



Ricerca di Sistema elettrico

Produzione di nuovi provini cilindrici con materiale composito PCM

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

PRODUZIONE DI NUOVI PROVINI CILINDRICI CON MATERIALE COMPOSITO PCM

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

Aprile 2021

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.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 I MATERIALI UTILIZZATI	6
2.1.1 <i>Il PCM micro incapsulato</i>	6
2.1.2 <i>Il calcestruzzo base</i>	6
2.1.3 <i>Il composito calcestruzzo/mEPCM con il 5% di PCM</i>	8
2.1.4 <i>Il composito calcestruzzo/mEPCM con il 10% di PCM</i>	9
2.2 PRODUZIONE DI PROVINI CILINDRICI PIENI.....	10
2.3 PRODUZIONE DI PROVINI CILINDRICI CON TUBO IMMERSO.....	13
2.3.1 <i>I provini</i>	13
2.4 MODELLO SEMPLIFICATO PER IL COMPOSITO CLS/SS-CPCM.....	16
2.4.1 <i>Il modello di Calcestruzzo/SS-PCM</i>	16
2.4.1.1 Schema di riferimento	16
2.4.1.2 Materiali	16
2.4.1.3 Parametri di calcolo	16
2.4.1.4 Analisi masse e volumi.....	17
2.4.1.5 Verifica congruenza parametri	18
2.4.1.6 Densità.....	18
2.4.1.7 Relazione tra ratei di PCM	18
2.4.1.8 Calore latente	18
2.4.1.9 Calore sensibile.....	19
2.4.1.10 Conducibilità termica.....	19
2.4.2 <i>Procedura di calcolo</i>	21
2.4.2.1 Dati di riferimento	21
2.4.2.2 Parametri calcolo	22
2.4.3 <i>Esempio di applicazione</i>	22
2.4.4 <i>Conclusioni</i>	26
3 CONCLUSIONI.....	29
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	30
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	30

Sommario

Nel presente documento è stata riportata la prima parte del lavoro svolto nell'ambito della Linea di Attività LA2.4 del progetto 1.2 dell'Accordo ENEA-MiSE 2019-2021, relativa allo "Sviluppo e caratterizzazione di materiali con proprietà termiche incrementate per accumulo termico in calcestruzzo" (PAR2020).

Oggetto del lavoro è quello, a partire da quanto fatto nella linea LA2.1 del PAR2019, di sviluppare delle nuove miscele di calcestruzzo e sali nitrati micro-incapsulati in materiali fossili le cui prestazioni termiche e meccaniche fossero ottimizzate al fine di incrementare la densità di energia accumulata e di verificarne le prestazioni per via sperimentale.

In questa prima parte del lavoro si è proceduto a: i) studiare e realizzare tre mix-design di calcestruzzo additivato con materiale a cambiamento di fase micro-incapsulato, mEPCM: uno base (senza PCM), uno con il 5% in peso di PCM e uno con il 10% in peso di PCM; ii) realizzare 30 provini pieni per ogni miscela e sottoporli a trattamento di degassaggio (a 105°C) e a successivi trattamenti termici a diversi livelli di temperatura (200, 300 e 400°C); iii) realizzare 2 provini con tubo immerso strumentato per ogni miscela; iv) sviluppare un modello semplificato del materiale cls-mEPCM per prevedere le proprietà termiche equivalenti di vari mix-design.

Per lo studio delle miscele di calcestruzzo e la realizzazione dei vari provini, sia pieni che con tubo immerso, ci si è avvalsi della collaborazione della ditta Cipiccia Calcestruzzi di Narni (Terni). I provini pieni sono stati oggetto di caratterizzazione termica e meccanica post-trattamento, oggetto della seconda parte del presente lavoro. I provini con tubo immerso saranno, invece, oggetto di una caratterizzazione termica in temperatura, attraverso cicli termici di carico/scarico del calore tra i 200 ed i 400°C, in un successivo lavoro.

Il modello semplificato realizzato ha consentito di capire i limiti termici operativi dei materiali quali, ad esempio, il rapporto ottimale PCM/diatomite in peso (tra l'80%-20% e l'85%-15%) e la percentuale in peso di mEPCM nella miscela (superiore al 5% in peso, fatti salvi gli eventuali limiti di tipo meccanico).

1 Introduzione

Il presente studio è parte integrante del lavoro previsto nell'ambito della Linea di Attività LA 2.4, 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.

Nella linea di attività LA 2.1, "Analisi della tecnologia di accumulo termico a calore sensibile e latente basata su materiali cementizi con PCM stabilizzato in forma e diatomite" del 2019 si erano caratterizzati alcuni materiali di accumulo termico basati su mescole innovative, realizzate in precedenti attività di ricerca, contenenti calcestruzzo e sali nitrati micro-incapsulati in materiali fossili, progettati per incrementare la capacità termica del sistema [1]. Tutti i provini erano stati sottoposti a trattamento di degassaggio (a 105°C) e a successivi trattamenti termici a diversi livelli di temperatura (200, 300 e 400°C). I risultati ottenuti erano stati sicuramente promettenti, ma per poter utilizzare questi nuovi materiali era necessaria una ulteriore indagine sia per verificare l'applicabilità a miscele di calcestruzzo differenti (replicabilità) sia per caratterizzare le prestazioni attraverso la sperimentazione su di un numero di provini statisticamente significativi.

Per questi motivi e sulla base dei risultati precedenti, sono stati studiati e realizzati dei nuovi materiali compositi con PCM stabilizzato in forma (SS-PCM, Shape Stabilized PCM) in matrice cementizia e realizzati provini cilindrici pieni e in configurazione tube&shell, utilizzando il materiale SS-PCM ottimizzato prodotto dall'Università di Perugia (LA 2.5).

Tali provini saranno successivamente caratterizzati termicamente e meccanicamente e sottoposti ad una analisi comparativa con i risultati della campagna precedente.

Lo studio delle miscele di calcestruzzo e la realizzazione dei vari provini è avvenuta in collaborazione con la ditta Cipiccia Calcestruzzi di Narni (Terni).

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Lo sviluppo e la caratterizzazione di un nuovo mezzo di accumulo termico a medio-alta temperatura a base cementizia contenente una piccola quantità di PCM stabilizzato in forma passa attraverso due fasi distinte:

- lo sviluppo dei materiali da utilizzare, ovvero i mix-design delle differenti miscele di calcestruzzo;
- la caratterizzazione termica e meccanica di questi materiali attraverso la realizzazione ed l'utilizzo di provini cilindrici pieni.

2.1 I materiali utilizzati

Per poter sviluppare i nuovi materiali è stato necessario avere a disposizione la necessaria quantità di PCM micro-incapsulato (mEPCM o SS-PCM) ed aver messo a punto una nuova miscela di calcestruzzo base con le caratteristiche base citate nel brevetto ENEA di un nuovo dispositivo di accumulo termico di tipo cementizio [2].

Successivamente è stato possibile incorporare nel calcestruzzo base una piccola quantità di mEPCM andando a sostituire in modo opportuno alcuni aggregati e realizzando dei nuovi mix-design.

2.1.1 Il PCM micro incapsulato

Il mEPCM, studiato, ottimizzato e prodotto dall'Università di Perugia è costituito da Sali Solari, una miscela di nitrati di sodio e potassio (40/60 wt% $\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3$), come materiale a cambiamento di fase e da diatomite, una farina fossile, come mezzo di supporto poroso. Il rapporto ottimale tra il PCM e la diatomite è stato individuato rispettivamente in 80%/20% in peso. Per i dettagli vedere il relativo report [3].

2.1.2 Il calcestruzzo base

Sulla base delle esperienze maturate in questi anni, frutto di una collaborazione tra ENEA e Cipiccia Calcestruzzi, si è arrivati allo sviluppo di un mix design per il calcestruzzo base che può essere riassunto in Tabella 2-1.

Questo mix-design mostra un basso rapporto acqua/cemento (a/c) = 0.32 ed una densità del calcestruzzo fresco di circa 2434 kg/m³. La curva granulometrica (Figura 2-1) del composto evidenzia come questa sia molto prossima a quella ideale di Bolomey, che tiene conto del sistema cemento e aggregato considerandone anche la lavorabilità. Il rispetto di tale curva, infatti, garantisce il massimo assortimento dimensionale nel quale gli elementi più fini siano allocati nei vuoti interstiziali di quelli medi, e questi ultimi si dispongano a loro volta nei vuoti esistenti tra i granuli più grossi. In queste condizioni, dunque, il composto è ben proporzionato e la quantità di acqua è adeguata.

La miscela base del calcestruzzo è stata concepita per poter operare come mezzo di accumulo termico ad una temperatura di almeno 400°C. Da notare la presenza nell'impasto di fibre metalliche, atte a promuovere la conducibilità del materiale e ridurre i tempi di carico e scarico termico, oltre che incrementare la resistenza meccanica del materiale, e di fibre di nylon, atte a limitare la probabilità di spalling (distacco più o meno violento di sezioni di materiale a causa della elevata pressione prodotta dalla vaporizzazione dell'acqua libera del calcestruzzo).

Le fibre metalliche sono le Fibercoll M13. Queste sono in acciaio, trafilato a freddo ed a basso contenuto di carbonio, sagomato ad uncino per meglio aderire alla matrice cementizia. Le fibre sono lunghe 13 mm ed hanno un diametro di 0.2 mm.

Le fibre di nylon sono le Meraflex. Queste sono fibre corte per calcestruzzo in polipropilene con lunghezza di 12.4 mm e diametro di 0.021 mm

Per aumentare la lavorabilità del materiale è stato utilizzato un particolare super-fluidificante, il PRIMIMUM HR350. Esso è un super-fluidificante a base di polimeri il cui impiego è previsto per la produzione di calcestruzzi a basso rapporto acqua/cemento e di calcestruzzi auto-compattanti (SCC).

Tabella 2-1 Mix design del calcestruzzo base

Componente	Peso del componente in 1 m ³ di calcestruzzo (kg/m ³)
Acqua	117
Cemento	360
Sabbia lavata 0-4 mm	929
Brecciolino 5-15 mm	467
Breccia 15-30 mm	504
Fibre metalliche	50
Fibre Sintetiche	1
Super-fluidificante	4.32
Massa Volumica CLS Fresco	2434

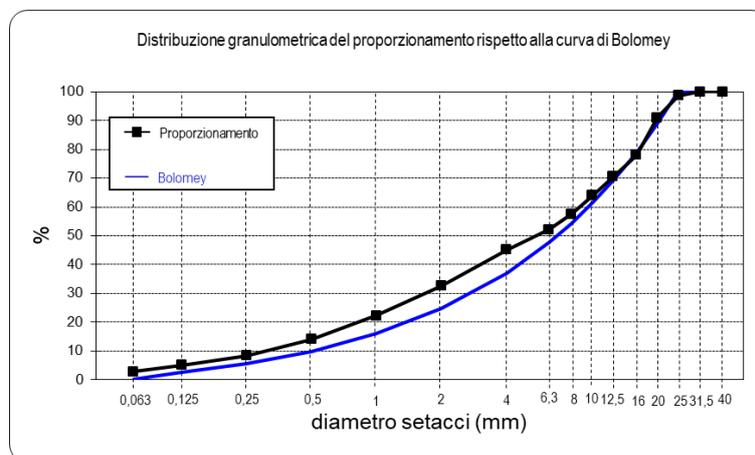


Figura 2-1 Granulometria del mix-design del calcestruzzo base

2.1.3 Il composito calcestruzzo/mEPCM con il 5% di PCM

Il mix-design del calcestruzzo contenente una percentuale in peso di circa il 5% di PCM ha dovuto inglobare circa 126 kg di SS-PCM per ogni metro cubo di materiale. Tale inserimento è stato fatto in sostituzione di un corrispondente volume di aggregato (Tabella 2-2).

Questo mix-design mostra un basso rapporto acqua/cemento (a/c) = 0.37 ed una densità del calcestruzzo fresco di circa 2305 kg/m³. La presenza del 5.45% di SS-PCM rende il nuovo materiale più leggero del calcestruzzo base. La curva granulometrica (Figura 2-2) del composto evidenzia come questa sia alquanto al di sopra della curva ideale di Bolomey e, quindi, che il composto abbia un eccesso di materiale a bassa granulometria. Ciò implica un aumento dell'acqua di impasto, al fine di garantirne la lavorabilità, motivo per cui è stato necessario aumentare il rapporto a/c rispetto a quello senza PCM.

Tabella 2-2 Mix design del calcestruzzo contenete il 5% di PCM

Componente	Peso del componente in 1 m ³ di calcestruzzo (kg/m ³)
Acqua	133
Cemento	360
Sabbia lavata 0-4 mm	853
Brecciolino 5-15 mm	371
Breccia 15-30 mm	407
SS-PCM	126
Fibre metalliche	50
Fibre Sintetiche	1
Super-fluidificante	4.32
Massa Volumica CLS Fresco	2305

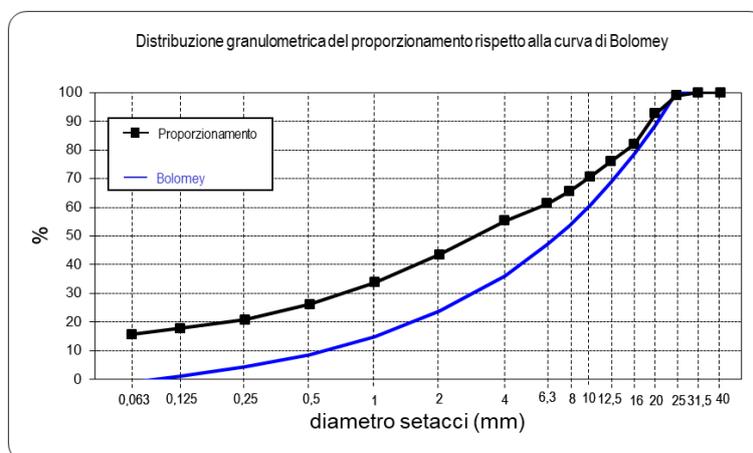


Figura 2-2 Granulometria del mix-design del calcestruzzo contenete il 5% di PCM

2.1.4 Il composito calcestruzzo/mEPCM con il 10% di PCM

Il mix-design del calcestruzzo contenente una percentuale in peso di circa il 10% di PCM ha dovuto inglobare circa 208 kg di SS-PCM per ogni metro cubo di materiale. Tale inserimento è stato fatto in sostituzione di un corrispondente volume di aggregato (Tabella 2-3).

Questo mix-design mostra un basso rapporto acqua/cemento (a/c) = 0.41 ed una densità del calcestruzzo fresco di circa 2206 kg/m³. La presenza del 9.43% di SS-PCM rende il nuovo materiale ancora più leggero del calcestruzzo base. La curva granulometrica (Figura 2-3) del composto evidenzia, anche in questo caso, come questa sia ben al di sopra della curva ideale di Bolomey e, quindi, che il composto abbia un eccesso di materiale a bassa granulometria. Ciò implica un ulteriore aumento dell'acqua di impasto, al fine di garantirne la lavorabilità, motivo per cui è stato necessario aumentare il rapporto a/c rispetto a quello con il 5% di PCM.

Tabella 2-3 Mix design del calcestruzzo contenete il 10% di PCM

Componente	Peso del componente in 1 m ³ di calcestruzzo (kg/m ³)
Acqua	148
Cemento	360
Sabbia lavata 0-4 mm	822
Brecciolino 5-15 mm	288
Breccia 15-30 mm	324
SS-PCM	208
Fibre metalliche	50
Fibre Sintetiche	1
Super-fluidificante	4.32
Massa Volumica CLS Fresco	2206

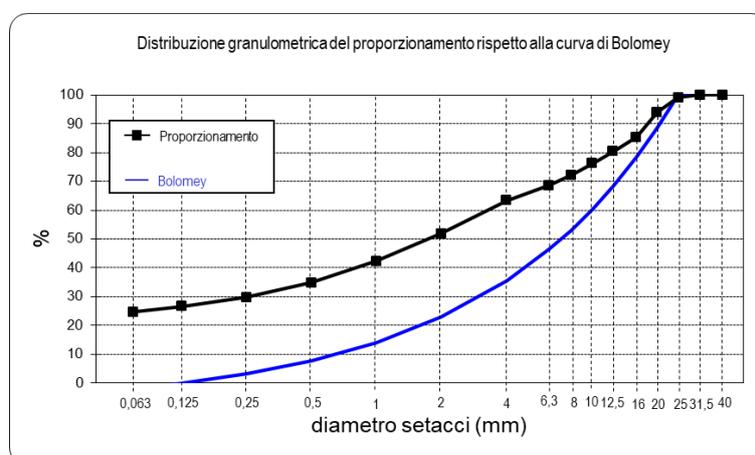


Figura 2-3 Granulometria del mix-design del calcestruzzo contenete il 10% di PCM

2.2 Produzione di provini cilindrici pieni

Con le 3 mescole realizzate, quella con il calcestruzzo base e quelle con il calcestruzzo addizionato con il 5% ed il 10% di PCM, sono stati realizzati 90 provini (30 per tipologia) da sottoporre a caratterizzazione termica e meccanica.

I provini cilindrici pieni sono tutti di uguale dimensione con:

- diametro nominale esterno D di 100 mm e
- altezza nominale H di 200 mm.

Tali dimensioni risultano essere tra quelle standard previste dalla normativa EN 12390-1 [4].

I provini avranno ciascuno un volume nominale di 1.57 dm^3 ed un peso di circa 3.8 kg (Figura 2-4).

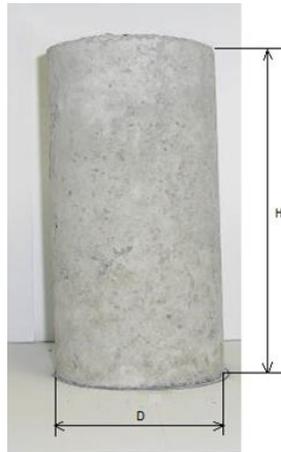


Figura 2-4 Esempio di provino cilindrico pieno

I provini cilindrici pieni, 30 di ciascuna serie, saranno univocamente identificati con due lettere e un numero nel seguente modo:

- una lettera iniziale che indica il tipo di materiale:
 - A, se in calcestruzzo base,
 - B, se in calcestruzzo addizionato con il 5% di PCM, o
 - C, se in calcestruzzo addizionato con il 10% di PCM;
- una seconda lettera che indica il tipo di test cui sono destinati:
 - X per i primi 15, destinati a prove termiche e di compressione, ed
 - Y per i restanti 15, destinati a prove di trazione indiretta;
- un numero progressivo da 01 a 15.

Ad esempio, "AX08" è un provino di calcestruzzo base (A) destinato a prove di termica e compressione (X) con numero 08.

Per la realizzazione e stagionatura dei provini in questione si è seguita la normativa EN 12390-2 [5]. In particolare, a partire dal mix design studiato (Figura 2-5/a) si sono recuperati i quantitativi di materiale necessario (Figura 2-5/b,c,d).



Figura 2-5 Formulazione del mix-design (a) e principali materiali utilizzati: aggregati (b); fibre metalliche (c) e mEPCM (d)

Tutti i materiali, incluso il necessario quantitativo di acqua e additivi, sono stati quindi inseriti, con un opportuno ordine, in un contenitore di remix a pala quadrata e miscelati accuratamente (Figura 2-6).



Figura 2-6 Miscelazione del calcestruzzo ed eventuale mPCM in un contenitore remix a pala quadrata

Il calcestruzzo miscelato è stato quindi gettato in opportuni stampi cilindrici (Figura 2-7/a). Gli stampi sono stati realizzati in modo conforme alla EN 12390 e, prima del riempimento, la loro superficie interna è stata coperta con un sottile film oleoso di materiale di rilascio, per rendere la scasseratura più facile. Durante il getto il calcestruzzo è stato compattato con l'ausilio di un vibratore meccanico interno (Figura 2-7/b). I campioni sono stati compattati in due tempi, prima con altezza di circa 100 mm (metà stampo) e poi con altezza totale. La durata è stata minima per evitare che la vibrazione eccessiva potesse danneggiare lo stampo, evitando anche che il vibratore verticale toccasse il fondo o i lati dello stampo.

A fine gettata, il cemento in eccesso sopra il bordo superiore dello stampo è stato rimosso e la superficie accuratamente livellata. Tutti i campioni sono stati contrassegnati.



Figura 2-7 Stampi utilizzati per la preparazione dei provini (a) e fase di getto e vibroformatura (b)

I campioni di prova sono stati lasciati negli stampi per circa 24 ore, protetti da urti, vibrazioni e disidratazione a una temperatura di $20\pm 5^\circ\text{C}$. Quindi, una volta scasserati, si sono attesi 28 giorni per un indurimento completo in vasca ad una umidità del 100% e temperatura $15-20^\circ\text{C}$ (Figura 2-8).



Figura 2-8 Provini in calcestruzzo durante la fase di stagionatura

Le gettate effettuate sono state le seguenti:

- prima serie (A) : il 03/09/2020 ed il 07/09/2020;
- seconda serie (B) : il 18/12/2020 ed il 22/12/2020;
- terza serie (C) : il 20/02/2021 ed il 24/02/2021.

2.3 Produzione di provini cilindrici con tubo immerso

Con le stesse tre miscele sviluppate sono stati prodotti, oltre ai provini pieni, anche 6 provini cilindrici di lunghezza maggiore e con un tubo immerso, che dovranno essere caratterizzati termicamente utilizzando l'impianto sperimentale Solteca-Air.

2.3.1 I provini

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 150 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.

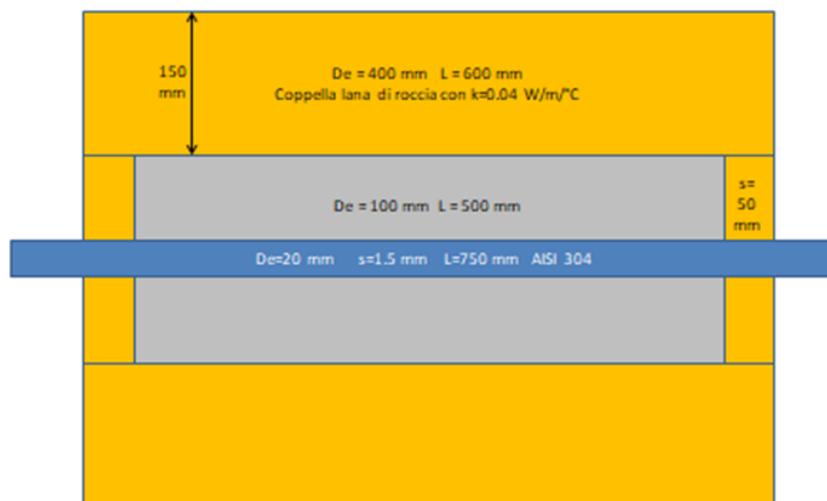


Figura 2-9 Schema e dimensioni dei provini in calcestruzzo con tubo immerso coibentato

I 6 provini sono realizzati, come quelli pieni, con 3 differenti tipi di materiale (A–solo calcestruzzo base; B–calcestruzzo base + 5%wt PCM; C–calcestruzzo base + 10%wt PCM). Ogni provino include 9 termocoppie disposte su 3 posizioni assiali e 3 radiali secondo lo schema riportato in Figura 2-9.

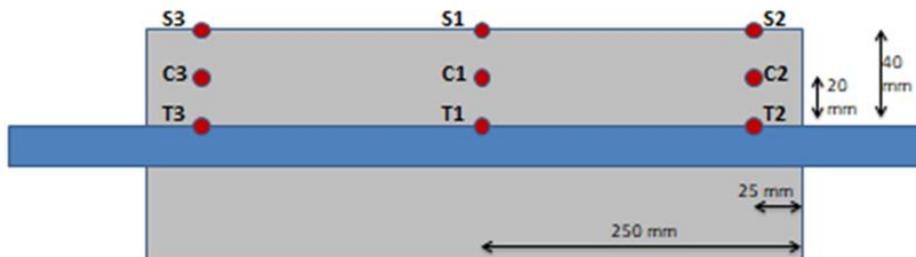


Figura 2-10 Posizionamento delle termocoppie nei provini in calcestruzzo con tubo immerso

Le termocoppie indicate con “C” ed “S” sono state posizionate successivamente alla fase di stagionatura del provino. Al contrario, le termocoppie “T” sono state solidarizzate al tubo interno prima della fase di getto del calcestruzzo. Tali termocoppie sono alloggiare all’interno di opportune piastrine (Figura 2-11), a loro volta fermate su tubo o con opportuna saldatura o, come nel presente caso, con delle fascette metalliche (Figura 2-12).

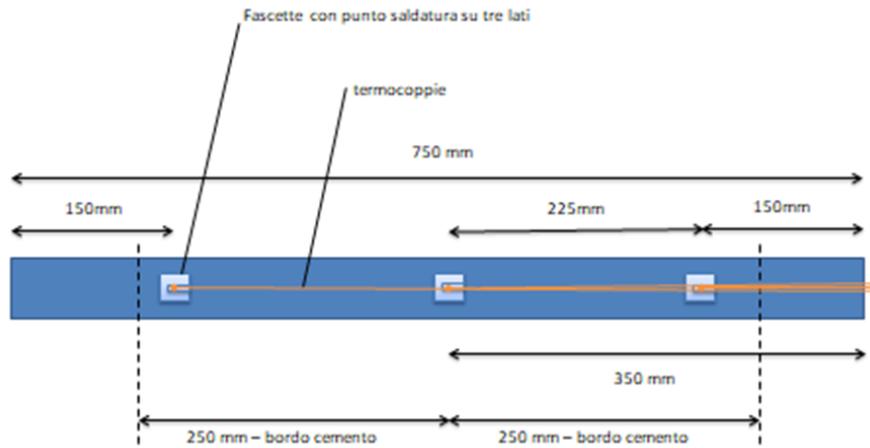


Figura 2-11 Posizionamento delle termocoppie per un provino in calcestruzzo con tubo immerso



Figura 2-12 Bloccaggio di una piastrina con termocoppia su un tubo attraverso una fascetta metallica

Lo stampo dei provini è stato realizzato con un cilindro in PVC, opportunamente sorretto da un supporto il cui fondo presenta un foro attraverso il quale è stato fatto passare e posizionato il tubo metallico. Quindi, si è effettuato il getto della relativa miscela di calcestruzzo, vibrando il recipiente durante il riempimento (Figura 2-13)



Figura 2-13 Fasi del getto di calcestruzzo per provini con tubo. Da sinistra: preparazione dello stampo, posizionamento del tubo con termocoppie, riempimento e vibratura, completamento del getto.

Dopo circa 48 ore il calcestruzzo si è solidificato ed i provini, comprensivi del cilindro in PVC, sono stati estratti dal supporto e lasciati stagionare in un ambiente fresco ed umido per 28 giorni (Figura 2-14).



Figura 2-14 Provini con tubo immerso estratti dal supporto dopo 48 ore ed in fase di stagionatura per 28 giorni

A stagionatura completata, sono state inserite le termocoppie “C” nei fori opportunamente realizzati nel cilindro di calcestruzzo e posizionate sulla superficie dello stesso quelle “S”. Quindi, il provino con tubo può essere coibentato con una coppella ed un materassino in lana di roccia (Figura 2-17), pronto per la caratterizzazione sperimentale ad alta temperatura.



Figura 2-15 Esempio di coibentazione (coppelle e materassino) da poter utilizzare

Le gettate effettuate sono state le seguenti:

- 2 provini di tipo A : il 17/03/2021;
- 2 provini di tipo B : il 24/03/2021;
- 2 provini di tipo C : il 31/03/2021.

2.4 Modello semplificato per il composito cls/SS-CPCM

In questo paragrafo è illustrato un semplice modello teorico utilizzato per valutare l'impegno dei singoli materiali e simulare il comportamento termico di un composito di calcestruzzo/SS-PCM. L'SS-PCM è supposto essere composto da diatomite e sale solare (PCM).

2.4.1 Il modello di Calcestruzzo/SS-PCM

2.4.1.1 Schema di riferimento

In **Figura 2-16** è mostrato lo schema di riferimento per un semplice modello che rappresenta un composito calcestruzzo/SS-CPCM. In esso, una capsula di diatomite contenente PCM e aria è immersa in un cubo di materiale solido costituito da calcestruzzo.



Figura 2-16 Modello elementare di calcestruzzo/SS-PCM

2.4.1.2 Materiali

I dati di base dei materiali sono i seguenti:

ρ_{cls}	densità calcestruzzo	$c_{p,cls}$	calore specifico calcestruzzo	k_{cls}	conducibilità calcestruzzo
ρ_{pcm}	densità pcm	$c_{p,pcm}$	calore specifico pcm	k_{pcm}	conducibilità PCM
λ_{pcm}	calore latente pcm	ε	rateo variazione volume pcm dopo fusione		
ρ_{dia}	densità diatomite (bulk)	$c_{p,dia}$	calore specifico diatomite	k_{dia}	conducibilità diatomite
p	grado di porosità della diatomite (rapporto volume vuoti su volume totale)				

L'aria è considerata al pari del vuoto.

2.4.1.3 Parametri di calcolo

I parametri di calcolo sono i seguenti:

x	rapporto tra massa di PCM e massa del composito
y	rapporto tra massa di PCM e massa della Diatomite

2.4.1.4 Analisi masse e volumi

Si indicano con **V** ed **M** rispettivamente il volume e la massa del composito.

La massa M è data da:

$$M = M_{cls} + M_{dia} + M_{pcm} \quad \text{(Equazione 2-1)}$$

In cui:

$$M_{pcm} = xM \quad \text{(Equazione 2-2)}$$

$$M_{dia} = \frac{x}{y}M \quad \text{(Equazione 2-3)}$$

Quindi:

$$M = M_{cls} + xM + \frac{x}{y}M$$

$$M_{cls} = \left(1 - x - \frac{x}{y}\right)M \quad \text{(Equazione 2-4)}$$

Da questa, noto M è possibile ricavare la massa del calcestruzzo:

$$M_{cls} = zM \quad \text{(Equazione 2-5)}$$

$$z = \left(1 - x - \frac{x}{y}\right) \quad \text{(Equazione 2-6)}$$

In cui:

Per quanto riguarda il volume **V** possiamo scrivere:

$$V = V_{cls} + V_{dia}$$

In cui V_{dia} è il volume complessivo occupato dalla diatomite, incluso il bulk, i vuoti (aria) ed il pcm.

Esplicitando i termini:

$$V = \frac{M_{cls}}{\rho_{cls}} + \frac{M_{dia}}{\rho_{dia}(1-p)} = \frac{zM}{\rho_{cls}} + \frac{\frac{x}{y}M}{\rho_{dia}(1-p)} = \left[\frac{z}{\rho_{cls}} + \frac{\frac{x}{y}}{\rho_{dia}(1-p)} \right] M$$

Da cui:

$$M = V \left[\frac{z}{\rho_{cls}} + \frac{\frac{x}{y}}{\rho_{dia}(1-p)} \right]^{-1} \quad \text{(Equazione 2-7)}$$

In sostanza, noto il volume **V** di SS-PCM da produrre è possibile calcolare sia la sua massa totale che le masse dei singoli componenti. Inoltre:

$$V_{dia} = \frac{M_{dia}}{\rho_{dia}(1-p)} = \frac{M}{\rho_{dia}(1-p)} \left(\frac{x}{y}\right) \quad \text{(Equazione 2-8)}$$

$$V_{pcm} = \frac{M_{pcm}}{\rho_{pcm}} = \frac{xM}{\rho_{pcm}} \quad \text{(Equazione 2-9)}$$

$$V_{cls} = \frac{M_{cls}}{\rho_{cls}} = \frac{zM}{\rho_{cls}} \quad (\text{Equazione 2-10})$$

Il volume dei vuoti presente nella diatomite (senza pcm) è:

$$V_v = pV_{dia} = p \frac{M_{dia}}{\rho_{dia}(1-p)} = \frac{1}{\rho_{dia}} \frac{p}{(1-p)} \left(\frac{x}{y}\right) M$$

Parte del volume dei vuoti sarà riempito dal PCM. In tal caso:

$$V_{aria} = V_v - V_{pcm} \quad (\text{Equazione 2-11})$$

La frazione di aria presente all'interno dei pori della diatomite è:

$$f_a = \frac{V_{aria}}{V_v} = \frac{V_v - V_{pcm}}{V_v} = 1 - \frac{V_{pcm}}{V_v} = 1 - \left[\frac{y(1-p)}{p} \frac{\rho_{dia}}{\rho_{pcm}} \right] \quad (\text{Equazione 2-12})$$

2.4.1.5 Verifica congruenza parametri

E' possibile fare una verifica sulla quantità di PCM presente. La massima quantità di PCM introducibile, tenendo in conto l'espansione volumetrica ε nel cambio di fase, è allora:

$$M_{pcm}^{max} = \rho_{pcm} V_v (1 - \varepsilon) = \frac{\rho_{pcm}}{\rho_{dia}} \frac{p(1-\varepsilon)}{(1-p)} \left(\frac{x}{y}\right) M$$

Il grado w di riempimento dei vuoti con il PCM è:

$$w = \frac{M_{pcm}}{M_{pcm}^{max}} = \frac{xM}{\frac{\rho_{pcm} p(1-\varepsilon)}{\rho_{dia} (1-p)} \left(\frac{x}{y}\right) M} = \frac{y}{\frac{\rho_{pcm} p(1-\varepsilon)}{\rho_{dia} (1-p)}} = y \frac{\rho_{dia} (1-p)}{\rho_{pcm} p(1-\varepsilon)} \quad (\text{Equazione 2-13})$$

Affinché sia rispettata la condizione $w < 1$ deve risultare:

$$y < \frac{\rho_{pcm} p(1-\varepsilon)}{\rho_{dia} (1-p)}$$

2.4.1.6 Densità

Dalla relazione tra massa M e volume V del SS-CPCM deriva che:

$$\rho_{eq} = \frac{M}{V} = \frac{y\rho_{cls}\rho_{dia}(1-p)}{zy\rho_{dia}(1-p) + x\rho_{cls}} \quad (\text{Equazione 2-14})$$

2.4.1.7 Relazione tra ratei di PCM

La quantità di PCM presente nel composto è espressa generalmente come rateo in massa o in volume. I due ratei sono chiaramente correlati. Tali relazioni sono le seguenti:

$$R_M = \frac{M_{pcm}}{M} = x \quad (\text{Equazione 2-15})$$

$$R_V = \frac{V_{pcm}}{V} = \frac{\rho_{eq}}{\rho_{pcm}} x = \frac{\rho_{eq}}{\rho_{pcm}} R_M \quad (\text{Equazione 2-16})$$

2.4.1.8 Calore latente

Il calore latente assorbito o rilasciato dal composto è quello corrispondente al solo PCM.

$$Q_{lat} = Q_{lat}^{pcm}$$

Da cui è facile ricavare il calore latente equivalente del composto:

$$\lambda_{eq}M = \lambda_{pcm}M_{pcm}$$

$$\lambda_{eq} = \lambda_{pcm} \frac{M_{pcm}}{M} = x\lambda_{pcm} \quad (\text{Equazione 2-17})$$

Chiaramente anche le temperature di fusione, onset ed endset, rimangono inalterate.

2.4.1.9 Calore sensibile

Il calore sensibile assorbito o rilasciato dal composto è la somma dei calori sensibili del calcestruzzo, della diatomite e del PCM:

$$Q_{sens} = Q_{sens}^{cls} + Q_{sens}^{dia} + Q_{sens}^{pcm}$$

Allora, la capacità termica equivalente del composto è data da:

$$M c_{p,eq} \Delta T = M_{cls} c_{p,cls} \Delta T + M_{dia} c_{p,dia} \Delta T + M_{pcm} c_{p,pcm} \Delta T$$

$$c_{p,eq} = \frac{M_{cls}}{M} c_{p,cls} + \frac{M_{dia}}{M} c_{p,dia} + \frac{M_{pcm}}{M} c_{p,pcm}$$

$$c_{p,eq} = z c_{p,cls} + \frac{x}{y} c_{p,dia} + x c_{p,pcm} \quad (\text{Equazione 2-18})$$

2.4.1.10 Conducibilità termica

- **Insieme pcm-aria**

Immaginiamo un cubetto composto da PCM+aria in cui S è la superficie di un singolo lato. Se il calore entra dalla faccia individuata dalle superficie S, a temperatura T+ΔT, ed esce dalla faccia opposta, a temperatura T, la potenza termica P che si trasmette attraverso il mezzo, PCM+aria, trova una superficie di trasmissione ridotta rispetto quella apparente a causa della frazione f_a di aria presente:

$$P = \frac{k_{pcm}}{L} S (1 - f_a) \Delta T$$

Per un mezzo equivalente che trasmetta la stessa potenza si ha:

$$P = \frac{k_{eq,pcm}}{L} S \Delta T$$

Da cui:

$$k_{eq,pcm} = k_{pcm} (1 - f_a) \quad (\text{Equazione 2-19})$$

- **Insieme diatomite-pcm**

Il calore entra dalla faccia individuata dalle superfici A e B, a temperatura T+ΔT, ed esce dalla faccia opposta, a temperatura T. Nello schema di Figura 2-17, in cui MAT1 è il PCM+aria e MAT2 la diatomite si ha:

$$L = V_{dia}^{1/3} \quad L_1 = V_v^{1/3} \quad \frac{L_1}{L} = \left(\frac{V_v}{V_{dia}} \right)^{1/3} = p^{1/3}$$

La potenza termica si trasmette in parallelo attraverso la superficie individuata da A, solo diatomite, e attraverso il parallelepipedo individuato da B, con diat-pcm-diat in serie, in cui:

$$P = P_A + P_B$$

$$\frac{k_{eq,sscpcm}}{L} L^2 \Delta T = \frac{k_{dia}}{L} (L^2 - L_1^2) \Delta T + \frac{k_{serie}}{L} L_1^2 \Delta T$$

$$k_{eq,sscpcm} = k_{dia} \left(1 - \frac{L_1^2}{L^2} \right) + k_{serie} \frac{L_1^2}{L^2}$$

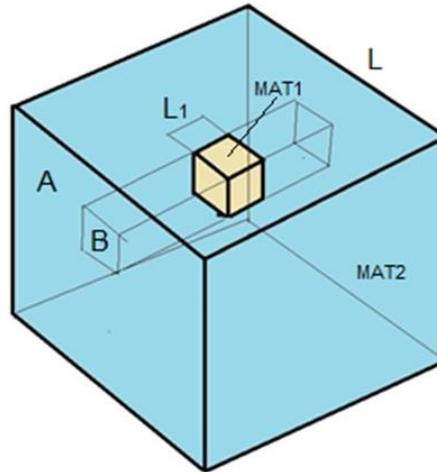


Figura 2-17 Schema per calcolo conduzione equivalente

Detto ϕ il flusso termico che attraversa la sezione B, in condizioni stazionarie, si ha:

$$\phi = \frac{k_{serie}}{L} \Delta T = \frac{2k_{dia}}{L - L_1} \Delta T_0 = \frac{k_{eq,pcm}}{L_1} \Delta T_1$$

Con ΔT_0 il salto termico sull'elemento di diatomite iniziale o finale (MAT2) e ΔT_1 quello su PCM+aria (MAT1).

$$\Delta T = 2\Delta T_0 + \Delta T_1$$

$$\frac{L}{k_{serie}} \phi = \frac{L - L_1}{k_{dia}} \phi + \frac{L_1}{k_{eq,pcm}} \phi = \frac{k_{eq,pcm}(L - L_1) + k_{dia}L_1}{k_{dia}k_{eq,pcm}} \phi$$

$$k_{serie} = \frac{k_{dia}k_{eq,pcm}}{k_{eq,pcm} \left(1 - \frac{L_1}{L}\right) + k_{dia} \frac{L_1}{L}}$$

In conclusione:

$$k_{eq,sscpcm} = k_{dia} \left(1 - \frac{L_1^2}{L^2}\right) + \frac{k_{dia}k_{eq,pcm}}{k_{eq,pcm} \left(1 - \frac{L_1}{L}\right) + k_{dia} \frac{L_1}{L}} \frac{L_1^2}{L^2}$$

$$k_{eq,sscpcm} = k_{dia} \left(1 - p^{2/3}\right) + \frac{k_{dia}k_{eq,pcm}p^{2/3}}{k_{eq,pcm}(1-p^{1/3}) + k_{dia}p^{1/3}} \quad (\text{Equazione 2-20})$$

- **Insieme cls/ss-pcm**

Per valutare la conducibilità equivalente del composto si fa l'ipotesi che il calore venga trasmesso attraverso due facce opposte del cubo (Figura 2-17), la superficie A di MAT2 e la sua opposta) e che le altre siano adiabatiche. In tal caso, il calore entra dalla faccia individuata dalle superfici A e B, a temperatura $T+\Delta T$, ed esce dalla faccia opposta, a temperatura T.

Nello schema si ha:

$$L = V^{1/3} \quad L_1 = V_{dia}^{1/3} \quad \frac{L_1}{L} = \left(\frac{V_{dia}}{V}\right)^{1/3} = \left(\frac{x\rho_{eq}}{y\rho_{dia}}\right)^{1/3} = R^{1/3}$$

La potenza termica si trasmette in parallelo attraverso la corona individuata da A, solo calcestruzzo, e attraverso il parallelepipedo individuato da B, con cls-sspcm-cls in serie. Quindi, la potenza complessiva è:

$$P = P_A + P_B$$

Da cui è possibile ricavare la conducibilità equivalente del composto:

$$\frac{k_{eq}}{L} L^2 \Delta T = \frac{k_{cls}}{L} (L^2 - L_1^2) \Delta T + \frac{k_{serie}}{L} L_1^2 \Delta T$$

$$k_{eq} = k_{cls} \left(1 - \frac{L_1^2}{L^2} \right) + k_{serie} \frac{L_1^2}{L^2}$$

Detto ϕ il flusso termico che attraversa la sezione B, in condizioni stazionarie, si ha:

$$\phi = \frac{k_{serie}}{L} \Delta T = \frac{2k_{cls}}{L - L_1} \Delta T_0 = \frac{k_{eq,sscpcm}}{L_1} \Delta T_1$$

Con ΔT_0 il salto termico sull'elemento di diatomite iniziale o finale e ΔT_1 quello su PCM+aria. Il salto termico complessivo attraverso il volume B è:

$$\Delta T = 2\Delta T_0 + \Delta T_1$$

Dalla relazione precedente è possibile ricavare la conducibilità del materiale in serie (B):

$$\frac{L}{k_{serie}} \phi = \frac{L - L_1}{k_{cls}} \phi + \frac{L_1}{k_{eq,sscpcm}} \phi = \frac{k_{eq,sscpcm}(L - L_1) + k_{cls}L_1}{k_{cls}k_{eq,sscpcm}} \phi$$

$$k_{serie} = \frac{k_{cls}k_{eq,sscpcm}}{k_{eq,sscpcm} \left(1 - \frac{L_1}{L} \right) + k_{cls} \frac{L_1}{L}}$$

In conclusione, sostituendo:

$$k_{eq} = k_{cls} \left(1 - \frac{L_1^2}{L^2} \right) + \frac{k_{cls}k_{eq,sscpcm}}{k_{eq,sscpcm} \left(1 - \frac{L_1}{L} \right) + k_{cls} \frac{L_1}{L}} \frac{L_1^2}{L^2}$$

$$k_{eq} = k_{cls} (1 - R^{2/3}) + \frac{k_{cls}k_{eq,sscpcm}R^{2/3}}{k_{eq,sscpcm}(1 - R^{1/3}) + k_{cls}R^{1/3}} \quad (\text{Equazione 2-21})$$

2.4.2 Procedura di calcolo

Sulla base dello sviluppo precedente è possibile definire una procedura di calcolo per il modello proposto come illustrato sinteticamente nei paragrafi successivi.

2.4.2.1 Dati di riferimento

ρ_{cls}	densità calcestruzzo
$c_{p,cls}$	calore specifico calcestruzzo
k_{cls}	conducibilità termica calcestruzzo
ρ_{pcm}	densità pcm
$c_{p,pcm}$	calore specifico pcm
k_{pcm}	conducibilità termica pcm
λ_{pcm}	calore latente pcm
ε	rateo variazione volume pcm dopo fusione
ρ_{dia}	densità diatomite (bulk)
$c_{p,dia}$	calore specifico diatomite (bulk)

- k_{dia} conducibilità termica diatomite (bulk)
 p grado di porosità della diatomite (rapporto volume vuoti su volume totale)

2.4.2.2 Parametri calcolo

- x rapporto tra massa di PCM e massa del composito
 y rapporto tra massa di PCM e massa della Diatomite
 V volume di SS-CPCM da produrre (SS-CPCM: solar salts, composite material pcm)

2.4.3 Esempio di applicazione

Come esempio di applicazione del modello Calcestruzzo/SS-CPCM consideriamo un possibile composto formato da calcestruzzo/diatomite e sale solare.

Le caratteristiche dei costituenti sono riportate nella seguente Tabella 2-4:

Proprietà	Valore	Unità	Ident.
Calcestruzzo			
densità	2420	kg/m ³	ρ_{cls}
calore specifico	730	J/(kg °C)	cp_{cls}
conducibilità	2	W/(m °C)	k_{cls}
Diatomite			
densità (bulk)	2000	kg/m ³	ρ_{dia}
calore specifico (bulk)	900	J/(kg °C)	cp_{dia}
conducibilità	0.05	W/(m °C)	k_{dia}
grado porosità	91%		p
PCM			
densità	2000	kg/m ³	ρ_{PCM}
calore specifico	1500	J/(kg °C)	cp_{PCM}
calore latente	105000	J/kg	λ_{PCM}
conducibilità	0.5	W/(m °C)	k_{PCM}
espans. vol. pcm dopo fusione	4.60%		ε

Tabella 2-4 – Caratteristiche fisiche cemento, diatomite e sale solare

In queste valutazioni il volume V di composito da produrre è considerato essere di **1 m³**.

Analisi 1: si considera una presenza di PCM nel nuovo materiale costante e pari al 5% in peso. Si analizzeranno le prestazioni del composito al variare del rapporto in massa tra PCM e diatomite. In questo rapporto il PCM sarà fatto variare tra il 50% e il 95% in massa. Ovviamente, verrà anche verificato che tale rapporto non ecceda quello massimo previsto ($y_{max} = 9.6$).

Parametri calcolo (Analisi 1)	pcm	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
	diat	50%	45%	40%	35%	30%	25%	20%	15%	10%	5%
rapp massa PCM/Composito	x	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
rapp massa PCM/Diatomite	y	1.00	1.22	1.50	1.86	2.33	3.00	4.00	5.67	9.0	19.0

Tabella 2-5 – Variazione dei parametri di calcolo per la prima analisi

Analisi 2: si considera un rapporto in massa tra PCM e Diatomite costante e pari a 4, ovvero con l'80% in peso di PCM e il 20% di diatomite. Si analizzeranno le prestazioni del composito al variare della quantità di PCM nel materiale finale. Detta quantità varierà tra lo 0.05% e il 10% in peso del PCM.

Parametri calcolo (Analisi 2)	pcm	80%	80%	80%	80%	80%	80%
	diat	20%	20%	20%	20%	20%	20%
rapp massa PCM/composito	x	0.05%	2%	4%	6%	8%	10%
rapp massa PCM/Diatomite	y	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

Tabella 2-6 – Variazione dei parametri di calcolo per la seconda analisi

Per valutare il calore accumulato si è ipotizzato un salto termico del composto di circa 100°C attorno alla temperatura di fusione del PCM. La densità di energia accumulata che avrebbe avuto il solo calcestruzzo è di circa 49 kWh/m³ e funge da riferimento. Nei grafici che seguono sono riportati i vari andamenti, dove a rappresentare il rapporto in massa tra PCM e diatomite è utilizzata la frazione (in %) di PCM.

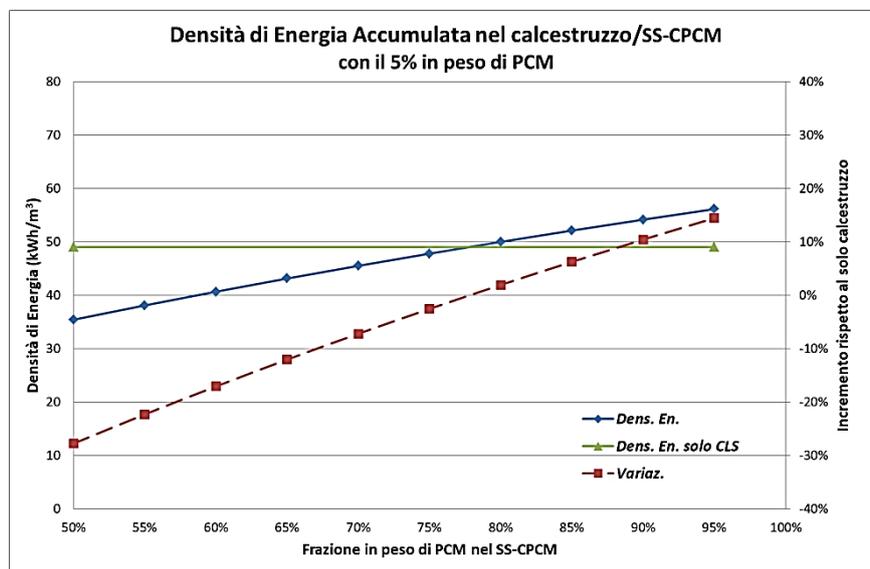


Figura 18 –Densità di energia accumulata nel calcestruzzo/SS-CPCM con il 5%wt di PCM per un incremento di temperatura di 100°C attorno al punto di fusione

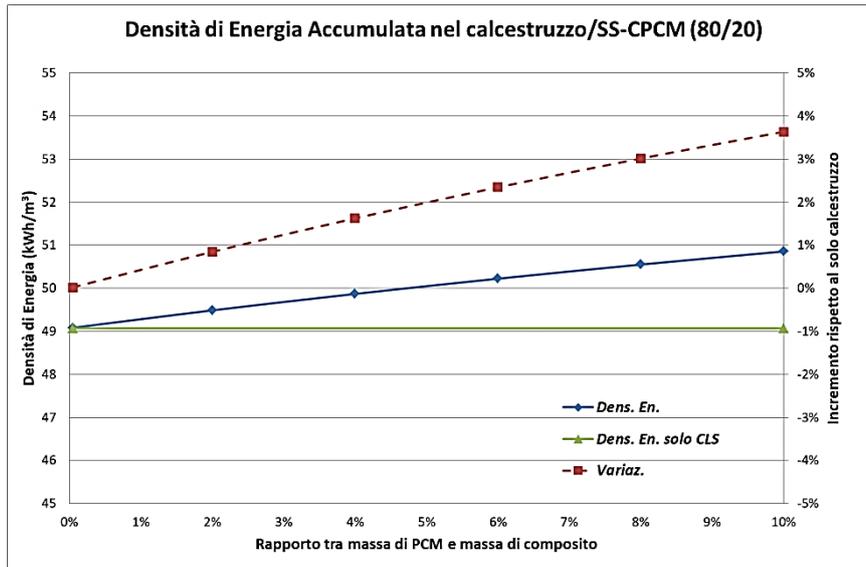


Figura 19 –Densità di energia accumulata nel calcestruzzo/SS-CPCM con un rapporto PCM/diatomite 80%-20% per un incremento di temperatura di 100°C attorno al punto di fusione

La **Densità di Energia Accumulata**, in presenza di un 5% in peso di PCM, risulta essere inferiore al solo cls se il rapporto PCM/diatomite rimane inferiore al 80%-20%. Per ottenere un incremento del 5-10% occorre arrivare a percentuali di PCM vicine al 85-90%.

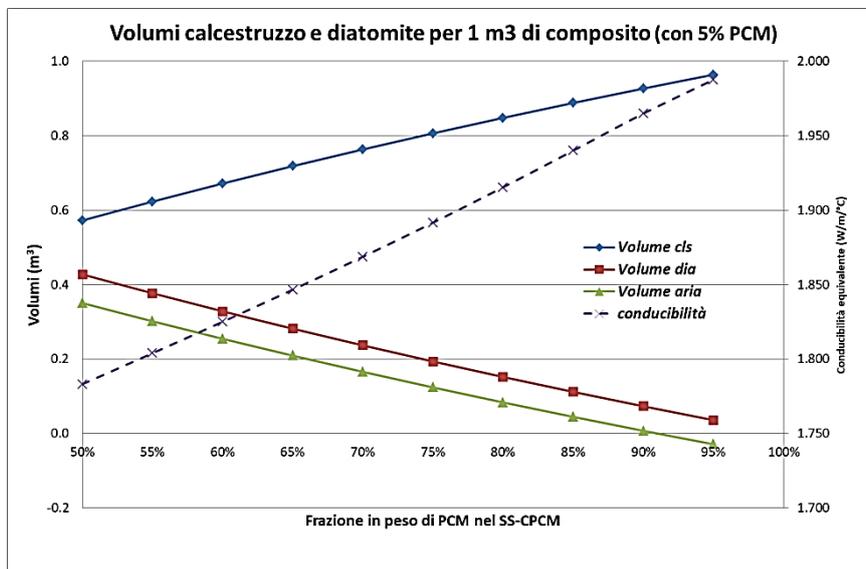


Figura 20 –Volumi di calcestruzzo e diatomite presenti in 1 m3 di SS-CPCM con il 5%wt di PCM e conducibilità termica di quest'ultimo

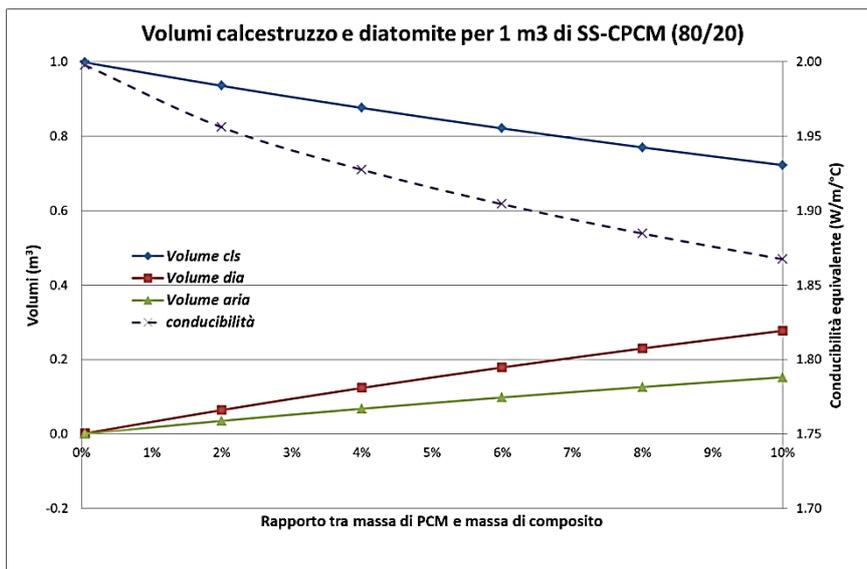


Figura 21 – Volumi di calcestruzzo e diatomite presenti in 1 m3 di SS-CPCM con un rapporto PCM/diatomite 80%-20% e conducibilità termica di quest'ultimo

Nel caso di un 5% in peso di PCM con un rapporto PCM/diatomite attorno al 50%-50% i volumi di calcestruzzo e diatomite sono confrontabili, ciò in ragione di un volume di aria elevato. Una tale condizione può compromettere notevolmente la resistenza meccanica del calcestruzzo/SS-CPCM. Per ottenere dei rapporti in volume “soddisfacenti” occorre ancora una volta arrivare a percentuali di PCM vicine al 85-90%. Tali rapporti tornano ancora a ridursi se si passa dal 5% al 10% in peso di PCM.

La conducibilità termica equivalente del materiale, invece, non risente molto della variazione in peso del PCM e della diatomite rimanendo compresa tra 1.8 e 2.0 W/m²/°C.

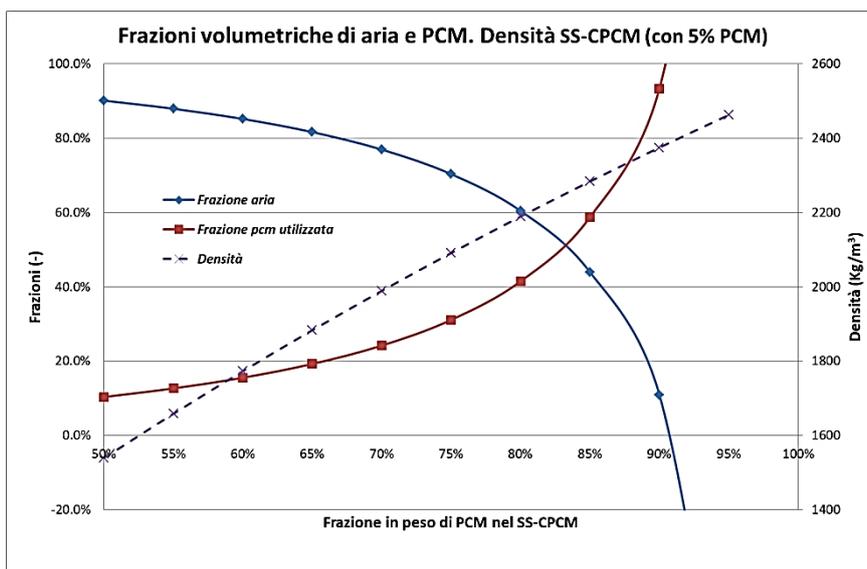


Figura 22 – Frazioni volumetriche di aria e PCM nella diatomite. Densità equivalente del SS-CPCM con il 5 wt % di PCM.

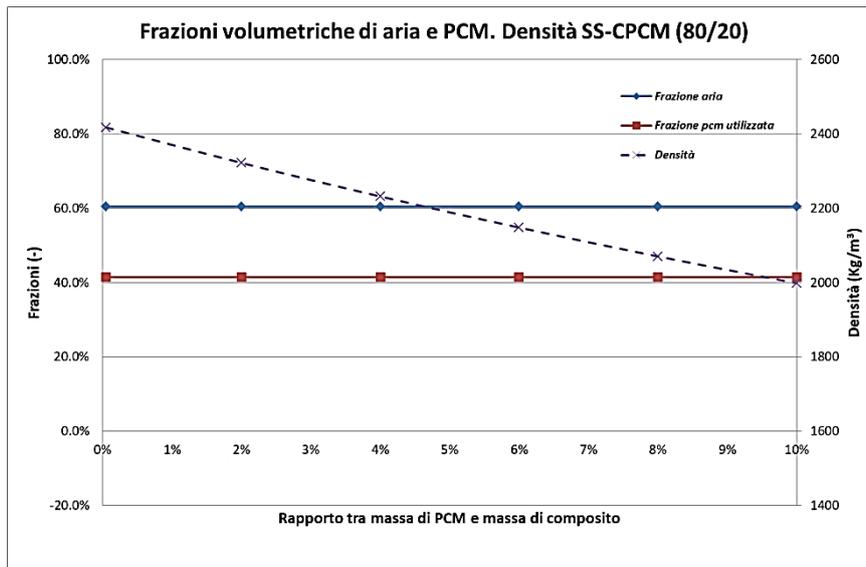


Figura 23 – Frazioni volumetriche di aria e PCM nella diatomite con un rapporto PCM/diatomite 80%-20%. Densità equivalente del SS-CPCM.

Come detto in precedenza, la presenza di aria nella diatomite gioca un ruolo importante. Come si può notare la **frazione di aria** è pari al 90% per un rapporto PCM/diatomite attorno al 50%-50% per poi ridursi rapidamente ed annullarsi in prossimità di un rapporto PCM/diatomite attorno al 90%-10%, che è il limite ipotizzabile.

La presenza di aria produce anche un alleggerimento del calcestruzzo base: la **densità del calcestruzzo/SS-CPCM** varia tra i 2000 ed i 2400 kg/m³, con rapporti PCM/diatomite tra l'80%-20% e il 90%-10% e con contenuti di PCM nel composito tra 5% e il 10% in peso.

In Tabella 2-7 sono riportati i risultati complessivi delle simulazioni effettuate utilizzando il modello proposto.

2.4.4 Conclusioni

Dalle analisi effettuate, sembra evidente che un rapporto PCM/diatomite tra l'80%-20% e l'85%-15% sia necessario sia per giustificare l'uso da un punto di vista energetico sia per mantenere delle buone caratteristiche meccaniche del composito calcestruzzo/PCM/diatomite.

A questo punto il problema si trasferisce all'identificazione delle procedure più opportune per raggiungere l'obiettivo prefissato per realizzare l'SS-CPCM, valutando la necessità di operare in un a basso contenuto di aria (depressione) per favorire l'assorbimento del PCM nella diatomite.

		50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	
Parametri calcolo		50%	45%	40%	35%	30%	25%	20%	15%	10%	5%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	
rapp massa PCM/SS-CPCM	x	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	0.05%	2%	4%	6%	8%	10%	
rapp massa PCM/Diatomite	y	1.0	1.2	1.5	1.8	2.3	3.0	4.0	5.7	9.0	19.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	
Rapporto M_cls/M	z	90.0%	90.9%	91.7%	92.3%	92.9%	93.3%	93.8%	94.1%	94.4%	94.7%	99.9%	97.5%	95.0%	92.5%	90.0%	87.5%	
Massa	M	kg	1539.2	1658.6	1773.1	1883.2	1989.0	2090.8	2188.9	2283.4	2374.5	2462.4	2417.4	2321.9	2231.5	2147.9	2070.3	1998.1
Massa cls	M_cls	kg	1385.3	1507.8	1625.4	1738.3	1846.9	1951.4	2052.1	2149.1	2242.6	2332.8	2415.9	2263.9	2119.9	1986.8	1863.3	1748.3
Massa pcm	M_pcm	kg	76.96	82.93	88.66	94.16	99.45	104.54	109.45	114.17	118.73	123.12	1.21	46.44	89.26	128.88	165.63	199.82
Massa diat	M_dia	kg	76.96	67.85	59.10	50.70	42.62	34.85	27.36	20.15	13.19	6.48	0.30	11.61	22.32	32.22	41.41	49.95
Volume cls	V_cls	m3	0.572	0.623	0.672	0.718	0.763	0.806	0.848	0.888	0.927	0.964	0.998	0.936	0.876	0.821	0.770	0.722
Volume pcm	V_pcm	m3	0.038	0.041	0.044	0.047	0.050	0.052	0.055	0.057	0.059	0.062	0.001	0.023	0.045	0.064	0.083	0.100
Volume dia	V_dia	m3	0.428	0.377	0.328	0.282	0.237	0.194	0.152	0.112	0.073	0.036	0.002	0.064	0.124	0.179	0.230	0.278
Volume vuoti	V_v	m3	0.389	0.343	0.299	0.256	0.215	0.176	0.138	0.102	0.067	0.033	0.002	0.059	0.113	0.163	0.209	0.253
Volume aria	V_aria	m3	0.351	0.302	0.254	0.209	0.166	0.124	0.084	0.045	0.007	-0.029	0.001	0.035	0.068	0.098	0.127	0.153
Frazione aria	f_a		90.1%	87.9%	85.2%	81.6%	76.9%	70.3%	60.4%	44.0%	11.0%	-87.9%	60.4%	60.4%	60.4%	60.4%	60.4%	60.4%
Massa pcm massima	M_pcm_max	kg	742.4	654.5	570.1	489.0	411.1	336.1	263.9	194.3	127.2	62.5	2.9	112.0	215.26	310.78	399.41	481.86
Frazione pcm utilizzata	w		10.4%	12.7%	15.6%	19.3%	24.2%	31.1%	41.5%	58.7%	93.3%	197.0%	41.5%	41.5%	41.5%	41.5%	41.5%	41.5%
Verifica parametri			OK	NO	OK	OK	OK	OK	OK	OK								
SEZIONE PROPRIETA' EQUIVALENTI																		
Densità	ρ_{eq}	kg/m3	1539.	1658.	1773.	1883.	1989.	2090.	2188.	2283.	2374.	2462.	2417.	2321.	2231	2147	2070	1998
Rateo massa PCM/SS-CPCM	R_M		5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	0.05%	2.00%	4.00%	6.00%	8.00%	10.00%
Rateo volume PCM/SS-CPCM	R_V		6.50%	6.03%	5.64%	5.31%	5.03%	4.78%	4.57%	4.38%	4.21%	4.06%	0.04%	1.72%	3.58%	5.59%	7.73%	10.01%
calore latente	λ_{eq}	J/kg	5250	5250	5250	5250	5250	5250	5250	5250	5250	5250	52.5	2100	4200	6300	8400	10500
calore specifico	cp_eq	J/kg°C	777.0	775.4	774.1	773.0	772.1	771.3	770.6	770.0	769.4	768.9	730.4	746.2	762.5	778.75	795	811.2
conducibilità pcm+aria	k_eq_pcm	W/m°C	0.05	0.06	0.07	0.09	0.11	0.15	0.19	0.28	0.44	0.93	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
conducibilità ss-pcm	k_eq_sspcm	W/m°C	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10	0.13	0.17	0.23	0.33	0.57	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
conducibilità	k_eq	W/m°C	1.78	1.80	1.82	1.84	1.86	1.89	1.91	1.94	1.96	1.98	1.99	1.95	1.92	1.90	1.88	1.86

		50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Parametri calcolo	pcm	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
	diat	50%	45%	40%	35%	30%	25%	20%	15%	10%	5%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
rapp massa PCM/SS-CPCM	x	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	0.05%	2%	4%	6%	8%	10%
rapp massa PCM/Diatomite	y	1.0	1.2	1.5	1.8	2.3	3.0	4.0	5.7	9.0	19.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
SEZIONE STIME TERMICHE																	
salto termico	°C	100															
calore sensibile	kWh/m3	33.22	35.72	38.13	40.44	42.66	44.79	46.85	48.84	50.75	52.59	49.04	48.13	47.26	46.46	45.72	45.02
calore latente	kWh/m3	2.24	2.41	2.51	2.74	2.90	3.04	3.19	3.33	3.46	3.59	0.03	1.35	2.60	3.75	4.83	5.82
densità energia	kWh/m3	35.46	38.14	40.71	43.18	45.56	47.84	50.04	52.17	54.21	56.18	49.08	49.48	49.86	50.22	50.55	50.85
		-27.7%	-22.3%	-17.0%	-11.9%	-7.2%	-2.5%	1.9%	6.3%	10.5%	14.5%	0.02%	0.84%	1.62%	2.34%	3.01%	3.64%

Tabella 2-7 – Risultati delle simulazioni al variare dei principali parametri del modello

3 Conclusioni

Nel presente documento è stato riportato il lavoro svolto all'interno della linea di attività LA2.4 del PAR2020 e finalizzato allo sviluppo di materiali con proprietà termiche incrementate per accumulo termico in calcestruzzo a medio-alta temperatura (fino a 300-400°C) con l'ausilio di materiali a cambiamento di fase (sali) micro-incapsulati in materiali fossili (mEPCM).

In particolare:

- sono stati studiati e realizzati opportuni mix-design del calcestruzzo additivato con mEPCM: uno contenente il solo calcestruzzo base, uno con calcestruzzo base e 5% in peso di PCM e l'ultimo con calcestruzzo base e 10% in peso di PCM;
- sono stati realizzati, con le tre miscele, 90 provini pieni. Questi sono stati soggetti ad un trattamento di degassaggio (a 105°C) e a successivi trattamenti termici a diversi livelli di temperatura (200, 300 e 400°C);
- sono stati realizzati, con le tre miscele, 6 provini con tubo immerso strumentato;
- è stato sviluppato un modello semplificato del materiale cls-mEPCM atto a prevedere le proprietà termiche equivalenti di un generico mix-design a partire dalla composizione del mEPCM e dalla sua percentuale in peso.

I provini pieni sono stati utilizzati per effettuare, sempre nell'ambito del presente lavoro, una caratterizzazione sperimentale, sia termica che meccanica, delle tre miscele sviluppate i cui risultati sono stati presentati nel documento [6]. Tutte le misurazioni sono state eseguite post trattamento termico a cinque temperature di riferimento (20, 105, 200, 300 e 400°C).

I provini con tubo immerso saranno oggetto, invece, di una successiva caratterizzazione termica in temperatura attraverso un ciclaggio termico di carico e scarico del calore tra i 200 ed i 400°C.

Lo studio delle miscele di calcestruzzo e la realizzazione dei vari provini sono avvenuti in collaborazione con la ditta Cipiccia Calcestruzzi di Narni (Terni).

L'utilizzo del modello semplificato ha permesso di capire i limiti operativi attesi, da un punto di vista termico, per questo materiale e quali sono le proporzioni ottimali, quali ad esempio, un rapporto PCM/diatomite in peso tra l'80%-20% e l'85%-15% ed una percentuale in peso di mEPCM nella miscela superiore al 5% in peso, fatti salvi gli eventuali limiti di tipo meccanico.

4 Riferimenti bibliografici

- 1 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.
- 2 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
- 3 F. Dominici, L. Torre, PCM stabilizzato in mezzi porosi: ottimizzazione e procedimento di miscelazione in calcestruzzi, Report RdS/PTR2020/185, Università di Perugia
- 4 EN 12390-1 Calcestruzzo indurito. Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme
- 5 EN 12390-2 Calcestruzzo indurito. Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza
- 6 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, ENEA

5 Abbreviazioni ed acronimi

PAR	Piano Annuale di Ricerca
TES	Thermal Energy Storage (Accumulo termico)
PCM	Phase Change Material (Materiale a cambiamento di fase)
LHTES	Latent Heat TES (Accumulo a calore latent)
CLS	Calcestruzzo