità termica anche in confronto con quello A0, per le stesse ragioni esposte in precedenza;
- **Calore specifico** (Figura 2-18): poiché tale grandezza corrisponde alla capacità termica volumetrica depurata del contributo della densità è allora possibile vedere che la capacità termica per unità di massa è in realtà abbastanza costante (tra i 620 ed i 670 J/(kg °C)) per tutti i mix e le temperature di trattamento.

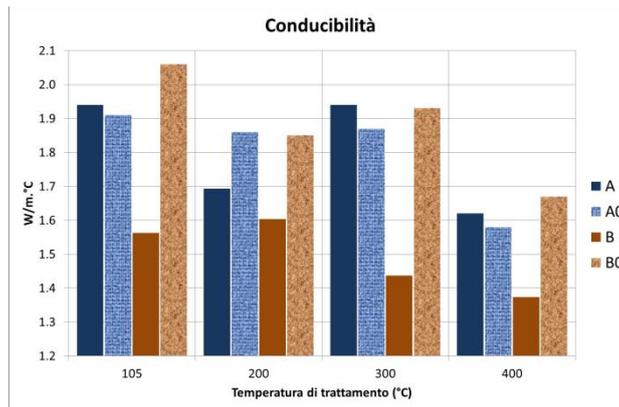


Figura 2-16 Confronto materiali 2016 e 2020: conducibilità termica.

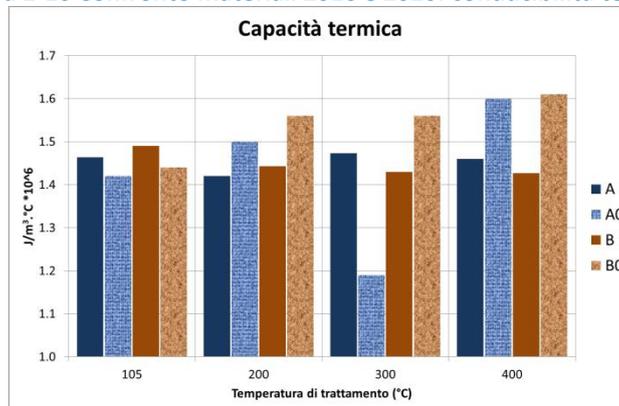


Figura 2-17 Confronto materiali 2016 e 2020: capacità termica.

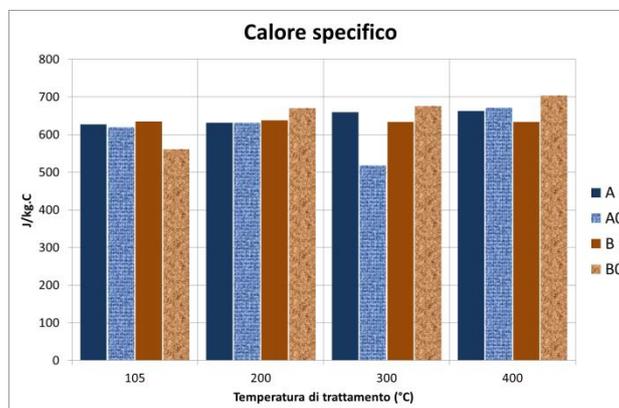


Figura 2-18 Confronto materiali 2016 e 2020: calore specifico.

Dalle grandezze precedenti è anche possibile estrapolarne altre che possano essere indice della facilità di trasmissione del calore e di scambio termico con altri materiali: la diffusività termica (Figura 2-19) e la effusività termica (Figura 2-20):

- **Diffusività termica:** si evidenzia come i mix A e A0 abbiano una buona capacità di trasmissione del calore e come il mix A la mantenga meglio anche dopo trattamento a temperature più elevate. Il mix B ha invece una diffusività inferiore e la mantiene quasi costante anche in temperatura. Il mix B0, risentendo ovviamente della elevata conducibilità, manifesta una diffusività molto elevata a 20°C che però degrada rapidamente dopo essere stato ad alta temperatura;
- **Effusività termica:** per la capacità di scambio termico si potrebbe ripetere lo stesso discorso fatto per la diffusività. In evidenza, oltre l’anomalia del mix B0, anche la buona risposta del mix A, tendenzialmente migliore del mix A0 nell’intervallo 200-300 °C.

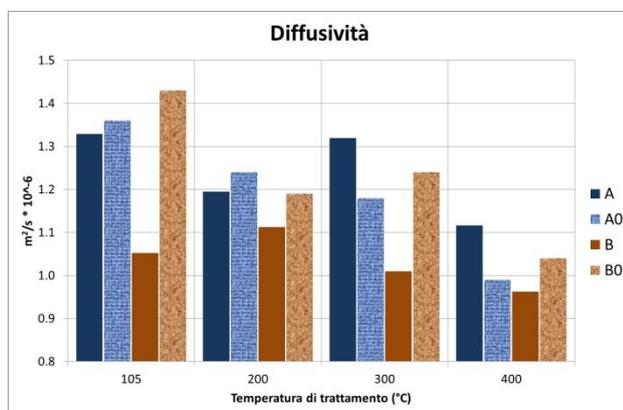


Figura 2-19 Confronto materiali 2016 e 2020: diffusività.

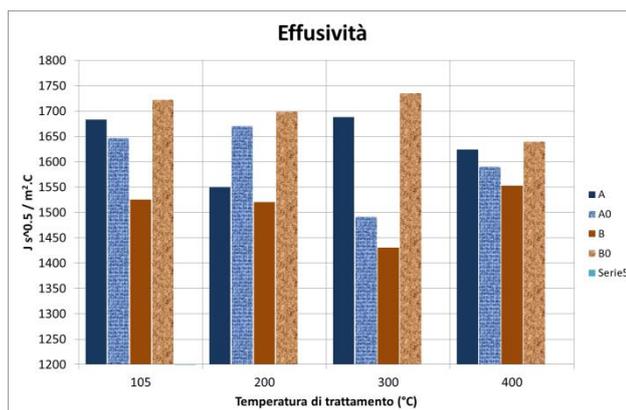


Figura 2-20 Confronto materiali 2016 e 2020: effusività.

In conclusione, possiamo riassumere i principali vantaggi e svantaggi dei mix-design esaminati:

Tabella 2-7 Principali vantaggi/svantaggi dei materiali cementizi realizzati nel 2016 e nel 2020

Confronto	Mix 2016	Mix 2020
Vantaggi	Maggiore densità che incrementa la capacità termica del TES. Buona resistenza a compressione. Buona conducibilità termica. Medie proprietà di scambio e trasmissione del calore per il mix A0.	Ottima resistenza a compressione e buona a trazione indiretta. Buona conducibilità termica per A. Calore specifico non elevato. Buone proprietà di scambio e trasmissione del calore per il mix A.
Svantaggi	Scarsa resistenza a trazione. Comportamento anomalo di B0 dovuto probabilmente ad un eccesso di carica metallica.	Bassa densità. Scarsa conducibilità termica per B. Calore specifico non elevato.

Nel complesso, i mix 2020 sembrano essere uguali o leggermente migliori rispetto a quelli 2016, soprattutto per quanto concerne lo scambio e la trasmissione del calore, anche se il confronto B e B0 sembra essere inattendibile.

2.2 Dimensionamento e specifiche tecniche per un elemento di accumulo termico in calcestruzzo

2.2.1 Dimensionamento

Un nuovo elemento di accumulo termico, denominato SH02, è stato dimensionato sulla base sia dell'elemento SH01, sviluppato e caratterizzato in lavori precedenti, sia di un brevetto ENEA esistente. Negli ultimi anni, ENEA ha condotto una attività di ricerca finalizzata allo sviluppo di materiali a basso costo basati su mescole di calcestruzzo appositamente studiate. In particolare, nel corso del triennio 2012-2014 e successivamente nel progetto europeo STAGE-STE (FP7/2007-2013, grant agreement n. 609837) ha condotto una serie di attività ([9-13]) finalizzate allo:

- i) sviluppo di nuovi materiali da utilizzare come mezzo di accumulo termico;
- ii) studio ed analisi del comportamento termodinamico dei sistemi di accumulo;
- iii) sviluppo di un framework modellistico per la simulazione del comportamento di questi sistemi a supporto della progettazione.

Da queste è nato un primo prototipo di elemento di accumulo con materiali cementizi denominato ENEA-TES-SH01. Questo è stato realizzato con una miscela cementizia studiata da ENEA con l'ausilio delle Università di Trento e di Padova e della ditta Cestaro di Treviso. Le sue dimensioni erano:

Tabella 2-8 Dimensioni prototipo SH01.

Lunghezza elemento	3	m
Lato elemento (sezione quadrata)	200x200	mm
Peso elemento	280	kg
Tipo di scambiatore di calore	a serpentina	
Materiale tubazione	AISI 316	
Diametro esterno tubazione(DN16)	16	mm
Spessore tubazione	1	mm
Lunghezza complessiva scambiatore	12	m
Passo dei tubi rettilinei in config. 2x2	100	mm
Distanza minima tubo-lato esterno cls	50	mm

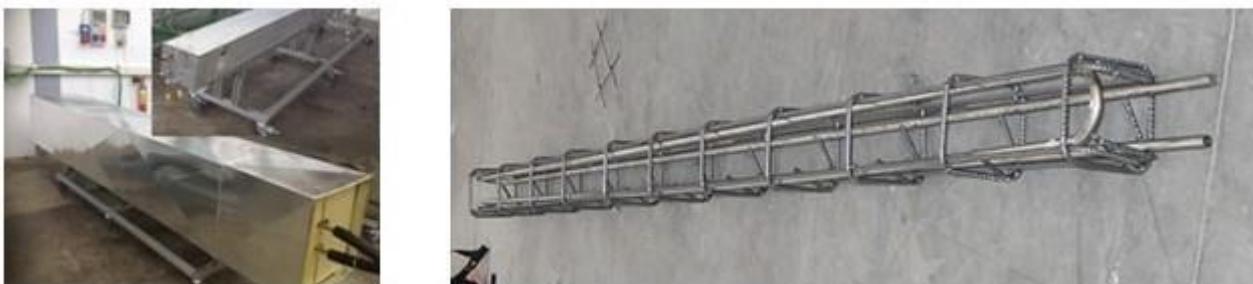


Figura 2-21 Elemento di accumulo SH01 con e senza coibentazione (sx) e Scambiatore di calore integrato al modulo cementizio (dx).

Il prototipo SH01 è stato oggetto di diverse caratterizzazioni sperimentali l’ultima delle quali è avvenuta nel 2019, all’interno della linea di attività LA 2.1 “*Test su accumulo termico in materiali cementizi compatti e con diatomite, e con aggiunta di materiale a cambiamento di fase (SS-PCM)*” e documentata nel relativo rapporto [14]. La caratterizzazione termica di questo prototipo ha evidenziato, oltre che un comportamento in linea con quanto atteso, la necessità di lavorare sul mezzo di accumulo, per incrementarne la capacità termica, e ottimizzare il layout dello scambiatore, per ridurre possibili gradienti termici quale veicolo di propagazione di fessure.

Come ulteriore riferimento, per il dimensionamento del nuovo prototipo SH02, è stato preso in considerazione il **Brevetto ENEA N. 860 del 2017**, “*Dispositivo di accumulo termico, sistema modulare incorporante il dispositivo e relativo metodo di realizzazione*” (vedi Appendice 1: DISTINTA BREVETTO N. ENEA 860). In esso, viene descritto un elemento di accumulo termico molto simile al SH01 ma con diverse possibilità di configurare lo scambiatore interno e di utilizzare mezzi di accumulo che, oltre gli specifici requisiti per il calcestruzzo, potessero inglobare dei materiali a cambiamento di fase stabilizzati in forma. La configurazione dello scambiatore utilizzata in SH01 è classificata nel brevetto come configurazione a “C”. In esse, però, una configurazione migliore è ritenuta essere quella denominata a “Z” poiché potrebbe ridurre i gradienti termici e minimizzare l’eventuale propagazione di cricche all’interno del calcestruzzo.

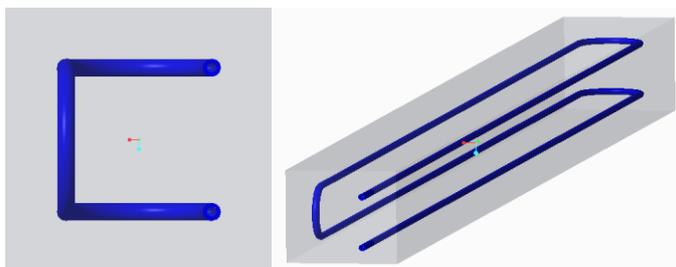


Figura 2-22 Scambiatore con configurazione a “C”

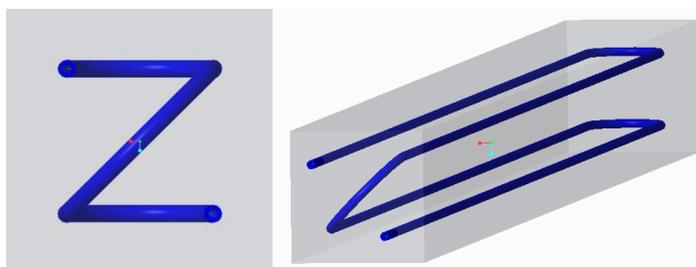


Figura 2-23 Scambiatore con configurazione a “Z”

Alla luce dei riferimenti a disposizione, per dimensionare il prototipo SH02 si sono effettuate le seguenti scelte:

- La lunghezza del modulo rimane sostanzialmente inalterata;
- Per lo scambiatore è adottata una configurazione 4x4 di tipo a “Z”;

- L'interasse tra le sezioni di tubi rettilinei sale a 120 mm;
- La distanza tubo-lato esterno cls rimane di 50 mm;
- La sezione quadrata ha, conseguentemente, dimensioni 220x220 mm.

Maggiori dettagli si troveranno nel paragrafo dedicato alle specifiche di progetto.

2.2.2 Specifiche di progetto

In questo paragrafo sono evidenziate le specifiche tecniche per la progettazione e realizzazione di un modulo di accumulo termico con materiali cementizi del tipo ENEA-TES-SH02.

Le principali specifiche sono le seguenti:

- ✚ L'elemento di accumulo termico ha una forma di parallelepipedo a base quadrata: la base ha il lato di dimensione 220 mm e la lunghezza è di 3000 mm;
- ✚ All'interno dell'elemento è immerso un tubo di scambio termico a forma di serpentina, la cui configurazione è quella a "Z" (vedi figura precedente);
- ✚ 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;
- ✚ Il tubo di scambio è realizzato in acciaio inox, ha un diametro esterno di 16 mm (DN16) ed uno spessore di 1-1.5 mm;
- ✚ Il tubo di scambio è costituito da quattro sezioni rettilinee e tre raccordi. I tratti rettilinei sono disposti, in una sezione, secondo una matrice 2x2 con passo 120 mm e sono lunghi 2780 mm.
- ✚ Due dei tratti rettilinei opposti ai vertici proseguono sempre rettilinei verso l'uscita della base più vicina per altri 110 mm: essi costituiscono le sezioni di ingresso e uscita del fluido termovettore.
- ✚ Gli altri due tubi rettilinei, sempre opposti al vertice e dallo stesso lato dei precedenti, sono congiunti tra loro da una sezione di tubo che si sviluppa lungo la diagonale costituita da due curve a 90° di raggio 60 mm ed un breve tratto rettilineo di circa 49.7 mm;
- ✚ Dalla parte opposta, in prossimità della seconda base, i tubi sono connessi a coppia (quello di ingresso con uno degli adiacenti e quello di uscita con l'ultimo libero) attraverso una curva a 180° di raggio 60 mm;
- ✚ I tubi sono posizionati in modo simmetrico all'asse longitudinale dell'elemento in modo da avere una distanza minima di 50 mm dalle superfici esterne dello stesso;
- ✚ Il tubo di scambio ha una lunghezza totale di circa 11.96 m ed un peso di circa 4.4 kg;
- ✚ Attorno al tubo di scambio, occupando tutto il resto del volume dell'elemento di accumulo, circa 0.1428 m³, si trova il materiale cementizio utilizzato. Questo, che potrà essere di tipo A, B o C (vedi tabella materiali), ha mediamente un peso di circa 314 kg;
- ✚ La superficie esterna dell'elemento di accumulo si estende per circa 2.74 m²;
- ✚ Attorno all'elemento di accumulo deve essere disposta una coibentazione sufficiente a limitare le perdite termiche a circa 60 W (il 30% giornaliero della capacità massima di accumulo). Ciò equivale, per un comune coibente, a circa 400 mm di spessore;

In sintesi, le dimensioni del prototipo SH02 sono:

Tabella 2-9 Dimensioni prototipo SH02.

Lunghezza elemento	3	m
Lato elemento (sezione quadrata)	220x220	mm
Peso elemento senza coibentazione –stima-	318.4	kg
Tipo di scambiatore di calore	a serpentina	-
Configurazione tubi rettilinei scambiatore	2x2	-
Configurazione connessione tubi scambiatore	a "Z"	
Passo dei tubi rettilinei	120	mm
Materiale tubazione	Acciaio inox	
Diametro esterno tubazione(DN16)	16	mm
Spessore tubazione	1-1.5	mm
Lunghezza complessiva scambiatore	11.96	m
Distanza minima tubo-lato esterno cls	50	mm
Tipo di coibente (esempio)	Lana di roccia	
Spessore del coibente	400	mm

Analisi numerica del nuovo SHTES

A supporto alla progettazione del nuovo elemento di accumulo SH02, si sono effettuate delle analisi numeriche agli elementi finiti (FEM) atte a prevedere il comportamento termico dello stesso con diverse configurazioni e con differenti tipi di materiali.

Il sistema in esame è costituito da tre elementi base:

- Il **fluido termovettore** (HTF) che scorre all'interno del tubo di scambio cedendo o ricevendo calore dal sistema di accumulo;
- Il **tubo di scambio termico**, in acciaio, che trasferisce il calore dal fluido termovettore al mezzo di accumulo e viceversa;
- Il **mezzo di accumulo a base cementizia**, che riempie lo spazio compreso tra la superficie esterna del tubo di scambio e la parete esterna dell'elemento stesso.

2.2.3 Il codice di calcolo

Per l'analisi FEM del presente studio è stato utilizzato un codice di calcolo denominato CAST3M [15]. Questo è un codice di calcolo agli elementi finiti, sviluppato presso il Dipartimento di Meccanica e Tecnologia (DMT) del Commissariato per l'Energia Atomica Francese (CEA) di Saclay (Parigi). Lo sviluppo di CAST3M è inserito all'interno di una attività di ricerca nel campo della meccanica e termo-meccanica con l'obiettivo di costruire uno strumento di alto livello capace di essere usato come valido supporto per la progettazione, il dimensionamento e l'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-processor) e di trattamento dei risultati (post-processor). CAST3M è un programma potente, flessibile ed ottimizzato per problemi di meccanica lineare elastica in statica e dinamica (vibrazioni, estrazione di autovalori), problemi di termica e di trasferimento di calore, problemi non lineari (materiali elastici, plastici, viscosi), problemi di dinamica passo a passo, etc.

2.2.4 La geometria

Le geometrie di riferimento per le analisi che seguono sono quelle precedentemente riportate, ovvero:

- Elemento di accumulo con configurazione a "C";
- Elemento di accumulo con configurazione a "Z".

In entrambi i casi saranno utilizzate le dimensioni adottate per il nuovo prototipo SH02 e riassunte nella relativa tabella del paragrafo precedente sulle specifiche di progetto.

Nei modelli viene trascurata la presenza del tubo in acciaio a causa della sua elevata conducibilità termica e, per il ridotto spessore, della sua bassa capacità di accumulo.

2.2.5 I materiali

I materiali rappresentati nei vari modelli sono due:

- Il fluido termovettore (HTF);
- Il materiale composito a base cementizia (calcestruzzo con eventuale SS-CPCM).

Qui di seguito vengono riportate le principali caratteristiche fisiche dei materiali e successivamente vengono descritti i modelli di comportamento implementati nei calcoli.

2.2.5.1 Il fluido termovettore (HTF)

Il fluido termovettore è un olio diatermico, Therminol66, le cui caratteristiche sono state considerate costanti per l'intervallo di temperatura operativo in esame (200-300°C), e pari ai valori corrispondenti alla temperatura media ($T_{media} = 250 \text{ °C}$). Nella tabella seguente sono riportate le caratteristiche fisiche considerate:

Tabella 2-10 Caratteristiche del fluido termovettore

HTF (olio diatermico)		
Densità (ρ_f)	(kg/m ³)	847
Conducibilità termica (k_f)	(W/(m °C))	0.01
Calore specifico ($c_{p,f}$)	(J/(kg °C))	2380

2.2.5.2 Il materiale a base cementizia

I materiali considerati in questo studio saranno di tre differenti tipologie:

- Un calcestruzzo base, con le caratteristiche richieste dal brevetto ENEA;
- Un calcestruzzo base cui è aggiunto il 5% in peso di SS-CPCM;
- Un calcestruzzo base cui è aggiunto il 10% in peso di SS-CPCM.

Come calcestruzzo base è stato preso in considerazione un calcestruzzo il cui mix-design è stato sviluppato nel 2018/2019 dalla ditta Cipiccia Calcestruzzi (Narni-TR), in collaborazione con ENEA. Tale materiale è stato realizzato con un basso contenuto di acqua (rapporto acqua/cemento circa 0.4) e presenta una conducibilità termica, dopo i 28 giorni di stagionatura, di circa 2 W/(m² °C). L'SS-CPCM, aggiunto al calcestruzzo base per incrementarne la capacità di accumulo, è immaginato essere costituito dal un mezzo poroso, la diatomite, all'interno del quale, con un rapporto in massa di 80/20, è contenuto un materiale a cambiamento di fase (PCM) costituito da "sale solare". Le proprietà omogeneizzate, qui considerate per i tre materiali e riportate nella tabella seguente, non derivano dalle caratterizzazioni sperimentali ma sono state ricavate tramite un modello analitico[1] che prevede le caratteristiche fisiche e termiche del composito Calcestruzzo/SS-CPCM.

Tabella 2-11 Caratteristiche dei materiali cementizi.

Id materiale	Proprietà fisiche	A	B	C
Tipo materiale	Unità di misura	<i>calcestruzzo base</i>	<i>calcestruzzo base + 5%wt SS-CPCM</i>	<i>calcestruzzo base + 10%wt SS-CPCM</i>
Densità	kg/m ³	2419	2188	1997
Conducibilità	W/(m ² °C)	2.0	1.93	1.88
Calore specifico	J/(kg °C)	727.6	776.8	826.1
Calore latente	J/kg		5950	11900
Temp. media fusione	°C		226	226

2.2.6 Le condizioni al contorno

2.2.6.1 Condizione di carico

Il fluido termovettore è rappresentato, solo in termini funzionali, come un fluido che lambisce la parete interna del tubo e la cui temperatura ha una determinata evoluzione temporale. Il suo flusso idraulico è caratterizzato dalla velocità all'interno del tubo di scambio, ovvero dalla portata. Nella tabella seguente sono riportati i dati caratteristici del flusso.

Tabella 2-12 Dati caratteristici del flusso del fluido termovettore.

Condizioni flusso HTF	Unità di misura	valori
Velocità	(m/s)	0.6
Portata	(kg/s)	0.07823

In tali condizioni, il coefficiente convettivo di scambio termico è considerato variabile con la temperatura e pari a:

- $h_{HTF} = 70 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ a 20°C
- $h_{HTF} = 450 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ a 200°C
- $h_{HTF} = 600 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ a 300°C

Il carico termico è associato alla variazione nel tempo della temperatura del fluido termovettore. Per ogni modello è stata simulata la sola fase di carico, nella quale il sistema accumula il calore ricevuto dal fluido termovettore. In tale fase la temperatura del fluido termovettore parte dalla temperatura operativa minima, $T=200^\circ\text{C}$, per arrivare dopo 15 minuti alla temperatura operativa massima di 300°C . Questa temperatura viene quindi mantenuta fino al tempo $t= 4\text{h}$, transitorio completo. L'andamento descritto è riportato nella tabella seguente.

Tabella 2-13 Andamento della temperatura del fluido termovettore nella fase di carico

Tempo (h)	Tempo (s)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)
0.00	0	200
0.25	900	300
4.00	14400	300

Nelle simulazioni di carica del sistema la forzante è quindi rappresentata dalla condizione di flusso termico a coefficiente di trasporto convettivo variabile e temperatura del fluido termovettore, applicata alla parete del mezzo di accumulo a contatto con il tubo in acciaio, con andamento riportato in precedenza.

2.2.6.2 Perdite di calore verso l'esterno

In tutti i modelli le pareti esterne del sistema sono considerate adiabatiche, quindi le perdite di calore verso l'esterno sono nulle.

2.2.6.3 Campo termico iniziale

Nelle simulazioni di carico del sistema, la temperatura iniziale del modello è posta costante e pari alla temperatura minima operativa, $T=200^\circ\text{C}$.

2.2.7 Modelli FEM e tipi di analisi

Le analisi svolte per simulare il comportamento termico del nuovo elemento di accumulo SH02 sono state quattro, qui di seguito elencate.

Tabella 2-14 Scheda delle analisi eseguite.

Analisi ID	Configurazione Elemento	ID materiale
1	C	A

<i>Analisi ID</i>	<i>Configurazione Elemento</i>	<i>ID materiale</i>
2	Z	A
3	Z	B
4	Z	C

Esse fanno riferimento alle due configurazioni di elemento ed ai tre materiali precedentemente illustrati. L'identificativo delle analisi costituisce il riferimento base per l'illustrazione dei risultati ottenuti.

2.2.7.1 Il mesh

Sono stati realizzati due mesh, uno per ognuna delle due possibili configurazioni dell'elemento di accumulo. Nella figura seguente è possibile osservare i mesh del materiale di accumulo e del tubo di scambio termico dei due casi.

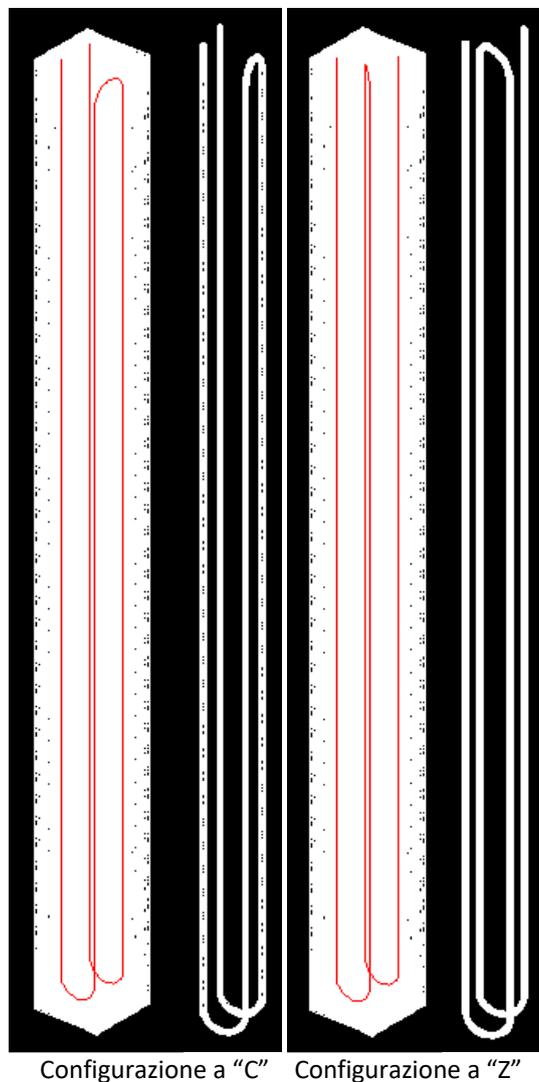


Figura 2-24 Discretizzazione dell'elemento di accumulo, con linea di flusso del HTF e particolare del condotto a serpentina per le configurazioni a "C" ed a "Z".

I mesh sono stati realizzati in modalità semi automatica utilizzando esclusivamente elementi di tipo "tet4", ovvero tetraedri a 4 nodi. Le dimensioni dei mesh ottenuti sono le seguenti:

Tabella 2-15 Numeri di elementi e di nodi dei mesh a “C” ed a “Z” realizzati.

Configurazione elemento	Numero di Elementi	Numero di nodi
C	69303	14614
Z	69346	14639

2.2.8 Calcoli e risultati

Le analisi sono state eseguite simulando un transitorio di carico (riscaldamento) dell’elemento di accumulo tramite la procedura PASAPAS del codice di calcolo Cast3M. Il passo temporale adottato per il calcolo è di 30 secondi mentre i dati sono stati salvati ogni 60 secondi. Alcuni dei principali risultati (temperature, potenze, energie fornite e accumulate, ...) sono mostrati nelle [Appendici 2-5](#).

Nei paragrafi che seguono, tali risultati sono stati analizzati e messi a confronto tra loro cercando di comprendere l’effetto della configurazione e del materiale adottato sulle prestazioni del componente.

2.2.8.1 Confronto tra le configurazioni a “C” ed a “Z”

Nelle simulazioni 1 e 2 sono state analizzate le due possibili configurazioni ipotizzate per l’elemento di accumulo utilizzando come HSM il solo calcestruzzo base (vedi tabella dei materiali).

Nella tabella seguente sono mostrati i principali risultati ottenuti:

Tabella 2-16 Simulazioni 1 e 2: principali risultati.

Proprietà	Unità	1	2
volume	m ³	0.14305	0.14304
massa	kg	346.03	346.01
max. cal. sen.	Wh	6993.6	6993.2
max. cal. lat.	Wh	0	0
capacità term.	Wh	6993.6	6993.2
tempo car. 95%	h	2.6861	2.6761

Invece, nelle figure seguenti sono mostrati gli andamenti delle temperature di ingresso ed uscita del HTF, del relativo salto termico e del fattore di carico del mezzo di accumulo per le simulazioni 1 e 2.

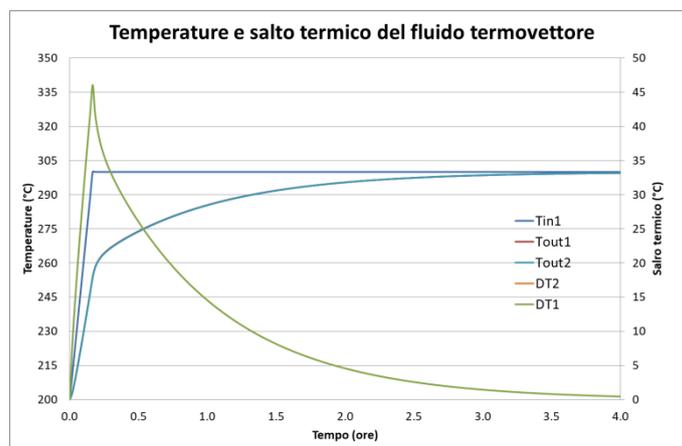


Figura 2-25 Andamenti delle temperature di ingresso ed uscita del HTF e del relativo salto termico per le simulazioni 1 e 2.

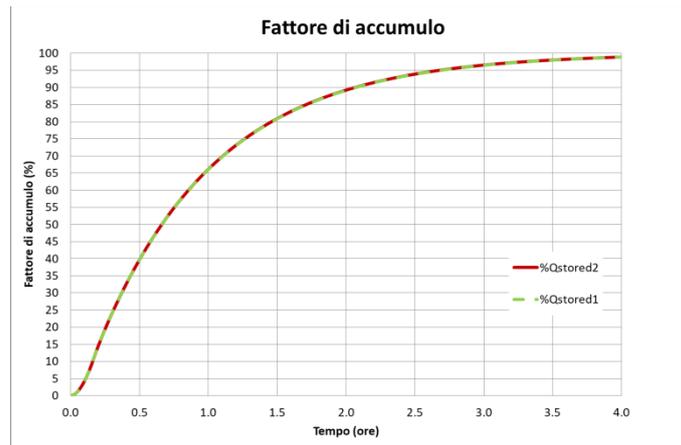
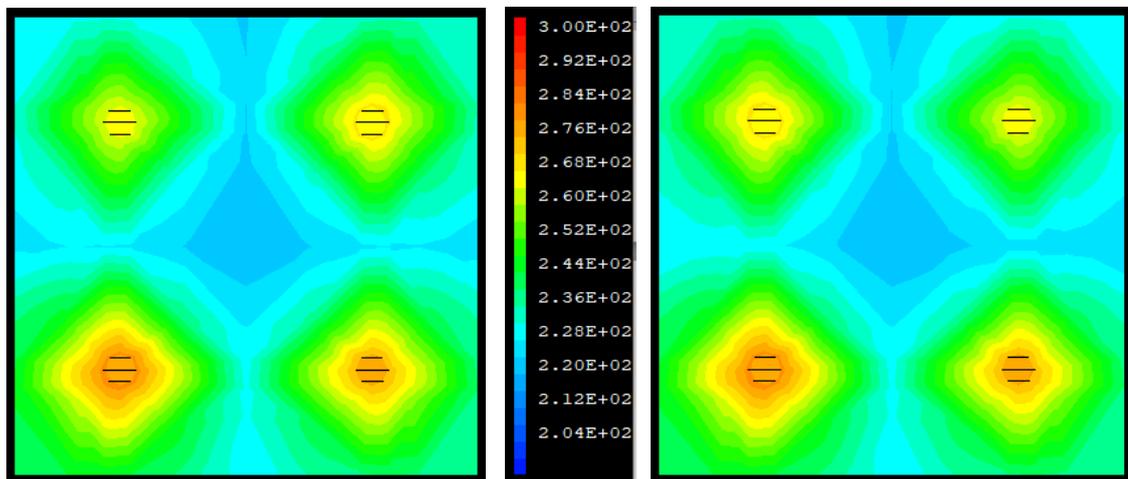


Figura 2-26 Andamenti del fattore di carico del mezzo di accumulo per le simulazioni 1 e 2.

Come è facile vedere le due configurazioni portano ad un comportamento termico dell'elemento di accumulo sostanzialmente identico. Le differenze sono minimali e le curve praticamente sovrapposte. La configurazione a "Z" ha una trascurabile riduzione di volume rispetto all'altra e, di conseguenza, di massa (circa 346 kg), di capacità termica (circa 7 kWh) e, infine, di tempo di carico (circa 2 ore e 40 minuti per il 95% della capacità).

L'unica differenza riscontrabile è quella, peraltro attesa, di una diversa distribuzione dei gradienti termici all'interno della sezione dell'elemento. Nella figura sottostante è riportata la distribuzione delle temperature nella sezione mediana dell'elemento di accumulo dopo 30 minuti di carico per ciascuna configurazione. Da questa, si nota come nella configurazione 1 al ramo di ingresso caldo si affianchi quello di uscita più freddo: la differenza massima di temperatura tra i due rami è di circa 45°C. Invece, nella configurazione 2 il ramo freddo è più lontano da quello caldo che al suo fianco trova i due a temperature intermedie: in questo caso il gradiente di massimo di temperatura con i rami vicini potrebbe essere almeno il 30% inferiore.



Configurazione a "C"

Configurazione a "Z"

Figura 2-27 Distribuzione delle temperature nella sezione mediana dell'elemento di accumulo nelle due configurazioni a "C" e "Z".

In conclusione, la configurazione a "Z" è equivalente a quella a "C" da un punto di vista termico ma consente di avere minori gradienti termici al suo interno, minimizzando la probabilità di apertura e propagazione di eventuali fessurazioni del materiale.

2.2.8.2 Confronto tra i tre differenti mezzi di accumulo

Nelle simulazioni 2, 3 e 4 si è adottato un elemento di accumulo in configurazione a “Z” e sono stati analizzati i vari tipi di mezzo di accumulo proposti (vedi tabella dei materiali).

Nella tabella seguente sono mostrati i principali risultati ottenuti:

Tabella 2-17 Simulazioni 2-4: principali risultati.

Proprietà	Unità	2	3	4
volume	m ³	0.14304	0.14304	0.14304
massa	kg	346.01	312.96 (-9.55%)	285.64 (-17.45%)
max. calore sensibile	Wh	6993.2	6753.1	6554.7
max. calore latente	Wh	0	517.26	944.21
capacità termica	Wh	6993.2	7270.3 (+3.96%)	7498.9 (+7.23%)
tempo di carico al 95%	h	2.6761	2.6721	2.67

Invece, nelle figure seguenti sono mostrati, per le varie simulazioni, gli andamenti:

- delle temperature di ingresso ed uscita del fluido HTF e del relativo salto termico;
- della potenza e dell’energia ceduta dal HTF;
- della massa fusa nel mezzo di accumulo;
- del calore accumulato nel mezzo di accumulo;
- del fattore di carico del mezzo di accumulo.

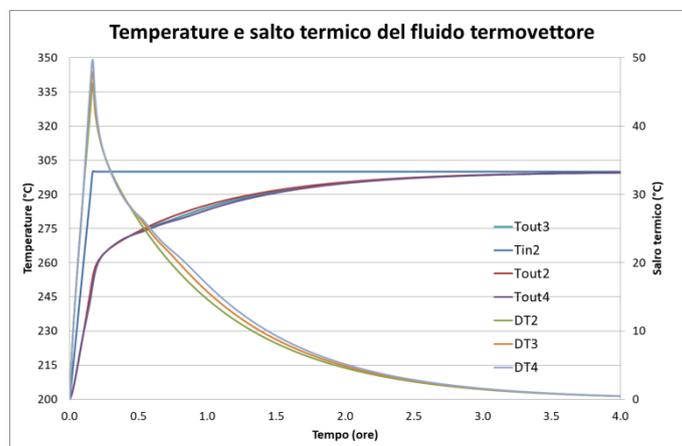


Figura 2-28 Andamento delle temperature di ingresso ed uscita del fluido HTF e del relativo salto termico.

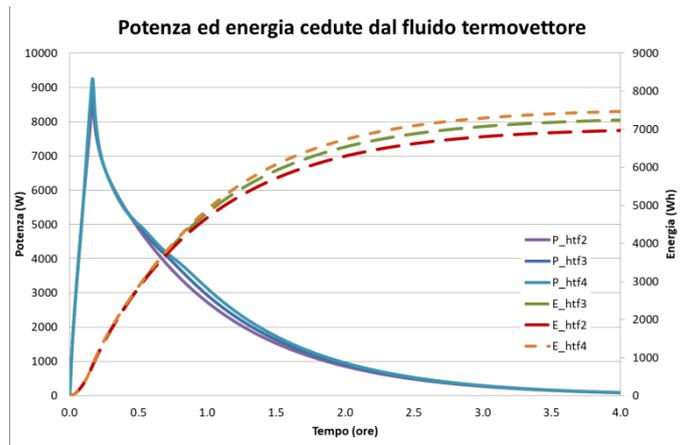


Figura 2-29 Andamento della potenza e dell'energia ceduta dal HTF.

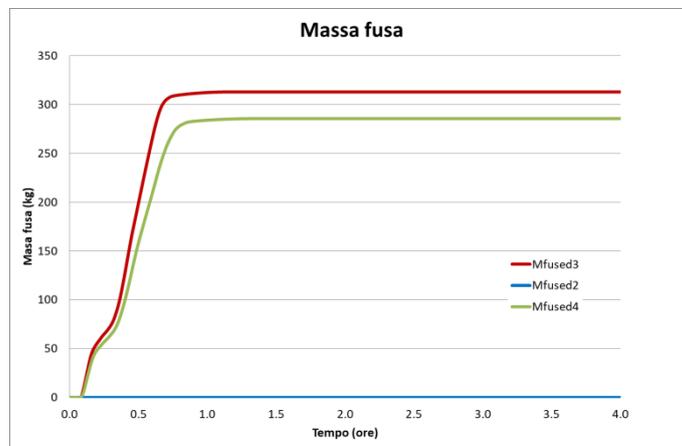


Figura 2-30 Andamento della massa fusa nel mezzo di accumulo.

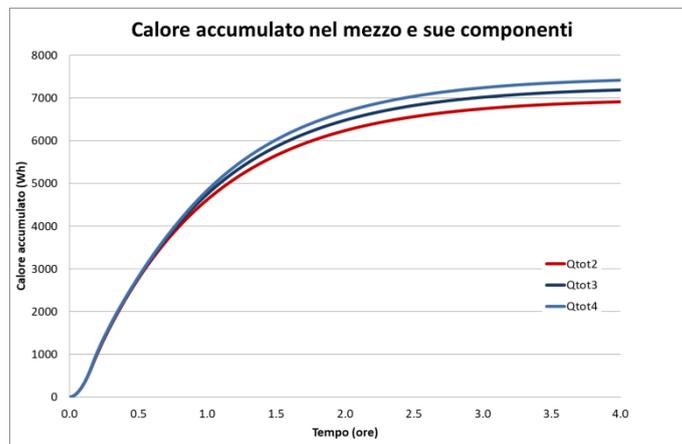


Figura 2-31 Andamento del calore accumulato nel mezzo di accumulo.

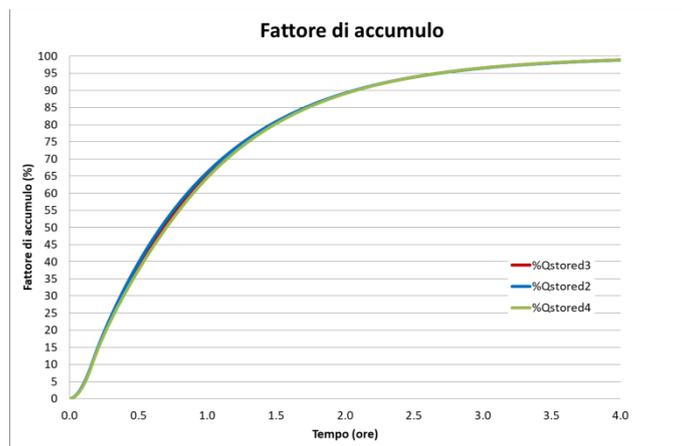


Figura 2-32 Andamento del fattore di carico del mezzo di accumulo.

Dai risultati precedenti è possibile dedurre quanto segue:

- incrementando la quantità di di SS-CPCM (dal materiale A a quello C), la temperatura di uscita del HTF si riduce tra l’inizio del transitorio fino ad 1 ora, per poi recuperare ed assumere gli stessi valori per tutti i materiali;
- ciò corrisponde, invece, ad un maggiore salto termico nello stesso intervallo temporale e, di conseguenza una maggiore potenza termica ceduta dal HTF al mezzo di accumulo;
- la causa di ciò risiede nel cambiamento di fase del PCM utilizzato, che assorbe parte del calore e rallenta la crescita in temperatura del mezzo. Tale cambiamento di fase inizia subito dopo la partenza del transitorio e termina entro 1 ora da questo.

A tale effetto corrisponde:

- un minore peso dell’elemento: 346 kg nel caso 2, 312.9 kg (-9.55%) nel caso 3 e kg 285.64 (-17.45%) nel caso 4;
- una maggiore capacità di accumulo dell’elemento: 7 kWh nel caso 2, 7.3 kWh (+3.96%) nel caso 3 e 7.5 kWh (+7.23%) nel caso 4.

La possibilità di utilizzare un composito calcestruzzo SS-CPCM con un contenuto del 10% in peso di PCM fornisce le migliori prestazioni incrementando in modo evidente la capacità di accumulo (densità di energia) con un mezzo molto più leggero.

Chiaramente, l’effettivo utilizzo di questo materiale va verificato anche da un punto di vista meccanico in quanto l’eccessivo volume occupato dal SS-CPCM potrebbe alterare fortemente le capacità meccaniche del mezzo.

3 Conclusioni

Nel presente documento è stata riportata la seconda parte del lavoro svolto all'interno della linea di attività LA2.4 del PAR2019-21, finalizzata alla caratterizzazione sia termica che meccanica dei nuovi materiali a base cementizia sviluppati nella prima parte, ed alla analisi e dimensionamento di un prototipo utilizzando detta tipologia di materiali, da realizzare successivamente nella LA2.12.

La caratterizzazione delle tre miscele sviluppate (mix A, senza mEPC; mix B, con il 5%wt di mEPCM; mix C, con il 10%wt di mEPCM) hanno condotto alle seguenti conclusioni:

- Sono generalmente identificabili tre diversi tipi di comportamento dei materiali sviluppati in funzione della temperatura di condizionamento. Al di sotto dei 200°C, è ancora presente acqua libera, sotto forma di vapore, nei provini di cemento, questo perché l'acqua forma dei legami dipolari deboli sia con la matrice porosa del mEPCM sia con quella cemento.
- Tra i 200°C ed i 300°C l'acqua libera è evaporata o continua ad evaporare, creando una serie di vuoti interni al materiale. Infine, al di sopra dei 300°C, inizia ad essere estratta anche parte dell'acqua legata, riducendo la presa tra cemento ed aggregati ed deteriorando il materiale.
- I materiali non trattati hanno tutti, al di sotto dei 105°C una densità di circa 2370 kg/m³ che però si riduce, all'aumentare della temperatura di condizionamento. Tra i 200 e 300°C tale riduzione va dal 5% del mix A ad oltre il 7% per i mix B e C.
- La capacità termica dei tre mix aumenta leggermente in funzione della quantità di mEPCM presente, aumentando da circa il 2% del mix B al 5% del mix C, ed in modo inversamente proporzionale alla riduzione di densità. Ciò si esplica, quindi, in un incremento del valore del calore specifico dei materiali con più mEPCM: si passa dai 610 J/(kg °C) del mix A ai 630 J/(kg °C) del mix B e ai 650 J/(kg °C) del mix C. Il calore specifico sembra migliorare incrementando la temperatura di trattamento;
- La conducibilità termica è sicuramente buona per il mix A (> 1.9 W/(m °C)) anche dopo i vari trattamenti termici. Il mix B evidenzia una conducibilità iniziale buona che, però, si riduce dopo i trattamenti termici fino a circa 1.5 W/(m °C). Invece, la conducibilità del mix C ha valori molto al di sotto di quelli precedenti e che sono compresi tra 1.5 e 0.9 W/(m °C). L'incremento dei valori di conducibilità è sicuramente ascrivibile alla presenza di una buona quantità di fibre metalliche, che agiscono come ponte termico, mentre la sua diminuzione con la temperatura è probabilmente dovuta ai vuoti presenti nel mEPCM una volta rimossa l'acqua libera presente;
- Le altre grandezze che caratterizzano le capacità di scambio e trasporto dei materiali, la diffusività e l'effusività termica, mostrano una stretta correlazione con la conducibilità termica.
- L'effetto della presenza delle fibre metalliche è evidente in termini di resistenza a compressione e, soprattutto a trazione di tutti i materiali. Invece, la presenza di mEPCM e, soprattutto, della rimozione dell'acqua libera dai suoi pori dopo i vari trattamenti termici caratterizza la differenza di prestazioni meccaniche tra il mix A e gli altri.

Per comprendere il comportamento di questi nuovi materiali si è effettuato un confronto, limitatamente ai mix A e B, con degli analoghi materiali realizzati alcuni anni addietro. Da tale confronto risulta che i materiali nuovi risultano sostanzialmente in linea con i vecchi ma con migliori caratteristiche per quanto concerne lo scambio, la trasmissione del calore e la resistenza a trazione indiretta.

In parallelo, è stato dimensionato, progettato ed analizzato un elemento di accumulo termico modulare, denominato ENEA-TES-SH02, in composito cementizio utilizzando un materiale dello stesso tipo di quelli qui caratterizzati. Detto elemento è stato dimensionato sulla base delle indicazioni di un precedente brevetto ENEA (n. 860 del 2017) e formulato delle specifiche tecniche per la sua realizzazione. Inoltre, attraverso una analisi numerica FEM si è analizzato il suo comportamento termico e verificata la bontà delle scelte effettuate.

Il lavoro impostato dovrà proseguire attraverso una attenta caratterizzazione termica dei materiali sviluppati, invece che come post-trattamento termico, attraverso l'utilizzo dei provini cilindrici con tubo immerso, realizzati nella prima parte dell'attività, installati sull'impianto Solteca-Air. Quindi poi, verranno realizzati gli elementi di accumulo dimensionati in precedenza e caratterizzati termicamente con l'impianto sperimentale Solteca3 realizzato presso l'ENEA Casaccia.

Tutto ciò farà parte, come accennato, della linea di attività LA 2.12 "Sviluppo e caratterizzazione di elementi di accumulo termico in calcestruzzo con proprietà termiche incrementate" del PAR2021.

4 Riferimenti bibliografici

- 1 A. Miliozzi, D. Mele, D. Nicolini, R. Liberatore, E. Veca, G. Napoli, "Produzione di nuovi provini cilindrici con materiale composito PCM", Report RdS/PTR2020/180, ENEA.
- 2 EN 12390-1 Calcestruzzo indurito. Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme
- 3 EN 12390-2 Calcestruzzo indurito. Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza
- 4 EN 12390-3 Calcestruzzo indurito. Resistenza alla compressione dei provini
- 5 EN 12390-5 Calcestruzzo indurito. Resistenza a flessione dei provini
- 6 EN 12390-6 Calcestruzzo indurito. Resistenza a trazione indiretta dei provini
- 7 EN 12390-7 Calcestruzzo indurito. Massa volumica del calcestruzzo indurito
- 8 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.
- 9 Salomoni VA, Majorana CE, Giannuzzi GM, Di Maggio R, Miliozzi A, et al. "Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants", *Solar Energy* 103 (2014) 303–315.
- 10 Giannuzzi GM, Liberatore R, Mele D, Mazzucco G, Xotta G, Salomoni V, Majorana CE, Di Maggio R. Experimental campaign and numerical analyses of thermal storage concrete modules. *Solar Energy* 2017, 157: 596-602.
- 11 G.M. Giannuzzi, E. Giovannini, R. liberatore, D. Mazzei, D. Mele, T. Crescenzi, "Analisi sperimentale e numerica del comportamento termodinamico di sistemi di accumulo a calore sensibile in materiali cementizi", ENEA, Report RdS/PAR2014/118
- 12 F. Girardi, G.M. Giannuzzi, D. Mazzei, V. Salomoni, C. Majorana, R. Di Maggio, et al., "Recycled additions for improving the thermal conductivity of concrete in preparing energy storage systems", *Construction and Building Materials* 135 (2017) 565–579.
- 13 Ozger OB, Di Maggio R, Giannuzzi GM, Salomoni VA, Majorana CE, et al., "Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for Energy storage systems", *Mater. Des.* 2013; 51: 989–997.
- 14 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.
- 15 Sito codice di calcolo CAST3M: <http://www-cast3m.cea.fr/>
- 16 A. Miliozzi, D. Mele, D. Nicolini, R. Liberatore, E. Veca, G. Napoli, "Caratterizzazione termica e meccanica di miscele di calcestruzzi per accumulo termico a temperature medio-alte con aggiunta di una piccola quantità di materiale a cambiamento di fase stabilizzato in forma", Report RdS/PTR2019/119, ENEA.
- 17 A. Miliozzi, D. Nicolini, "Analisi numerica del comportamento termico di piccoli elementi di accumulo con calcestruzzi e PCM stabilizzati in forma, Report RdS/PTR2019/121, ENEA.
- 18 A. Miliozzi, D. Mele, D. Nicolini, R. Liberatore, E. Veca, G. Napoli, Caratterizzazione termica e meccanica di miscele di calcestruzzi per accumulo termico a temperature

medio-alte con aggiunta di una piccola quantità di materiale a cambiamento di fase stabilizzato in forma, Report RdS/PTR2019/119, ENEA.

- 19 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, Concrete based Thermal Energy Storage Devise, Brevetto n. 102017000129902 presentato il 14/11/2017.
- 20 F. Dominici, L. Torre, PCM stabilizzato in mezzi porosi: ottimizzazione e procedimento di miscelazione in calcestruzzi, Report RdS/PTR2020/185, Università di Perugia.

5 Abbreviazioni ed acronimi

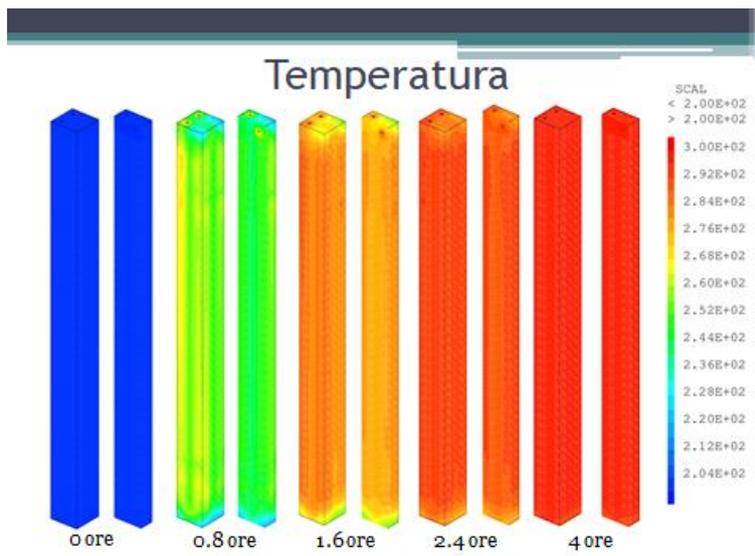
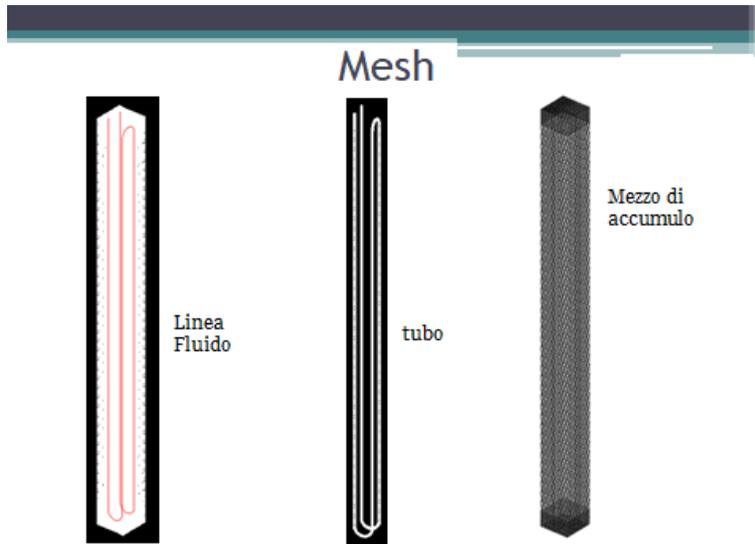
FEM	Finite Analysis Methods
HTF	Heat Transfer Fluid
LHTES	Latent Heat TES
TES	Thermal Energy Storage
PAR	Piano Annuale di Ricerca
PCM	Phase Change Material

Appendice 1: DISTINTA BREVETTO N. ENEA 860

DISTINTA BREVETTO N. ENEA 860

Numero ENEA	860
Numero Domanda Priorità	102017000129902
Titolo Brevetto	Dispositivo di Accumulo Termico, Sistema Modulare Incorporante il Dispositivo e Relativo Metodo di Realizzazione
Inventori	Miliozzi Adio - Giannuzzi Giuseppe Mauro - Mazzei Domenico - Liberatore Raffaele - Crescenzi Tommaso - Mele Domenico
Territorio Protezione	Italia
Data Deposito	14-11-2017
Pubblicato in Banca Dati	15-11-2017
Titolari	ENEA
N. Brevetto Italia	
Riassunto Brevetto	La presente invenzione si riferisce al settore degli impianti industriali, in particolare alle tecnologie di accumulo di energia. La presente invenzione si riferisce, più in particolare, ad un dispositivo modulare finalizzato all'assorbimento/rilascio e conservazione di energia termica per sistemi di accumulo termico, ed al relativo metodo per realizzarlo. Il dispositivo è configurato per essere utilizzato come unità modulare di un sistema di accumulo termico migliorato in termini di versatilità di utilizzo e scalabilità ed è realizzato attraverso un metodo che ne garantisce l'integrità strutturale e ne contiene i costi di produzione.
Status	Vigente
Settore Tecnologico	Thermal processes and apparatus
Tipo Proprietà Intellettuale	Brevetto
Registrazione	MISE.AOO.PIT.Registro Ufficiale U. 0024862.30-01-2020

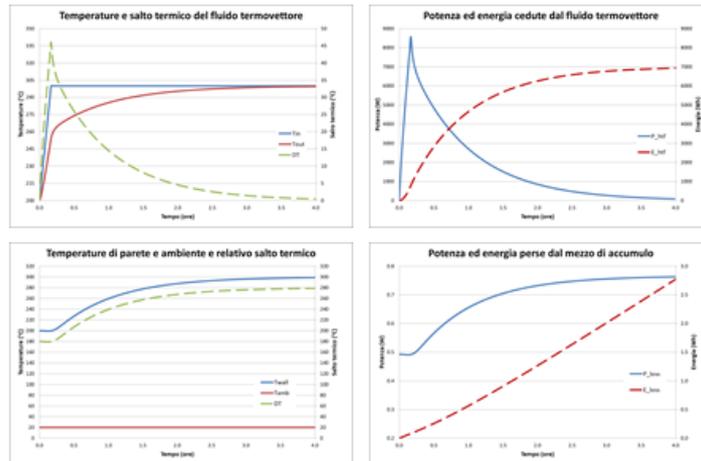
Appendice 2: Principali risultati simulazione nr 1



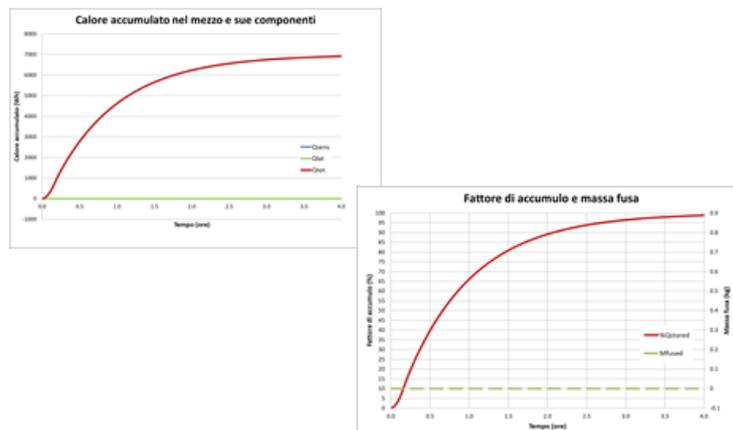
Alcuni risultati

TES_SH01	Caso : solo calcestruzzo		
	-- accumulo CLS --	-- fluido HTF --	-- ambiente --
densità (kg/m ³)	2419	847	
cap. th. (J/kg.C)	727.6	2380	
conduc. (W/m.C)	2	0.1	
cal. lat. (J/kg)	1.00E+09		
temp. fus. (°C)	9000		
velocità htf (m/s)		0.6	
portata htf (kg/s)		7.82E-02	
sezione tubo (m ²)		1.54E-04	
h amb. (W/m ² .C)			0.001
T amb (°C)			20
Elemento			
volume cls (m ³)	0.14305	massa cls (kg)	346
max. cal. sen. (Wh)	6993.6	max. cal. lat. (Wh)	0
capacità term. (Wh)	6993.6	tempo car. 95%(hr)	2.6861

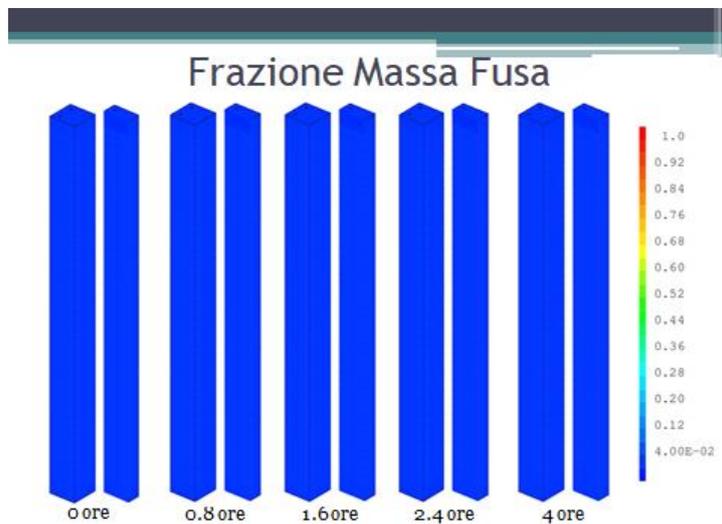
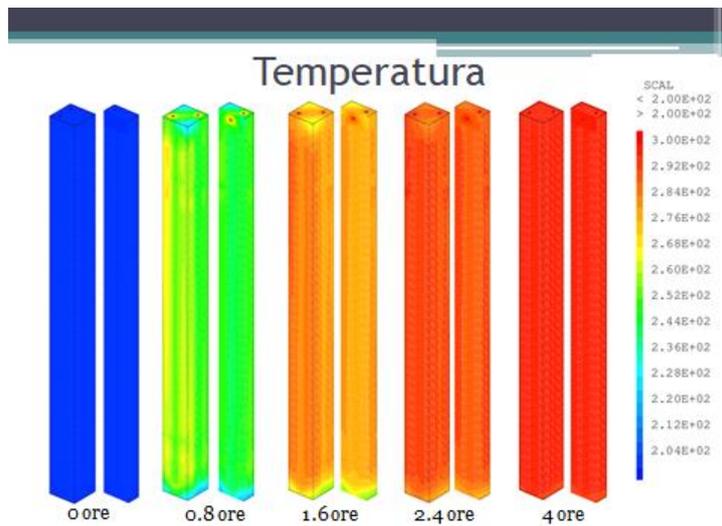
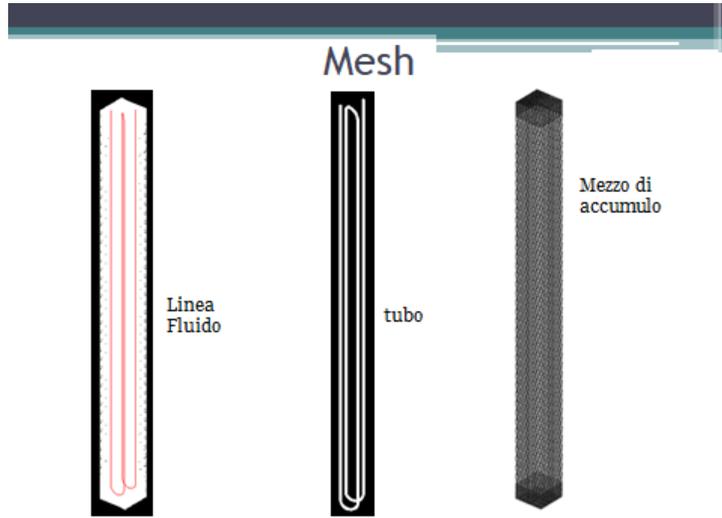
Temperature e potenze olio e ambiente



Calore accumulato



Appendice 3: Principali risultati simulazione nr 2

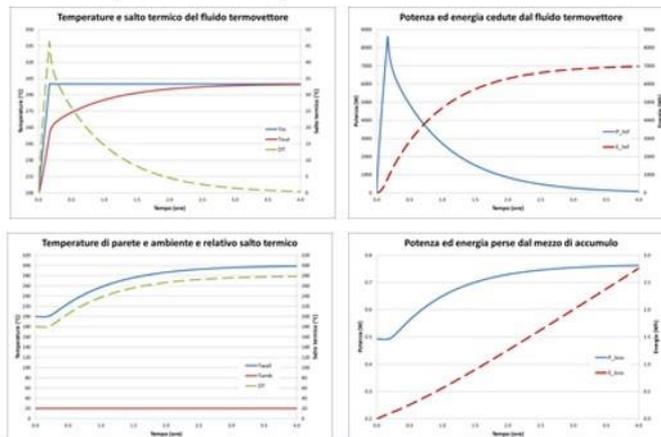


Alcuni risultati

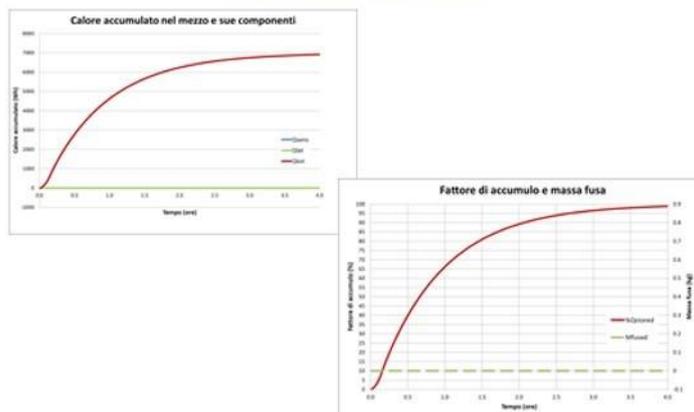
TES_SH02	Caso : solo calcestruzzo		
	-- accumulo CLS --	-- fluido HTF --	-- ambiente --
densità (kg/m ³)	2419	847	
cap. th. (J/kg.C)	727.6	2380	
conduc. (W/m.C)	2	0.1	
cal. lat. (J/kg)	1.00E+09		
temp. fus. (°C)	9000		
velocità htf (m/s)		0.6	
portata htf (kg/s)		7.82E-02	
sezione tubo (m ²)		1.54E-04	
h amb. (W/m ² .C)			0.001
T amb (°C)			20

Elemento			
volume cls (m ³)	0.14304	massa cls (kg)	346
max. cal. sen. (Wh)	6993.2	max. cal. lat. (Wh)	0
capacità term. (Wh)	6993.2	tempo car. 95% (hr)	2.6761

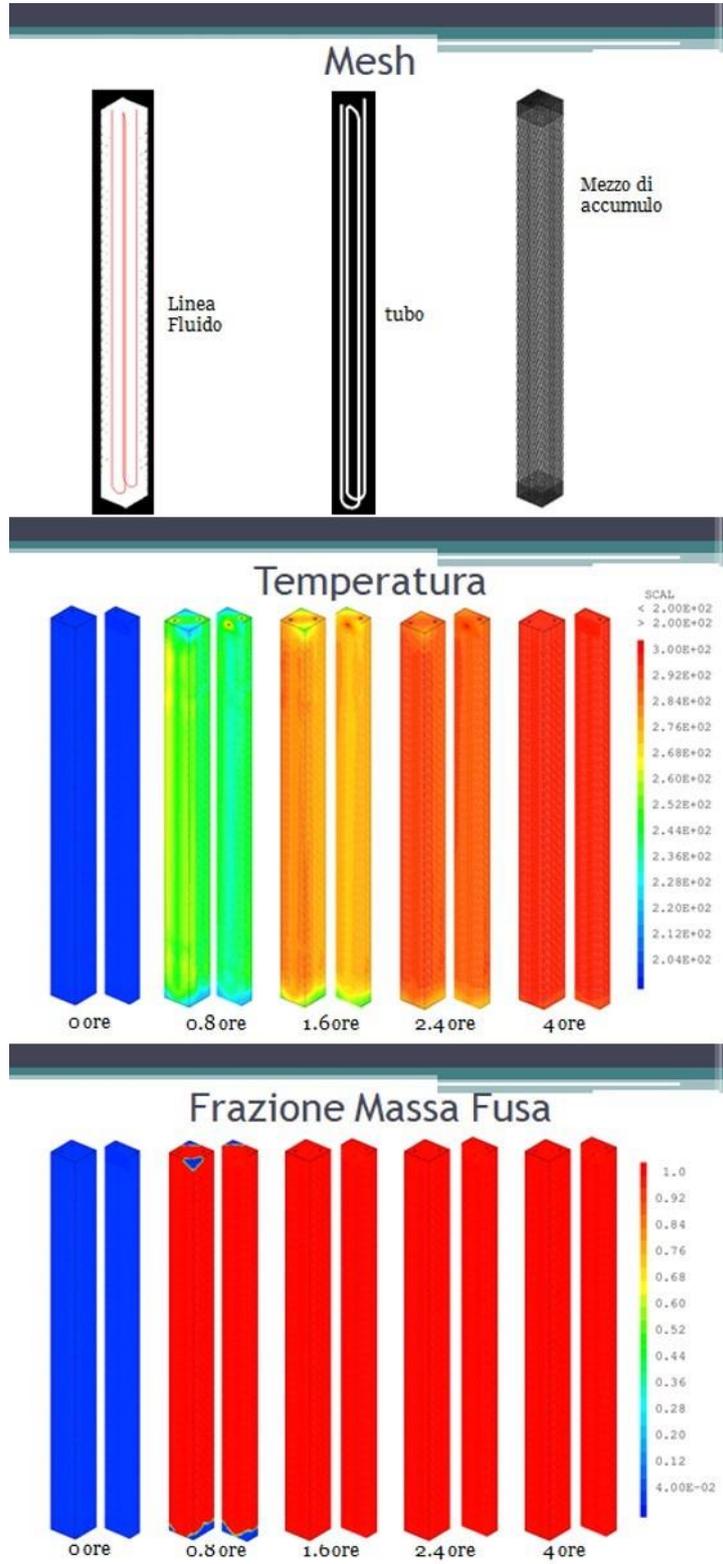
Temperature e potenze olio e ambiente



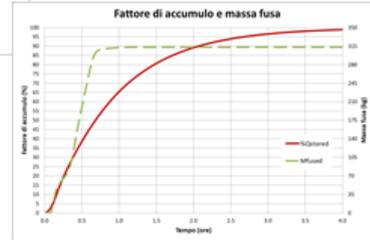
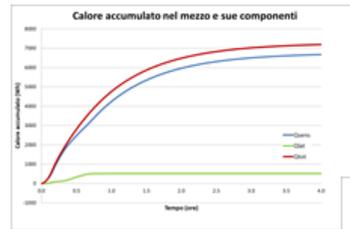
Calore accumulato



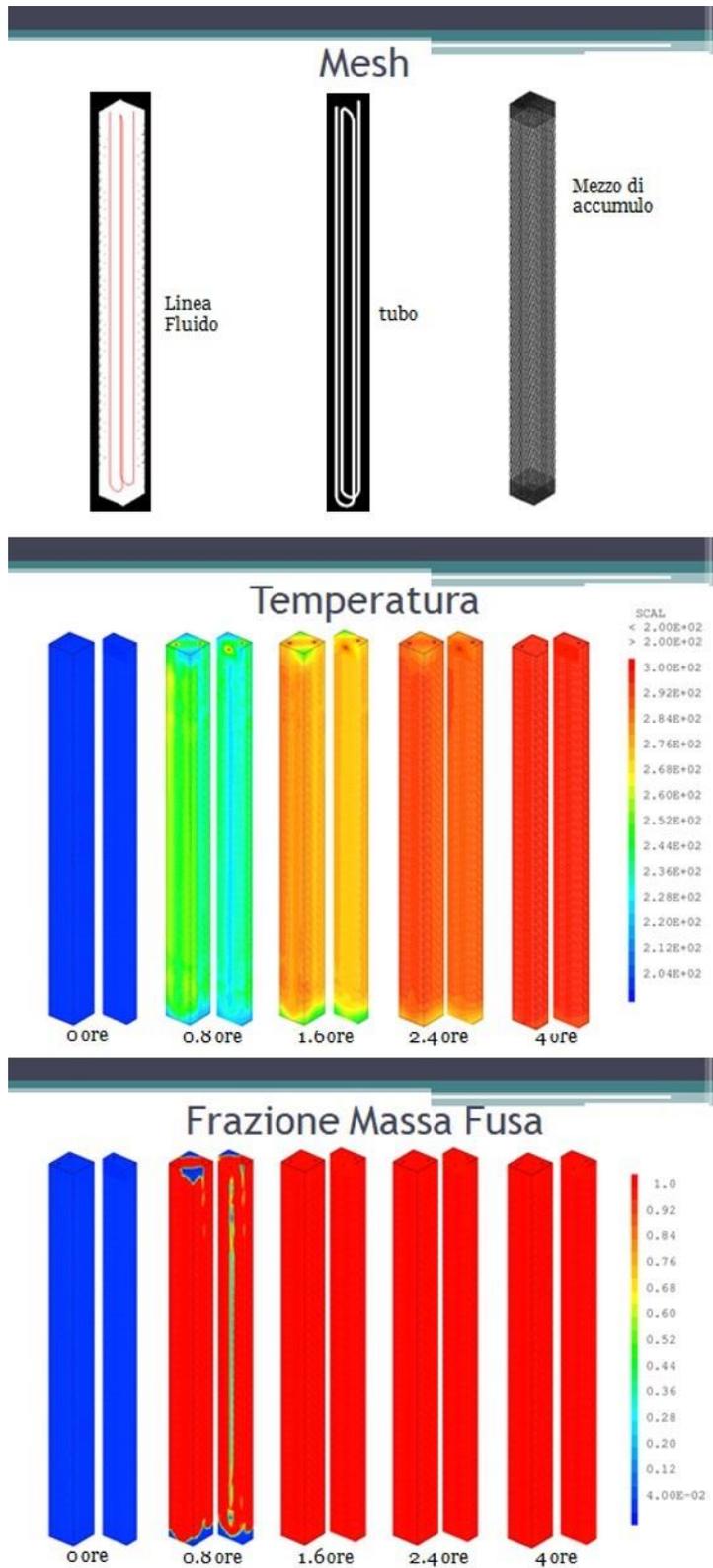
Appendice 4: Principali risultati simulazione nr 3



Calore accumulato



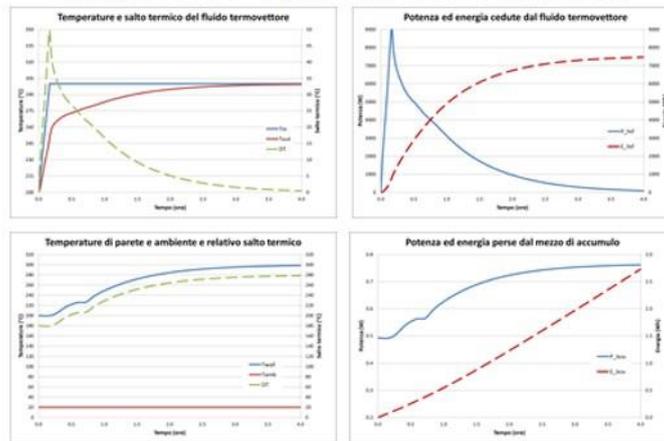
Appendice 5: Principali risultati simulazione nr 4



Alcuni risultati

TES_SH02	Caso :	calcestruzzo+10% SS-CPCM(80/20)		
		-- accumulo CLS --	-- fluido HTF --	-- ambiente --
densità (kg/m3)		1997	847	
cap. th. (J/kg.C)		826.1	2380	
conduc. (W/m.C)		1.88	0.1	
cal. lat. (J/kg)		11900		
temp. fus. (°C)		226		
velocità htf (m/s)			0.6	
portata htf (kg/s)			7.82E-02	
sezione tubo (m2)			1.54E-04	
h amb. (W/m2.C)				0.001
T amb (°C)				20
Elemento				
volume cls (m3)	0.14304	massa cls (kg)	285.64	
max. cal. sen. (Wh)	6554.7	max. cal. lat. (Wh)	944.21	
capacità term. (Wh)	7498.9	tempocar. 95%(hr)	2.67	

Temperature e potenze olio e ambiente



Calore accumulato

