



Ricerca di Sistema elettrico

Studio e individuazione di soluzioni tecniche per il miglioramento della trasmissione del calore in sistemi di accumulo termico basati sui materiali a cambiamento di fase (PCM) nell'ambito dell'accumulo del freddo

A. Andreozzi, F. Ascione, N. Bianco, M. Caliano, M. Iasiello

STUDIO E INDIVIDUAZIONE DI SOLUZIONI TECNICHE PER IL MIGLIORAMENTO DELLA TRASMISSIONE DEL CALORE IN SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO BASATI SUI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM) NELL'AMBITO DELL'ACCUMULO DEL FREDDO

A. Andreozzi, F. Ascione, N. Bianco, M. Caliano, M. Iasiello
Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Napoli Federico II

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

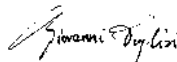
Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: EFFICIENZA ENERGETICA E RISPARMIO DI ENERGIA NEGLI USI FINALI ELETTRICI E INTERAZIONE CON ALTRI VETTORI ENERGETICI

PROGETTO: TECNOLOGIE PER COSTRUIRE GLI EDIFICI DEL FUTURO

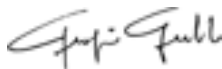
OBIETTIVO: B. RETI TERMICHE DISTRIBUITE - B.1 OTTIMIZZAZIONE DELLE PRESTAZIONI DI RETI ENERGETICHE DISTRIBUITE SU SCALA DISTRETTUALE O TERRITORIALE

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "STUDIO E INDIVIDUAZIONE DI SOLUZIONI TECNICHE PER IL MIGLIORAMENTO DELLA TRASMISSIONE DEL CALORE IN SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO BASATI SUI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM) NELL'AMBITO DELL'ACCUMULO DEL FREDDO".

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Giorgio Graditi



Responsabile scientifico Università di Napoli Federico II: Prof. Nicola Bianco



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	6
3 ATTIVITÀ SVOLTE NELLA FASE A.....	6
3.1 ACCUMULO TERMICO A PCM: VANTAGGI E PRINCIPALI LIMITI	6
3.2 METODI PER INCREMENTARE LE PERFORMANCE DI SCAMBIO TERMICO DEI PCM	8
3.2.1 <i>Superfici estese o alette</i>	8
3.2.2 <i>Unità multiple di PCM</i>	9
3.2.3 <i>Microincapsulamento</i>	11
3.3 METODI PER INCREMENTARE LA CONDUCIBILITÀ TERMICA DEI PCM	11
3.3.1 <i>Materiali ad elevata conducibilità</i>	12
3.3.2 <i>Schiume metalliche</i>	14
3.4 MODELLAZIONE DEI SISTEMI DI ACCUMULO A CALORE LATENTE.....	15
3.4.1 <i>Approccio del mezzo poroso</i>	15
3.4.2 <i>Modellazione del passaggio di fase con conduzione dominante</i>	16
3.4.3 <i>Modellazione del passaggio di fase con convezione naturale</i>	16
3.4.4 <i>Metodo entalpico</i>	17
3.4.5 <i>Metodo della capacità effettiva</i>	17
3.5 APPLICAZIONE DEI MODELLI MATEMATICI RELATIVI ALLE TECNICHE DI INCREMENTO DELLO SCAMBIO TERMICO NEI PCM	18
3.5.1 <i>Modellazione di sistemi con PCM e alette o superfici estese</i>	18
3.5.2 <i>Modellazione di sistemi con PCM multipli</i>	20
3.5.3 <i>Modellazione di sistemi con PCM microincapsulati</i>	21
3.5.4 <i>Modellazione dei sistemi combinati PCM - schiume metalliche</i>	22
3.6 CONCLUSIONI DELLA FASE A.....	23
4 ATTIVITÀ SVOLTE NELLA FASE B	25
4.1 PREMESSA	25
4.2 PRINCIPALI APPLICAZIONI DI SISTEMI COMBINATI PCM – SCHIUME METALLICHE.....	25
4.3 UTILIZZO DEI PCM ALL’INTERNO DELL’INVOLUCRO EDILIZIO	28
4.4 CONCLUSIONI DELLA FASE B	36
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	37
CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO.....	42

Sommario

I materiali a cambiamento di fase, detti PCM dall'acronimo inglese *Phase Change Materials*, sono materiali accumulatori di calore latente che, date le elevate capacità di accumulo, fornite sotto piccole variazioni di temperatura, trovano larga applicazione come agenti stabilizzanti e di controllo della temperatura, in diverse applicazioni. Tuttavia i PCM puri possono presentare problematiche connesse a uno scambio termico poco efficace e a bassi valori della conducibilità termica, che si traducono in fasi di carica e scarica del materiale troppo lente e spesso inefficaci per le specifiche applicazioni. La necessità, quindi, di incrementare lo scambio termico nei sistemi con PCM, e con esso la conducibilità termica dei materiali stessi, è fondamentale, al fine di ottenere sistemi di accumulo efficienti.

Nei paragrafi che seguono, sono riportati i risultati delle attività di ricerca svolte nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione *"Studio e individuazione di soluzioni tecniche per il miglioramento della trasmissione del calore in sistemi di accumulo termico basati sui materiali a cambiamento di fase (PCM) nell'ambito dell'accumulo del freddo"* tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Nel dettaglio le attività svolte sono state le seguenti:

- studio delle tecniche di miglioramento delle performance di scambio termico dei PCM;
- analisi dei modelli analitici utilizzati per la simulazione delle tecniche di miglioramento dello scambio termico nei PCM;
- individuazione di soluzioni tecniche, praticabili nel breve-medio periodo, finalizzate all'incremento delle prestazioni di scambio termico nei PCM in sistemi non integrati;
- individuazione di soluzioni tecniche, praticabili nel breve-medio periodo, finalizzate all'incremento delle prestazioni di scambio termico nei PCM utilizzati negli involucri edilizi.

Dallo studio effettuato è emerso che uno dei metodi più efficienti, al fine di incrementare i valori della conducibilità termica dei PCM, e quindi più in generale, le performance di scambio termico di questi materiali, consiste nell'utilizzo di sistemi combinati PCM - schiume metalliche. In virtù delle grandi potenzialità offerte dall'utilizzo delle schiume metalliche, è possibile innalzare il valore della conducibilità termica dei PCM anche di due ordini di grandezza, determinando un notevole miglioramento delle performance dei sistemi in cui sono utilizzate.

Per quanto concerne l'applicabilità dei PCM in edilizia, è emerso come, oltre alla necessità di un'adeguata progettazione, il criterio della convenienza tecnico-economica non possa essere trascurato. Essendo, infatti, ancora poche le applicazioni reali di involucri contenti materiali a cambiamento di fase, il relativo mercato non risulta particolarmente competitivo rispetto ad altre soluzioni tecniche di maggiore commercializzazione.

1 Introduzione

Nel presente rapporto tecnico sono descritte le attività di ricerca svolte nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione *“Studio e individuazione di soluzioni tecniche per il miglioramento della trasmissione del calore in sistemi di accumulo termico basati sui materiali a cambiamento di fase (PCM) nell'ambito dell'accumulo del freddo”* tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Tali attività sono state finalizzate a una rassegna critica dello stato dell'arte riguardante le metodologie oggi più utilizzate al fine di migliorare lo scambio termico nei sistemi di accumulo termico che prevedono l'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase (PCM), e all'individuazione di soluzioni tecniche praticabili nel breve-medio periodo, nel settore residenziale, per il miglioramento delle prestazioni di scambio termico dei suddetti sistemi. L'attività del primo periodo ha previsto un'analisi critica delle metodologie più innovative atte a migliorare le performance di scambio termico all'interno dei sistemi di accumulo a PCM e delle tecniche più utilizzate per far fronte alla bassa conducibilità termica che caratterizza tali materiali. Inoltre, ha previsto l'individuazione dei principali modelli analitici utilizzati per l'implementazione di tali tecniche di miglioramento all'interno di codici di simulazione numerica. Nel secondo periodo, invece, l'attività si è focalizzata sull'individuazione e lo studio di diverse soluzioni tecniche adottabili praticamente al fine di incrementare lo scambio termico dei sistemi di accumulo con PCM sia di tipo non integrato, ovvero con serbatoio, sia integrato nelle componenti dell'involucro edilizio.

2 Descrizione delle attività svolte

Di seguito sono descritte nel dettaglio le attività svolte nel primo anno dell'accordo di collaborazione. Il lavoro di questo periodo è stato articolato in due macrofasi, finalizzate allo studio e all'individuazione di soluzioni tecniche e specifiche applicazioni atte al miglioramento delle prestazioni termiche dei materiali a cambiamento di fase.

- A. La prima fase ha previsto inizialmente uno studio approfondito dei principali vantaggi e limiti dei PCM. In particolar modo, è stato affrontato il tema dello scambio termico e sono stati studiati e analizzati i metodi di incremento dell'efficienza dello scambio termico dei PCM oggi maggiormente utilizzati. A valle di ciò è stata effettuata un'analisi approfondita dei principali modelli analitici utilizzati per l'implementazione di tali tecniche. L'attività di questa fase è stata, quindi, suddivisa nei seguenti punti:
- studio delle tecniche di miglioramento delle performance di scambio termico dei PCM;
 - analisi dei modelli analitici utilizzati per la simulazione delle tecniche di miglioramento dello scambio termico nei PCM.
- B. La seconda fase si è concentrata sull'individuazione di soluzioni pratiche, applicabili nel breve e medio periodo nel settore residenziale, atte a far fronte ai problemi di bassa conducibilità termica dei PCM nell'ambito dell'accumulo termico, con particolare attenzione all'accumulo del freddo. L'attività è stata rivolta sia ad identificare quelle soluzioni adottabili in serbatoi non integrati, atti a migliorare le performance termiche dei sistemi energetici, sia a quelle applicazioni relative all'utilizzo dei PCM all'interno degli involucri edilizi. L'attività di questa fase è stata suddivisa, quindi, nei seguenti punti:
- individuazione di soluzioni tecniche, praticabili nel breve-medio periodo, finalizzate all'incremento delle prestazioni di scambio termico nei PCM in sistemi non integrati;
 - individuazione di soluzioni tecniche, praticabili nel breve-medio periodo, finalizzate all'incremento delle prestazioni di scambio termico nei PCM utilizzati negli involucri edilizi.

3 Attività svolte nella Fase A

3.1 *Accumulo termico a PCM: vantaggi e principali limiti*

È ormai ben noto che l'accumulo dell'energia termica può essere realizzato nella forma sensibile mediante l'utilizzo di un mezzo solido o liquido, nella forma latente mediante l'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase (PCM) e nella forma chimica mediante l'ausilio di reazioni chimiche reversibili. La forma sensibile è senza dubbio quella di più semplice realizzazione, tuttavia il suo utilizzo è limitato dalle basse capacità di accumulo e dagli ampi volumi richiesti per lo stoccaggio dei materiali. L'accumulo chimico, d'altra parte, non ha ancora avuto un'ampia diffusione a causa di problematiche sia tecniche sia economiche. I sistemi di accumulo termico oggi più studiati, sono quelli a calore latente che utilizzano come mezzo di accumulo i materiali a cambiamento di fase (PCM). Date le elevate capacità di accumulo fornite sotto piccole variazioni di temperatura, i PCM trovano larga applicazione come agenti stabilizzanti e di controllo della temperatura, sia in sistemi di accumulo di tipo stand alone, ovvero con serbatoio, che integrati nelle componenti dell'involucro edilizio.

Attualmente i sistemi più diffusi sono quelli che prevedono la transizione di fase solido-liquido, in virtù di una serie di vantaggi, quali piccole variazioni di volume durante il congelamento, compattezza, semplicità di utilizzo e realizzazione, ecc. I vantaggi legati all'utilizzo di tali materiali sono, però, fortemente dipendenti

dalla scelta dello specifico materiale per la specifica applicazione. La scelta del PCM, infatti, deve tener conto di alcuni imprescindibili fattori [1], di seguito elencati.

- *Proprietà termodinamiche:*
 - appropriata scala di temperatura di fusione;
 - elevato calore latente di fusione per unità di volume;
 - buona conducibilità termica;
 - elevato calore specifico e densità;
 - basso cambiamento di volume e pressione di vapore durante il cambiamento di fase;
 - temperatura di fusione adatta all'applicazione.
- *Proprietà cinetiche:*
 - elevato tasso di nucleazione per prevenire il sottoraffreddamento;
 - elevato tasso di cristallizzazione.
- *Proprietà chimiche:*
 - ciclo invertibile di fusione/solidificazione;
 - stabilità chimica;
 - non deteriorabilità dopo un alto numero di cicli;
 - non corrosivo;
 - non tossico, non infiammabile e non esplosivo.
- *Fattori economici:*
 - abbondante e disponibile;
 - basso costo.

Di contro ai vantaggi suddetti, l'utilizzo dei PCM può determinare alcune criticità. I principali problemi relativi al loro utilizzo dipendono dal possibile sottoraffreddamento, dalla possibile separazione di fase, ed infine dalla bassa conducibilità termica tipica di questi materiali, che si traduce spesso in uno scambio termico poco efficace.

Il sottoraffreddamento è un fenomeno secondo il quale il PCM non solidifica immediatamente una volta raggiunta la sua temperatura di fusione, bensì inizia il passaggio di fase a temperature più basse. Il metodo maggiormente utilizzato per far fronte a tale fenomeno prevede l'aggiunta di agenti nucleanti al PCM, al fine di innescare una nucleazione omogenea.

L'utilizzo di PCM non puri, come sali idrati e alcuni eutettici, possono essere soggetti alla separazione di fase durante il processo di fusione, a causa dei differenti valori di densità presenti nelle miscele. Questo altera il PCM, il quale potrebbe non conservare, nei cicli successivi, le sue caratteristiche di omogeneità. Per far fronte a tale problema si è soliti usare agenti gelificanti o addensanti, di solito polimeri, in modo da aumentare la viscosità del materiale e ridurre il fenomeno.

Il problema, però, che maggiormente caratterizza i PCM è la bassa conducibilità termica. Alcuni PCM organici presentano conducibilità termiche inferiori a 0.4 W/m/K, mentre alcuni PCM inorganici presentano conducibilità termiche inferiori a 1 W/m/K. Tali valori, tipici dei materiali puri, comportano basse velocità di scambio termico e cicli di solidificazione/fusione troppo lenti. Questo si traduce nell'incapacità del sistema di esercitare il controllo desiderato e di mantenere, quindi, la temperatura ad un valore costante [2]. Di seguito sono riportate le principali tecniche utilizzate per incrementare le performance di scambio termico nei PCM.

3.2 Metodi per incrementare le performance di scambio termico dei PCM

Come già detto, i problemi connessi alla bassa conducibilità termica dei PCM, e allo scambio termico in generale, sono quelli che maggiormente caratterizzano e penalizzano le applicazioni con tali materiali. Una bassa conducibilità termica determina uno scambio termico lento e fasi di carica e scarica del materiale, a volte, troppo prolungate. Questo comporta il rischio di rendere l'applicazione, in parte o del tutto, inutile, in quanto potrebbe risultare difficile raggiungere i valori di temperatura opportuni nei tempi desiderati. Inoltre bassi valori della conducibilità termica si traducono in superfici di scambio elevate, a discapito della compattezza dei sistemi. Avere, quindi, un buono scambio termico tra PCM e fluido termovettore o tra PCM e ambiente circostante è essenziale al fine di ottenere un sistema compatto ed efficiente [3]. Bisogna considerare, però, che in un sistema di accumulo a calore latente, uno dei principali costi è associato alla tecnologia di scambio termico, la quale deve garantire elevati tassi di carica e scarica del materiale. Per tale motivo, l'incremento delle performance di scambio termico ha certamente una forte valenza di tipo energetico, in termini di incremento delle prestazioni del materiale, ma determina anche un forte impatto economico, il quale in fase di progettazione non può essere trascurato.

I metodi utilizzati per incrementare lo scambio termico dei PCM sono vari. I più comuni includono [4]:

- l'utilizzo di superfici estese o alette;
- unità multiple di PCM;
- il microincapsulamento del materiale;
- metodi per incrementare la conducibilità termica.

Di seguito sono trattati i primi tre metodi e successivamente quelli relativi alle tecniche di incremento della conducibilità termica.

3.2.1 Superfici estese o alette

L'utilizzo di alette o superfici estese consente di incrementare la superficie di scambio termico tra PCM e fluido termovettore, determinando un miglioramento delle performance di scambio termico del sistema e fasi di carica e scarica del materiale più rapide. Tuttavia, in fase di realizzazione del sistema bisogna considerare che l'effettivo incremento delle prestazioni dipende da vari fattori, quali configurazione, posizione, orientamento, numero e distanza tra due alette successive. Quando il sistema prevede uno scambio termico tra PCM e fluido termovettore, la posizione delle alette è, di solito, basata sul valore che assume il coefficiente di scambio termico relativo tra PCM e fluido termovettore. Nella gran parte dei sistemi, infatti, il coefficiente di scambio termico al lato PCM è inferiore a quello del lato fluido termovettore. In questa condizione generalmente le alette sono posizionate a contatto con il PCM. In Figura 1 sono mostrati due esempi di unità di accumulo a calore latente di tipo cilindrico con alette longitudinali, (a) con alette interne, ovvero posizionate al lato in cui è posto il PCM [5], (b) con alette esterne, ovvero posizionate al lato in cui scorre il fluido termovettore [6]. Le geometrie utilizzate variano e possono essere rettangolari, cilindriche, sferiche e a tubi coassiali, con alette longitudinali, trasversali o di tipo anulare. In Figura 2 è mostrato un esempio di unità di accumulo a calore latente a tubi coassiali con alette anulari poste a contatto con il PCM [7].

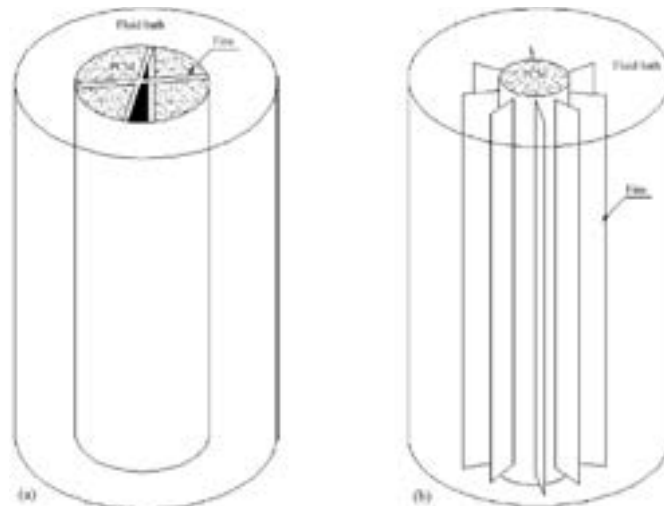


Figura 1. (a) Unità di accumulo a calore latente con alette longitudinali interne [5], (b) unità di accumulo a calore latente con alette longitudinali esterne [6].

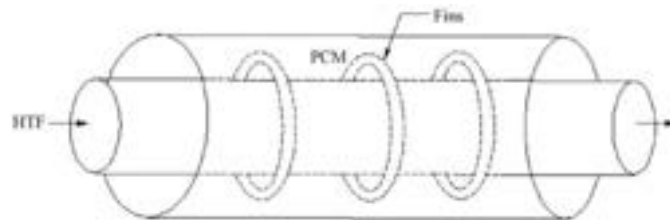


Figura 2. Unità di accumulo a tubi coassiali con alette anulari [7].

La funzione delle alette, sempre mirata all'incremento dello scambio termico, può variare a seconda che si consideri la fase di fusione o solidificazione del PCM. Questo accade in quanto il meccanismo di scambio termico dominante in fase di fusione è quello della convezione naturale [8] [9] [10] [11], mentre la fase di solidificazione è dominata da uno scambio termico conduttivo [8] [12] [13]. Da ciò si evince che in fase di fusione, la presenza delle alette dovrà agire a favore dello sviluppo dello strato di liquido, mentre in fase di solidificazione a favore dell'avanzamento dello strato solido.

Un altro importante parametro è rappresentato dal numero di alette utilizzate e dalla distanza tra loro. Lacroix e Benmadda [14] hanno dimostrato che il maggior beneficio, in fase di fusione, sull'incremento delle prestazioni di scambio termico del sistema, è ottenuto mediante l'utilizzo di poche alette lunghe (4 alette di 0.03 m) rispetto ad un maggior numero di alette corte (19 alette di 0.01 m).

Castell et al. [6] hanno, invece, osservato come l'utilizzo di alette lunghe determini un peggioramento dello scambio termico in fase di solidificazione. L'influenza del numero di alette e delle dimensioni di queste, quindi, non può essere trascurata nemmeno in fase di solidificazione. Tuttavia, in questo caso il beneficio dovuto all'aggiunta delle alette risulta fortemente dipendente dai valori di portata massica del fluido termovettore [15].

Pur essendo piuttosto semplici, questi sistemi presentano alcuni importanti svantaggi e limitazioni [2]. Sebbene consentano di incrementare le performance termiche dei sistemi in cui sono utilizzate, queste tecniche determinano un aumento del peso e dell'ingombro dell'impianto; inoltre la quantità di PCM da poter utilizzare si riduce al fine di poter alloggiare le strutture.

3.2.2 Unità multiple di PCM

Un'altra interessante applicazione, ai fini dell'incremento delle prestazioni di scambio termico nei sistemi con PCM, consiste nell'utilizzare più unità di PCM, caratterizzate da diversi materiali con differenti punti di fusione. Lo scambio termico dell'unità di accumulo, e quindi le performance del sistema durante le fasi di carica e scarica del materiale, dipendono dalla differenza tra la temperatura del fluido termovettore

e la temperatura di fusione del PCM. Quando è utilizzato un unico PCM, tale differenza di temperatura decresce lungo la direzione del flusso del fluido. Questo determina, ovviamente, una riduzione dello scambio termico e delle performance del sistema. L'utilizzo di più unità di PCM, con differenti punti di fusione, posizionati nel verso decrescente delle temperature, consente, in fase di fusione, di mantenere costante la differenza tra queste e la temperatura del fluido, la quale si riduce nella direzione del flusso. Questo determina un flusso termico pressoché costante. In fase di solidificazione, se il fluido ripercorre lo stesso condotto in maniera inversa, si assiste all'effetto opposto. Ovvero, la temperatura del fluido aumenta man mano che il flusso avanza, ma la differenza di temperatura del sistema resta pressoché costante [16] [17] [18]. In Figura 3 è mostrato un esempio di unità di accumulo con PCM multipli, in cui la variazione di temperatura del fluido è di tipo assiale.

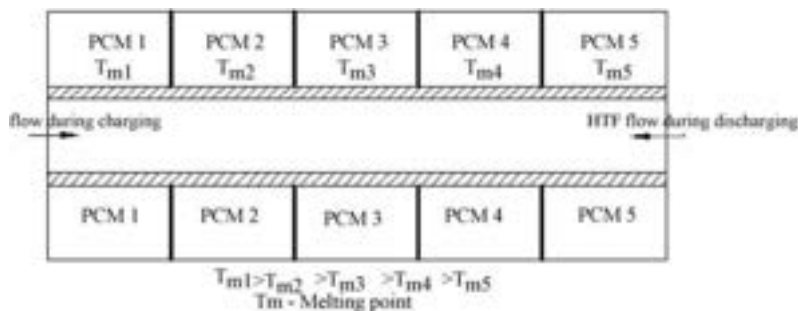


Figura 3. Unità di accumulo a calore latente con PCM multipli [17].

Nei sistemi in cui non vi è variazione di temperatura in direzione assiale, le unità di PCM sono posizionate in direzione radiale. Questo è il tipico caso in cui il PCM è posto all'interno di un serbatoio e scambia calore con il fluido termovettore in ingresso e in uscita dallo stesso. In questo tipo di configurazione, in cui il PCM con più bassa temperatura di fusione è posto al centro, è possibile mantenere costante la differenza di temperatura tra fluido e punto di fusione dei PCM in direzione radiale, determinando un incremento delle performance termiche del sistema. In Figura 4 è mostrato un esempio di unità di accumulo con PCM multipli in tubi coassiali [19].

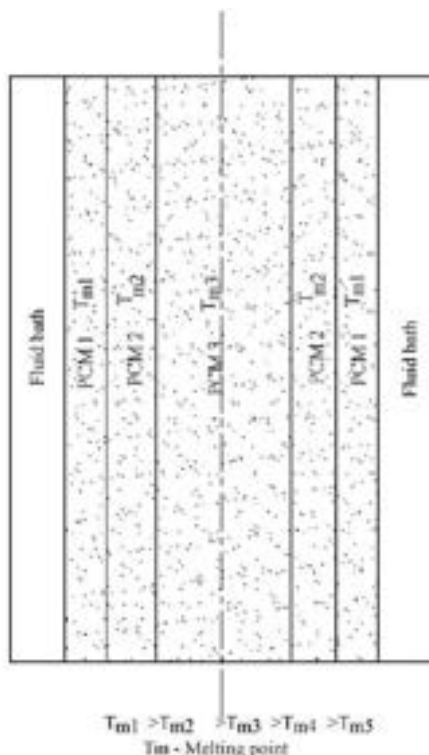


Figura 4. Unità di accumulo a calore latente con PCM multipli in tubi cilindrici coassiali [19].

Il reale beneficio di questo tipo di soluzione dipende da una serie di fattori. È indispensabile, infatti, scegliere opportunamente i materiali da utilizzare in base alla buona combinazione tra le differenti temperature di fusione. Inoltre bisogna valutare attentamente il quantitativo di ciascun PCM in modo che l'obiettivo di incremento delle prestazioni prefissato possa essere raggiunto [20].

Sebbene questa tecnica sia molto efficiente, interessanti applicazioni vedono l'utilizzo di unità con PCM multipli e alette integrate, al fine di migliorare ulteriormente le prestazioni del sistema [21].

3.2.3 Microincapsulamento

Il microincapsulamento consiste nell'incorporare il PCM all'interno di capsule, tipicamente sferiche, di solito composte da materiali metallici o polimerici, Figura 5 [22].

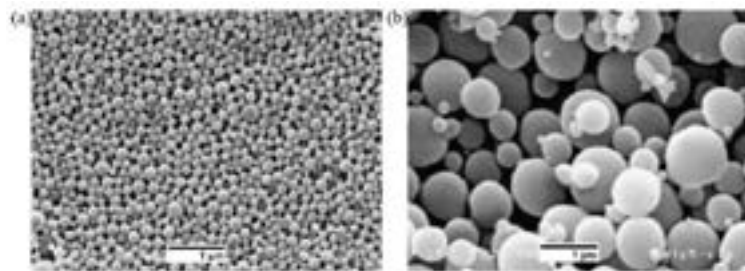


Figura 5. Esempi di microincapsulamento [22].

Uno degli obiettivi del microincapsulamento è quello di incrementare la superficie di scambio termico tra PCM e fluido, e quindi le performance termiche del sistema. I benefici legati a questa pratica sono, comunque, molteplici e relativi ad una maggiore capacità di contenimento, ad una maggiore stabilità dei cicli di carica e scarica e un aumento della compatibilità del PCM con i materiali circostanti. Quest'ultimo è uno dei motivi che ha visto una larga diffusione del microincapsulamento in edilizia.

La diffusione di questa tecnica è inoltre dovuta alla necessità di risolvere alcune problematiche connesse all'utilizzo dei PCM sfusi. Quando il PCM è usato sfuso, cioè senza incapsulamento, all'interno dei tipici materiali da costruzione, può accadere che si verifichi la fuoriuscita del PCM soprattutto in fase liquida. Questo oltre a determinare una perdita di materiale, può essere dannoso per la salute degli occupanti, se il PCM utilizzato è tossico. Inoltre, per effetto dell'interazione con gli altri materiali o a causa delle condizioni ambientali, il PCM potrebbe perdere le proprie caratteristiche e non risultare più idoneo per la specifica applicazione [23].

I metodi di microincapsulamento dei PCM sono molteplici e dipendono dal tipo di materiale e dalle dimensioni delle capsule che si vogliono realizzare. In ogni caso, i metodi più comuni, e più descritti in letteratura, sono la polimerizzazione interfacciale, la polimerizzazione in sospensione [24] [25], la coacervazione [26] [27], la polimerizzazione in emulsione [28] [29], e l'essiccamento a spruzzo [30]. Tra questi la coacervazione e la polimerizzazione in emulsione sono i metodi più economici e di più semplice realizzazione [23].

Sebbene i vantaggi legati all'utilizzo dei PCM microincapsulati siano molteplici, questa pratica presenta alcune forti limitazioni. Il principale svantaggio risiede nella bassa conducibilità termica di gran parte dei materiali utilizzati per la realizzazione delle capsule contenenti PCM, cosa che si traduce nel peggioramento delle performance termiche dell'intero sistema. Inoltre, a causa della ridotta quantità di PCM che è possibile utilizzare in ciascuna capsula, al fine di garantire che in fase di solidificazione del PCM non ci sia il danneggiamento della capsula stessa, la capacità di accumulo totale risulta essere piuttosto limitata [31].

3.3 Metodi per incrementare la conducibilità termica dei PCM

Sebbene i PCM possedano elevate capacità di accumulo, come già detto, essi sono caratterizzati da bassi valori della conducibilità termica. In Figura 6 sono riportati i valori di conducibilità di alcuni PCM

organici, inorganici e eutettici [4]. Da questa si evince come la conducibilità termica dei PCM solo raramente superi 1 W/m/K, nel caso di materiali inorganici.

Name of the PCM	Thermal conductivity (W/m K)	Latent heat of fusion (kJ/kg)
Organics		
n-Octadecane	0.35 (solid) and 0.149 (liquid)	245
n-Docosane	0.22	194.6
Paraffin wax	0.514 (solid) and 0.224 (liquid)	251
Caprylic acid	0.149	149
Capric acid	0.153	153
Inorganics		
KNO ₃	0.5	266
NaNO ₃	0.5	172
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0.694 (solid) and 0.57 (liquid)	168.6
CaCl ₂ ·6H ₂ O	1.088 (solid) and 0.54 (liquid)	190.8
Inorganic eutectics		
58.7%Mg(NO ₃) ₂	0.678 (solid) and 0.51 (liquid)	132
6H ₂ O-41.3%MgCl ₂ ·6H ₂ O		
66.6%Urea-33.4%NH ₄ Br	0.682 (solid) and 0.331 (liquid)	161

Figura 6. Tipici valori di conducibilità termica di alcuni PCM [4].

Al fine di superare tale limite, e incrementare la conducibilità termica dei PCM, si è soliti integrare questi ultimi con materiali ad elevata conducibilità. I sistemi più diffusi prevedono:

- utilizzo di materiali ad elevata conducibilità;
- utilizzo di schiume metalliche.

3.3.1 Materiali ad elevata conducibilità

I materiali ad elevata conducibilità più utilizzati, al fine di incrementare la conducibilità termica dei sistemi di accumulo con PCM sono la grafite, le particelle e nano particelle metalliche, le strutture metalliche e le fibre di carbonio.

La grafite è nota per gli alti valori della conducibilità termica, compresa tra 24 e 470 W/m/K [32]. Di solito, aggiunta al PCM fuso, è capace di incrementare la conducibilità termica del PCM a cui è abbinata di 5-100 volte [33], in funzione della sua densità.

L'utilizzo della grafite è molto promettente nei sistemi con accumulo termico utilizzando paraffina [34], ma mostra elevate performance anche in sistemi con temperature di fusione più elevate, come con miscele di sali ed eutettici. In Figura 7 sono mostrati diversi tipi di grafite [4].

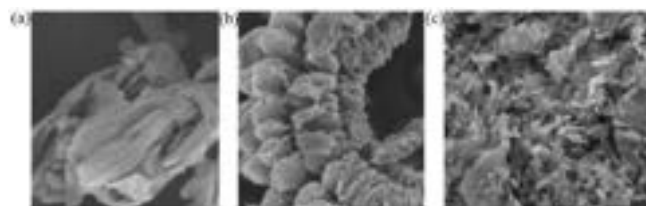


Figura 7. Differenti tipi di grafite [4].

Sebbene il metodo più economico risulti essere l'utilizzo di fiocchi di grafite naturale, la grafite espansa mostra migliori caratteristiche di assorbimento grazie alla sua porosità. Per effetto della fusione, il PCM va ad occupare i pori della grafite espansa, determinando la formazione di un unico blocco dalle migliori caratteristiche termiche.

Sebbene l'uso della grafite determini un buon incremento della conducibilità termica dei PCM, presenta alcuni limiti non trascurabili. I composti con grafite, infatti, possono essere ottenuti con processi chimici o meccanici molto lunghi ed energeticamente dispendiosi. Inoltre, la porosità della grafite espansa riveste un ruolo fondamentale [35], in quanto se la dimensione dei pori è troppo ridotta, potrebbero sopraggiungere problemi di impregnazione del PCM, di contro, se i pori sono troppo grandi può verificarsi la fuoriuscita di PCM liquido.

Al fine di superare le problematiche relative all'utilizzo della grafite, è possibile utilizzare particelle metalliche ad elevata conducibilità, le quali non sono soggette alle limitazioni suddette e la loro inclusione nel PCM è relativamente semplice. Le particelle che è possibile utilizzare sono molteplici e di diverse dimensioni. Negli ultimi anni, è stata data molta rilevanza alle nano particelle (particelle di dimensioni comprese tra i 2 e i 200 nm) in virtù delle elevate potenzialità [36] [37] [38]. Grazie all'introduzione di percentuali relativamente ridotte di nano particelle (5-20%) all'interno di PCM di vario tipo, è possibile incrementare notevolmente la conducibilità termica e la capacità di accumulo del materiale. Sahan et al. [39] hanno osservato un aumento della conducibilità termica di un PCM paraffinico del 48% e del 60% utilizzando, rispettivamente, il 10% e 20% di nano particelle di magnetite (Fe_3O_4). Jesumathy et al. [40] hanno osservato un aumento della conducibilità termica del 6%, 6.7% e 7.8% di un PCM paraffinico grazie all'aggiunta del 2%, 5% e 10% di nanoparticelle di ossido rameico (CuO). In Figura 8 è mostrato un esempio di nano particelle [41].

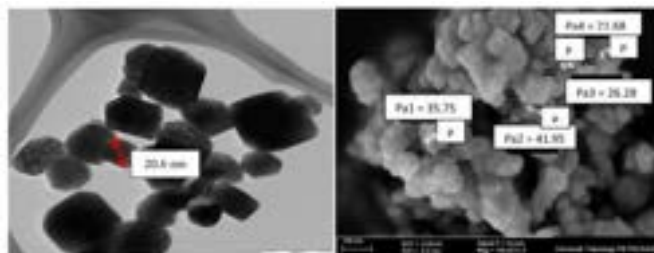


Figura 8. Nano particelle di rame immerse in una cera paraffinica [41].

Un altro metodo molto riportato in letteratura, prevede l'inserimento di strutture metalliche all'interno dei sistemi contenenti PCM. Queste strutture, utilizzate per incrementare la conducibilità termica dei PCM, possono presentare svariate geometrie, quali sferiche, cilindriche o ad alveare. Il PCM viene collocato all'interno delle strutture in modo tale che fonda e solidifichi in maniera più veloce. In Figura 9 sono riportati alcuni esempi di strutture metalliche, ad anello [42], a lastre [43] e a sfere [44]. Di contro, tali sistemi presentano importanti limitazioni legate al volume occupato dall'impianto e al costo del sistema stesso.

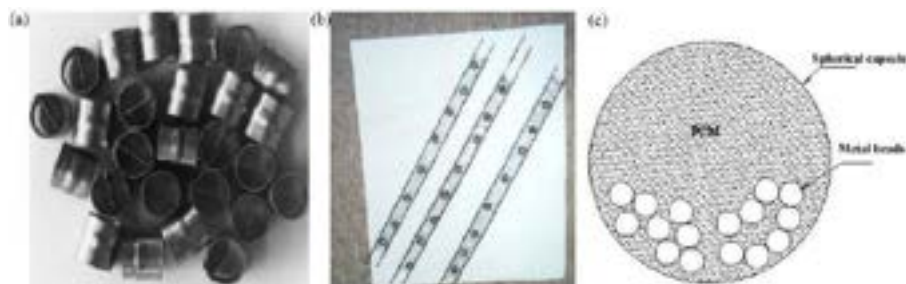


Figura 9. Differenti tipi di strutture metalliche [42-44].

A causa dell'alta densità, le particelle e le strutture metalliche possono posizionarsi sul fondo dei recipienti determinando un grosso aumento di peso del sistema. Inoltre, possono verificarsi problemi di compatibilità con alcuni PCM [45]. Ad esempio, le paraffine sono compatibili con l'alluminio, ma presentano problemi con rame e nickel. Analogamente, alluminio e rame non sono compatibili con alcuni sali idrati. Alla luce di ciò, dato che le fibre di carbonio presentano più bassi valori di densità rispetto ai metalli e conducibilità termiche simili a quelle di alluminio e rame, è possibile utilizzarle come materiali alternativi, ai fini dell'incremento della conducibilità termica dei PCM. Inoltre, le fibre di carbonio non sono corrosive e sono compatibili con gran parte dei PCM [4]. In Figura 10 sono mostrati due esempi di contenitori con fibre di carbonio, (a) con fibre sfuse, (b) con fibre posizionate a spazzola.

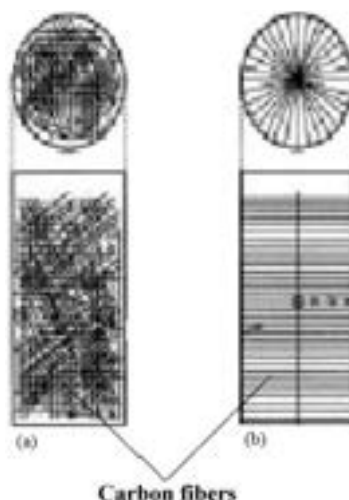


Figura 10. Fibre di carbonio in contenitori cilindrici [45]: a) con dispersione random, (b) a spazzola.

3.3.2 Schiume metalliche

Tra le diverse soluzioni mirate all’incremento della conducibilità termica dei PCM, una delle più promettenti riguarda l’utilizzo delle schiume metalliche a celle aperte. Nonostante l’utilizzo di tale materiale determini una riduzione del volume occupato dal PCM, la sua integrazione può determinare un notevole aumento della conducibilità termica del PCM, anche di due ordini di grandezza, permettendo al calore di diffondere molto più rapidamente.

Una schiuma metallica a celle aperte è un materiale poroso formato da una matrice solida in metallo, attraverso cui vi è il passaggio di un fluido (Figura 11). Quando il PCM si presenta nella fase liquida, si instaura un movimento del PCM nella schiuma; quando invece il PCM è in fase solida, vi è la formazione di un composto eterogeneo caratterizzato da due solidi a diversa conducibilità termica. All’interno di una schiuma è possibile individuare una serie di celle che si ripetono più o meno regolarmente nello spazio. Tali celle comunicano tra di loro attraverso i pori, e sono racchiuse all’interno di legamenti, che a loro volta si incontrano in giunzioni. La morfologia della microstruttura di una schiuma ha un ruolo fondamentale nei vari meccanismi di scambio termico. Oltre alle misure di grandezze lineari atte a descriverle, ovvero pori e legamenti, due parametri morfologici fondamentali sono la porosità, che rappresenta il rapporto tra il volume dei vuoti e il volume totale della schiuma, e i Pores Per Inch (PPI) o densità dei pori, che rappresenta il numero di pori che è possibile incontrare lungo una lunghezza, assunta pari a un pollice.

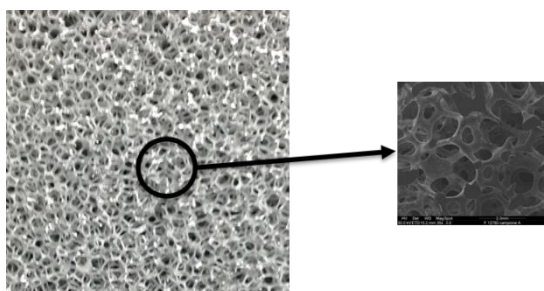


Figura 11. Schiuma metallica a celle aperte con immagine SEM.

Nella parte appena vista, sono trattate le principali tecniche, oggi utilizzate, al fine di incrementare le prestazioni di scambio termico dei PCM e in dettaglio le diverse pratiche atte al miglioramento della loro conducibilità termica. Di seguito sono descritti i principali approcci alla modellazione di questi sistemi.

3.4 Modellazione dei sistemi di accumulo a calore latente

La modellazione dei sistemi di accumulo a calore latente risulta essere piuttosto complessa rispetto a quella dei sistemi di accumulo a calore sensibile. Le principali criticità risiedono nel movimento dell'interfaccia solido-liquido, nella possibilità che si instauri un movimento della parte solida in quella liquida durante il processo di fusione, nello scambio termico tra PCM e fluido termovettore e nell'espansione a cui è soggetto il PCM durante il passaggio di fase. Inoltre, le tre fasi (liquida, solida e liquida-solida) hanno proprietà diverse, e le configurazioni dei sistemi di accumulo possono variare in base al tipo di applicazione.

Di seguito sono descritti i principali approcci.

3.4.1 Approccio del mezzo poroso

Una tipica rappresentazione di un sistema per il quale è possibile utilizzare tale approccio, consiste in un contenitore ben isolato al cui interno vi sono poste delle capsule, contenenti PCM, immerse in un fluido termovettore, il quale, per effetto del passaggio tra i vuoti lasciati tra due capsule successive, determina l'accumulo o il rilascio di una certa quantità di calore.

La teoria del mezzo poroso si basa sull'ipotesi che il PCM si comporti termicamente come un mezzo continuo e non come un mezzo composto da una serie di particelle indipendenti.

Nel modello che si presenterà nel seguito, è assunto che le proprietà termofisiche del PCM e del fluido siano indipendenti dalla temperatura, che non ci siano generazione di calore o reazioni chimiche interne e che il flusso presenti condizioni uniformi perpendicolarmente alla direzione di avanzamento dello stesso. Quindi, la dispersione in direzione radiale è trascurata e l'equazione di conservazione dell'energia diventa monodimensionale. Lo scambio termico radiale è trascurato e il gradiente termico all'interno delle capsule di PCM è ignorato [46].

In base a tutte le ipotesi sopra formulate, le equazioni dell'energia per fluido (1) e PCM (2) possono essere scritte come segue:

$$\varepsilon(\rho C)_{HTF} \left(\frac{\partial T_{HTF}}{\partial t} + u_{HTF} \frac{\partial T_{HTF}}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{HTF} \frac{\partial T_{HTF}}{\partial x} \right) + U_{HTF} A_{par} (T_{PCM} - T_{HTF}) \quad (1)$$

$$(1 - \varepsilon)(\rho C)_{PCM} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} \right) + U_{HTF} A_{par} (T_{HTF} - T_{PCM}) \quad (2)$$

in cui U_{HTF} è il coefficiente di scambio termico, A_{par} è l'area superficiale della particella per unità di volume del letto di particelle, u_{HTF} è la velocità media del flusso di fluido, ε è la frazione di vuoto, t è il tempo, (ρC) il prodotto tra la densità e il calore specifico, e T la temperatura.

Tale modello può essere utilizzato per valutare le performance termiche del sistema di accumulo, ma anche per valutare l'effetto della variazione della portata e della temperatura del fluido, della porosità e della dimensione dei contenitori.

La teoria appena descritta è, inoltre, applicabile nel caso in cui il sistema preveda l'inserimento di materiali per aumentare la conducibilità termica (reti metalliche, grafite, schiume metalliche, etc.) del PCM. In tal caso, l'equazione (1) è riferita al PCM, che può essere in fase liquida o solida ($u = 0$), mentre l'equazione (2) si riferisce al materiale in fase solida utilizzato per incrementare la conducibilità termica del PCM. Inoltre, tali equazioni possono essere scritte in due o tre dimensioni, in base alla complessità geometrica del problema.

3.4.2 Modellazione del passaggio di fase con conduzione dominante

Come visto nel paragrafo precedente, l'approccio del mezzo poroso non tiene conto del gradiente termico all'interno delle capsule contenenti PCM, cosa che, a causa della bassa diffusività termica di molti PCM commerciali, potrebbe determinare una valutazione dello scambio termico tra PCM e fluido non corretta.

Assumere che lo scambio termico sia dominato dalla conduzione, significa trascurare gli effetti di galleggiamento e i moti convettivi all'interno del PCM fuso. Dal punto di vista fisico, questa assunzione è valida per i PCM non soggetti a fusione incongruente oppure per quei PCM il cui spessore delle capsule è tale che il numero di Rayleigh sia inferiore a 5000.

In questo caso la modellazione del PCM può essere effettuata considerando la seguente equazione della conduzione (3), valida sia per la fase solida che per quella liquida:

$$(\rho c)_{PCM} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3)$$

dove, $(\rho c)_{PCM}$ è il prodotto tra la densità e il calore specifico a pressione costante, t il tempo, T la temperatura, λ la conducibilità termica.

3.4.3 Modellazione del passaggio di fase con convezione naturale

In generale, i problemi di scambio termico in un mezzo soggetto al passaggio di fase solido-liquido, risultano essere piuttosto complessi e non lineari a causa del movimento del fronte solido-liquido, la cui posizione non è nota a priori. Inoltre, la variazione di densità nel PCM fa sì che si instaurino dei moti convettivi nel PCM fuso e variazioni di volume.

La modellazione numerica dei PCM si basa, perciò, sulla risoluzione delle equazioni di conservazione della massa (4), della quantità di moto (5) e dell'energia (6). Nell'equazione della quantità di moto sono le forze di galleggiamento (convezione naturale) ad instaurare i moti convettivi all'interno del PCM quando questo si trova in fase liquida.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

$$\rho_{PCM} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \cdot \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu_{PCM} \nabla^2 \mathbf{u} + \rho_{PCM} \mathbf{g} \beta (T - T_{ref}) \quad (5)$$

$$(\rho c_p)_{PCM} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (6)$$

in cui p è la pressione, μ_{PCM} la viscosità, \mathbf{g} l'accelerazione gravitazionale, β la comprimibilità isobarica, T_{ref} la temperatura di riferimento.

Quando il PCM è in fase solida, si impone un valore di viscosità infinita al PCM in modo da garantire che questo sia immobile, ovvero $\mathbf{u}=0$. Inoltre, per piccoli valori del numero di Stefan (tale quantità adimensionale, fisicamente rappresenta il rapporto tra il calore sensibile e il calore latente), possono crearsi condizioni tali per cui si possono trascurare i moti convettivi all'interno del PCM in fase liquida. Utilizzando tali osservazioni, è possibile modellare il PCM senza adoperare le equazioni (4) e (5).

I metodi principalmente utilizzati in letteratura per modellare il passaggio di fase nei PCM sono essenzialmente due, il metodo entalpico e il metodo della capacità effettiva, di seguito brevemente riportati. Attraverso tali metodi è possibile risolvere l'equazione della conservazione dell'energia, equazione (6).

3.4.4 Metodo entalpico

Nel metodo entalpico, si utilizza l'equazione dell'energia in termini di entalpia. Utilizzando l'equazione di stato sia per il PCM solido che per il PCM in fase liquida, si riesce a risalire al campo di temperatura dell'intero PCM. Assumendo che le densità delle fasi solida e liquida siano le stesse, l'equazione che regola lo scambio termico in un materiale soggetto al passaggio di fase, in regime transitorio, è la seguente:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (7)$$

dove h è l'entalpia specifica.

Dalla relazione funzionale tra entalpia specifica h e temperatura T , riportata di seguito nell'equazione (8), per ogni istante di tempo, è possibile ricavare il campo di temperatura, e dunque la regione di passaggio di fase.

$$h(T) = \begin{cases} c_{ps} (T - T_m), & \text{per } T < T_m \\ c_{pl} (T - T_m) + h_{sl}, & \text{per } T > T_m \end{cases} \quad (8)$$

Nell'equazione (8), T_m è la temperatura di passaggio di fase, e h_{sl} è il calore latente di solidificazione. Nel caso in cui il passaggio di fase non avvenga ad una temperatura fissa T_m ma in un intervallo di temperatura ΔT finito, il metodo dell'entalpia viene modificato. In particolare, con riferimento all'equazione (8), viene caratterizzato anche il legame funzionale tra entalpia e temperatura durante il passaggio di fase. L'equazione dell'energia utilizzata nel metodo entalpico (equazione (7)) può essere risolta accoppiandola all'equazione (8), ed eventualmente tenendo conto anche della variabilità della conducibilità termica con la temperatura.

Dal punto di vista computazionale questo metodo risulta essere piuttosto complesso, tuttavia ha il vantaggio di essere un metodo stabile [47].

3.4.5 Metodo della capacità effettiva

In questo metodo si ipotizza che il passaggio di fase avvenga in un intervallo di temperatura compreso tra T_m e $\pm \Delta T/2$. Quando il materiale in passaggio di fase è formato da un singolo componente, il valore del ΔT dovrà essere il più piccolo possibile. In tale modo, la capacità termica del PCM alla temperatura T_m non avrà un valore infinito ma assumerà un valore molto più grande rispetto alla capacità termica in fase solida e liquida. È quindi possibile introdurre la capacità effettiva c_{eff} (J/kg/K), che includa il calore latente di fusione nel calore specifico a pressione costante c_p . Introducendo, quindi, tale grandezza, l'equazione (6), diventa:

$$(\rho c_{eff})_{PCM} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (9)$$

in cui il calore specifico effettivo c_{eff} del PCM è dato da:

$$c_{eff}(T) = \begin{cases} c_{ps}, & \text{per } T - T_m < \Delta T \\ \frac{h_{sl}}{2\Delta T} + \frac{c_{ps} + c_{pl}}{2}, & \text{per } T - T_m < |\Delta T| \\ c_{pl}, & \text{per } T - T_m > \Delta T \end{cases} \quad (10)$$

Se la conducibilità termica del PCM varia durante il passaggio dalla fase solida a quella liquida, si può ipotizzare che questa abbia un andamento lineare durante il passaggio di fase a ΔT finito.

Tale metodo risulta essere più semplice dal punto di vista computazionale, tuttavia meno stabile del precedente [47].

3.5 Applicazione dei modelli matematici relativi alle tecniche di incremento dello scambio termico nei PCM

Agire al fine di incrementare le prestazioni di scambio termico vuol dire poter determinare un incremento della potenza termica scambiata tra PCM e ambiente esterno o un incremento dei valori della conducibilità termica del materiale.

La potenza termica scambiata \dot{Q} dipende dalla superficie di scambio termico A e dalla differenza di temperatura tra PCM e ambiente esterno, secondo la seguente relazione semplificata (11):

$$\dot{Q} = UA(T_{PCM} - T_{amb}) \quad (11)$$

Dalla (11) risulta evidente che al fine di incrementare \dot{Q} è possibile agire incrementando la conduttanza termica globale U , la superficie di scambio termico A , oppure incrementando la differenza di temperatura tra PCM e ambiente esterno, o variando la combinazione di questi tre fattori. Di seguito sono riportati alcuni dei lavori di letteratura più rappresentativi, relativi alla modellazione delle varie tecniche suddette.

3.5.1 Modellazione di sistemi con PCM e alette o superfici estese

L'introduzione di alette o superfici estese all'interno di un sistema di accumulo con PCM, come già spiegato nel paragrafo 3.2.1, ha lo scopo di incrementare la superficie di scambio termico A e quindi di incrementare la potenza termica scambiata, con riferimento all'equazione (11). Sono molti i lavori presenti in letteratura relativamente a questa pratica. Di seguito se ne descrive uno dei più significativi (Zhao e Tan [48]).

Il modello matematico proposto è basato sul metodo entalpico, e si propone di simulare il sistema di accumulo a PCM con alette integrate, mostrato in Figura 12, finalizzato all'aumento delle performance di un sistema di raffrescamento. Secondo gli autori, l'utilizzo di tale sistema, rispetto ad una convenzionale torre evaporativa, in un sistema di condizionamento dell'aria ad acqua, aumenta il coefficiente di prestazione di circa il 25.6%.

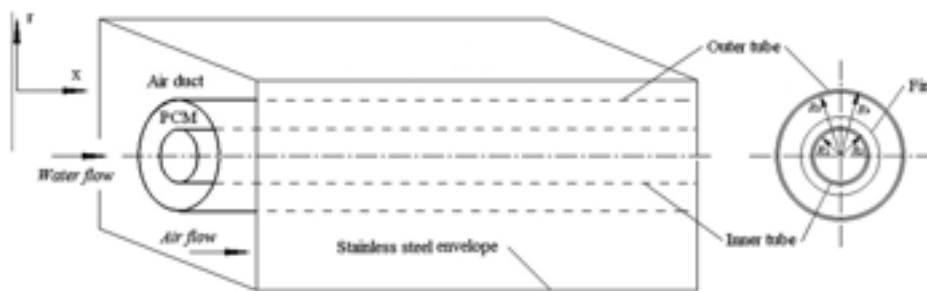


Figura 12. Sistema proposto da Zhao e Tan [48].

Le equazioni utilizzate per la modellazione del flusso d'acqua interno al tubo (12), del flusso d'aria esterno al tubo (13), delle superfici interna ed esterna del tubo e delle alette (14), ed infine del PCM (15) sono di seguito mostrate.

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = -u_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + a(T_w - T_f) \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -u_a \frac{\partial T_a}{\partial x} + b(T_w - T_a) \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha_w r \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha_p r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_p \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \rho_p \Delta H \frac{\partial f}{\partial t} \quad (15)$$

dove il pedice f si riferisce all'acqua, il pedice w alla parete del tubo, il pedice a all'aria, il pedice p al PCM, mentre α è la diffusività termica e ΔH il calore latente di fusione. I termini a e b sono dei coefficienti che dipendono dal coefficiente di scambio termico convettivo, dal raggio del tubo considerato, dalla densità e dal calore specifico a pressione costante.

Le condizioni al contorno associate alle equazioni (12) – (15) sono riportate in seguito. Le condizioni al contorno, relative al processo di carica del PCM, sono:

$$\begin{cases} \hat{\imath} T_f = T_{f,iniz}, \text{ per } x = 0 \\ \hat{\imath} - /_w \frac{\partial T_w}{\partial r} = U_{c,f} (T_f - T_w), \text{ per } r = R_1 \\ \hat{\imath} - /_w \frac{\partial T_w}{\partial r} = - /_p \frac{\partial T_p}{\partial r}, \text{ per } r = R_2 \\ \hat{\imath} T_w = \text{cost}, \text{ per } r = R_3 \end{cases} \quad (16)$$

dove $U_{c,f}$ è il coefficiente di scambio termico convettivo riferito all'acqua, e con R_i si indica l' i -esima coordinata radiale riportata in Figura 12. Le condizioni al contorno relative al processo di scarica del PCM, sono:

$$\begin{cases} T_a = T_{a,iniz}, \text{ per } x = 0 \\ -\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial r} = U_{c,a} (T_w - T_a), \text{ per } r = R_4 \\ -\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial r} = -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r}, \text{ per } r = R_3 \\ T_w = \text{cost}, \text{ per } r = R_2 \end{cases} \quad (17)$$

dove $U_{c,a}$ è il coefficiente di scambio termico convettivo riferito all'aria.

Per quanto riguarda la modellazione del PCM durante il passaggio di fase, si ricorre ad un metodo dell'entalpia modificato, per tenere conto del passaggio di fase a temperatura variabile. Si definisce l'entalpia totale volumetrica come la somma dell'entalpia sensibile, di cui è già riportato il legame funzionale con la temperatura, e dell'entalpia latente [49]:

$$H(T) = \int_{T_0}^T (\rho c_p)_p dT + \rho f \Delta H \quad (18)$$

Definendo T_s e T_i i valori estremi dell'intervallo di temperatura ΔT in cui avviene il passaggio di fase, in particolare $T_s = 19^\circ\text{C}$ e $T_i = 23^\circ\text{C}$, si può caratterizzare l'entalpia volumetrica globale nel seguente modo:

$$H(T) = \begin{cases} \int_{T_0}^T \rho c_{p,s}(T) dT, & \text{per } T \leq T_s \\ \int_{T_0}^{T_s} \rho c_{p,s}(T) dT - \int_{T_s}^T \rho \frac{\partial(f\Delta H)}{\partial T} dT, & \text{per } T_s < T \leq T_l \\ \int_{T_0}^{T_s} \rho c_{p,s}(T) dT - \rho\Delta H - \int_{T_l}^T \rho c_{p,l}(T) dT, & \text{per } T > T_l \end{cases} \quad (19)$$

La frazione di PCM fuso f è data dalla seguente correlazione:

$$f = \begin{cases} 0, & \text{per } T \leq T_s \\ (0,1), & \text{per } T_s < T \leq T_l \\ 1, & \text{per } T > T_l \end{cases} \quad (20)$$

Nel modello, si tiene conto della variabilità della conducibilità termica del PCM tramite la seguente correlazione:

$$\lambda_p = f\lambda_{eff} + (1-f)\lambda_s \quad (21)$$

dove la conducibilità effettiva del PCM in fase liquida (λ_{eff}) tiene conto anche degli effetti dovuti alla convezione naturale; questo valore è infatti espresso in funzione del numero di Rayleigh proprio per andare a considerare gli effetti convettivi nel modello proposto.

3.5.2 Modellazione di sistemi con PCM multipli

L'utilizzo di più unità di PCM caratterizzati da diversi punti di fusione, come riportato nel paragrafo 3.2.2, ha lo scopo di incrementare o mantenere costante la differenza di temperatura tra PCM e ambiente esterno. In questo modo, agendo sul termine in parentesi dell'equazione (11), si determina un incremento della potenza termica scambiata tra PCM e fluido circostante. Anche in questo caso, i lavori presenti in letteratura sono molteplici. Di seguito è riportato nel dettaglio il modello utilizzato da Ezra et al. [50]. Nel loro studio, gli autori hanno effettuato un'analisi parametrica necessaria ad individuare quelle condizioni tali da ottimizzare gli effetti dovuti all'utilizzo del PCM. Il sistema proposto in questo lavoro è mostrato in Figura 13.

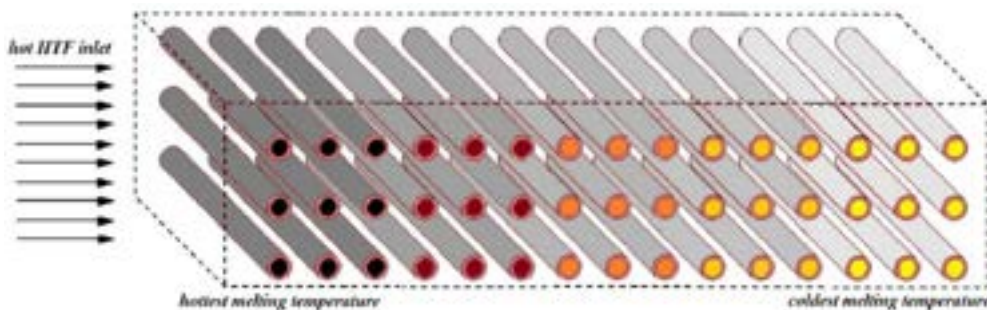


Figura 13. Sistema proposto da Ezra et al. [50].

Nella scrittura del modello, si ipotizza che il passaggio di fase avvenga in direzione radiale, che la temperatura del fluido termovettore in una certa fila sia data dalla media tra la temperatura di ingresso e

quella di uscita, che si trascuri la convezione naturale, che il calore sensibile sia nei tubi che nel PCM sia trascurato, e che le proprietà siano costanti.

L'equazione che correla lo scambio termico e il passaggio di fase è la seguente:

$$\left(\dot{m} c_p \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{aria} = q = -U A_n (T - T_m) \quad (22)$$

dove m è la portata massica, q la potenza termica scambiata, U la conduttanza termica globale, A_n la superficie di scambio termico riferita alla singola fila (basata sul diametro interno del condotto), T la temperatura del fluido termovettore, che dipende sia dallo spazio che dal tempo, e T_m la temperatura di fusione del PCM.

La percentuale di PCM fuso è ottenibile dalla seguente equazione:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{q}{h_s m / N} \quad (23)$$

dove m rappresenta la massa totale del PCM ed N il numero di file. Il denominatore del termine a destra dell'equazione (23) è il calore latente riferito alla fila n -esima. La trasmittanza globale U è ottenuta come somma di tre resistenze termiche in serie: la resistenza conduttiva del tubo, la resistenza convettiva dovuta al fluido termovettore, e la resistenza conduttiva dovuta al PCM. Il diametro di PCM fuso d_m è dato dalla seguente espressione:

$$d_m = D \sqrt{1 - f} \quad (24)$$

dove D rappresenta il diametro interno del tubo.

3.5.3 Modellazione di sistemi con PCM microincapsulati

Il microincapsulamento del PCM, descritto nel paragrafo 3.2.3, ha lo scopo di incrementare la superficie di scambio termico tra PCM e ambiente esterno. Questa pratica, come già detto, è molto diffusa in edilizia, per le ottime caratteristiche termiche e di stabilità presentate. Di seguito è riportato il modello adoperato da Franquet et al. [51], relativo all'integrazione di PCM micro incapsulato all'interno di una malta cementizia.

La malta cementizia, in cui vi è il PCM microincapsulato, è considerata come un unico mezzo omogeneo equivalente con proprietà isotrope e mediate. Gli effetti convettivi nel PCM sono trascurati, e il modello è monodimensionale. L'equazione di conservazione dell'energia, basata sul metodo dell'entalpia, è di seguito riportata:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (25)$$

Il dominio computazionale (lastra) varia tra le coordinate $x = 0$ ed $x = X$. Le condizioni al contorno del problema sono delle condizioni del terzo tipo:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = U_c (T_{x=0} - T_p(t)) \quad (26)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X} = U_c (T_{x=X} - T_p(t)) \quad (27)$$

dove T_p è la temperatura imposta su entrambi i lati della lastra, variabile nel tempo. L'entalpia dell'intero mezzo omogeneo equivalente è data dalla media tra l'entalpia della malta cementizia e del PCM, ponderata sulla massa di entrambe le componenti. Dopo alcuni passaggi matematici, è possibile ottenere il legame funzionale tra entalpia e temperatura, per l'intero mezzo omogeneo equivalente.

$$h(T) = \begin{cases} c_{ps}(T - T_m) + c_{pl}(T_m - T_a) + \varepsilon h_{sl} \left(1 - \frac{T_a - T_m}{T_a - T} \right) + (c_{ps} - c_{pl})(T_a - T_m) \ln \left(\frac{T_a - T}{T_a - T_m} \right), & \text{per } T < T_m \\ c_{pl}(T - T_a), & \text{per } T \geq T_m \end{cases} \quad (28)$$

dove T_m è la temperatura di fine fusione della fase liquida, T_a è la temperatura della sostanza pura ed ε la percentuale in massa di PCM.

3.5.4 Modellazione dei sistemi combinati PCM - schiume metalliche

I meccanismi di scambio termico in una schiuma possono essere studiati sperimentalmente oppure tramite modelli numerici o analitici. I modelli sono basati sulla risoluzione delle equazioni di conservazione, con le appropriate condizioni al contorno e tramite tecniche numeriche o analitiche, queste ultime solo dopo opportune semplificazioni. Tuttavia, a causa della complessa geometria di una schiuma, è necessario utilizzare l'approccio mediato per i mezzi porosi già descritto nel paragrafo 3.4.1. In tale approccio, può essere inserito anche il contributo convettivo, descritto nel paragrafo 3.4.3. Le equazioni che sono utilizzate per descrivere i campi di velocità, pressione e temperatura, sono riportate nel seguito.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\rho_{PCM}}{\varepsilon} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\rho_{PCM}}{\varepsilon^2} \mathbf{u} \nabla \cdot \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{\mu_{PCM}}{\varepsilon^2} \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{\mu_{PCM}}{K} \mathbf{u} - \frac{\rho_{PCM} C_f}{\sqrt{K}} |\mathbf{u}| \mathbf{u} + \rho_{PCM} \mathbf{g} \varepsilon \beta (T_{PCM} - T_{ref}) \quad (30)$$

$$(\rho C)_{eff,PCM} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T_f \right) = \nabla \cdot (k_{eff,PCM} \nabla T_s) + h_v (T_s - T_f) \quad (31)$$

$$(\rho C)_{eff,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{eff,s} \nabla T_s) - h_v (T_s - T_f) \quad (32)$$

Tali equazioni sono, rispettivamente, la conservazione della massa, della quantità di moto, dell'energia per la fase fluida (PCM) e dell'energia per la fase solida. Le equazioni dell'energia sono scritte utilizzando il metodo della capacità effettiva. Nell'equazione della quantità di moto, il secondo ed il terzo termine a destra rappresentano i contributi dovuti alla presenza della schiuma metallica all'interno del PCM. I termini K e C_f rappresentano rispettivamente la permeabilità e il fattore d'inerzia della schiuma a celle aperte. Con riferimento alle equazioni (31) e (32), l'ultimo termine a destra rappresenta lo scambio termico volumetrico all'interfaccia tra la schiuma e il PCM. Il coefficiente h_v è pari al prodotto tra il coefficiente di scambio termico U e l'area di scambio termico per unità di volume A_{par} . Inoltre, si osserva anche che quando il PCM è solido l'equazione dell'energia per il PCM diventa l'equazione dell'energia per un solido ($\mathbf{u} = 0$) rendendo quindi l'assieme schiuma a celle aperte e PCM un solo mezzo conduttivo eterogeneo.

Al fine di risolvere le equazioni (29) – (32), sono necessari dei coefficienti denominati coefficienti di chiusura. Tali coefficienti vincolano i fenomeni su scala del poro (modello discreto) a quelli su scale più grandi (modello continuo). Per quanto riguarda l'equazione della quantità di moto, tali coefficienti sono la permeabilità K e il fattore d'inerzia C_f , mentre, per quanto riguarda l'equazione dell'energia, si parlerà della conducibilità termica equivalente k_{eff} e del coefficiente di scambio termico volumetrico h_v . Questi coefficienti sono determinati tramite tecniche sperimentali, tecniche numeriche, basate su studi di modelli

discreti su scale locali, oppure tecniche basate su approcci semplificati del problema. Per effetto della crescita delle capacità computazionali, le tecniche numeriche hanno assunto un ruolo sempre più importante. Si crea un modello geometrico della schiuma da cui, applicando le equazioni di conservazione per la sola fase fluida o per la sola fase solida, è possibile ottenere i coefficienti di accoppiamento dai risultati ottenuti. Le menzionate equazioni di conservazione sono risolte tramite tecniche numeriche. Nell'ambito delle tecniche numeriche basate su modelli discreti, è importante ricostruire la geometria della schiuma nel modo più affidabile possibile. Tale geometria può essere ricostruita adoperando scansioni tomografiche di campioni di schiuma metallica, oppure riferendosi a modelli geometrici di schiuma basati su considerazioni di carattere fisico e matematico. La Tomografia Assiale Computerizzata (TAC) è una tecnica ampiamente consolidata in medicina, che può essere utilizzata per ricostruire la geometria di un materiale. Sebbene questa tecnica abbia un elevatissimo grado di precisione nel ricostruire la schiuma, risulta essere estremamente costosa in quanto richiede un macchinario dedicato. I modelli geometrici di schiuma risultano essere un ottimo compromesso tra costi ed affidabilità di rappresentazione. Tali modelli sono basati sulle leggi di Plateau e sul principio di minima energia, secondo il quale una schiuma, quando si forma, tende ad assumere una configurazione tale da minimizzare l'area superficiale all'interfaccia tra le due fasi. Vari modelli sono stati proposti durante gli anni da Plateau, Kelvin e, più recentemente, da Weaire e Phelan. Tra questi modelli, quello proposto da Kelvin risulta essere il miglior compromesso tra oneri computazionali e affidabilità di rappresentazione. Esso è stato ottenuto partendo dal reticolo cristallino Body-Centered-Cubic (BCC). La schiuma ottenuta risulta essere un tetracaidecaedro, ossia un poliedro archimedeo ottenuto andando a troncare le cuspidi di un ottaedro regolare. Tale geometria è formata da 8 facce esagonali e 6 quadrate. Kelvin ottenne una struttura con un'ulteriore riduzione dell'area superficiale andando a curvare leggermente le facce e continuando a rispettare le leggi di Plateau. La configurazione a celle aperte è ottenuta rendendo i pori aperti, e dando uno spessore finito agli spigoli del poliedro (legamenti). Sia la schiuma ottenuta dal tetracaidecaedro che la schiuma a celle aperte sono riportate in Figura 14.

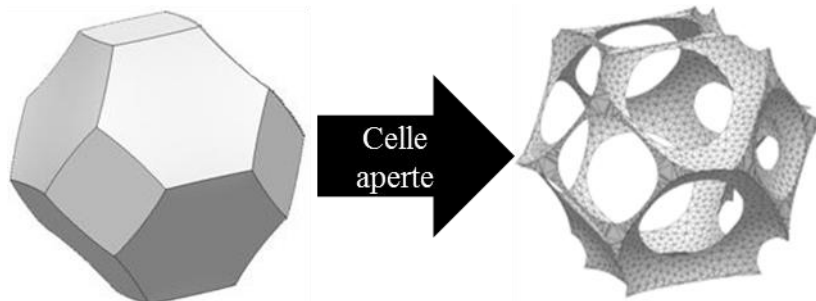


Figura 14. Modello di schiuma proposto da Kelvin nel 1887 con celle chiuse e con celle aperte.

Infine, si cita anche che l'affidabilità dell'utilizzo di un modello continuo mediato per studiare PCM combinati a schiume metalliche è stata studiata da Feng et al. [52]. Da un confronto tra modelli discreti basati sulla schiuma di Kelvin e modelli continui, gli autori hanno concluso che dal punto di vista qualitativo sia i modelli discreti che quelli continui portano a risultati simili, in particolare per quanto riguarda la frazione di PCM fuso e i flussi termici. Si può concludere quindi che, considerando i notevoli vantaggi in termini di oneri computazionali, i modelli continui possono essere adoperati in tali campi.

3.6 Conclusioni della Fase A

Nella prima fase delle attività (fase A) sono stati valutati i principali benefici e limiti dei PCM, focalizzando l'attenzione sul problema dello scambio termico e dei bassi valori della conducibilità termica che caratterizzano tali materiali. Sono state studiate le principali tecniche, oggi più in uso, finalizzate al miglioramento delle performance termiche dei PCM ed infine, nell'ultimo punto, sono stati analizzati i principali modelli analitici utilizzati per la simulazione di tali tecniche.

Da quanto visto, è emerso che uno dei metodi più efficienti, al fine di incrementare i valori della conducibilità termica dei PCM, e quindi più in generale, le performance di scambio termico di questi

materiali, consiste nell'utilizzo di sistemi combinati PCM - schiume metalliche. In virtù delle grandi potenzialità offerte dall'utilizzo delle schiume metalliche, è possibile innalzare il valore della conducibilità termica dei PCM anche di due ordini di grandezza, determinando un notevole miglioramento delle performance dei sistemi in cui sono utilizzate.

Alla luce di ciò, l'attività delle prossime annualità vedrà la realizzazione di un sistema di accumulo del freddo con PCM e schiume metalliche integrati. A tale scopo verrà effettuata un'analisi approfondita delle possibili applicazioni e dei possibili materiali da poter utilizzare per le specificità richieste.

4 Attività svolte nella Fase B

4.1 Premessa

L'attività della fase A ha riguardato lo studio delle tecniche di incremento dello scambio termico nei sistemi di accumulo con PCM, e dei principali modelli analitici utilizzati per la simulazione delle stesse. I metodi analizzati sono relativi a pratiche di incremento delle superfici di scambio termico, come l'introduzione di alette e superfici estese, o il microincapsulamento del materiale, pratiche utili al fine di mantenere costante la differenza di temperatura tra il PCM e l'ambiente esterno, utilizzando unità multiple di PCM, ed a tecniche di incremento della conducibilità termica. Tra queste, quella di maggior interesse nell'ambito dell'accumulo termico con serbatoio, in virtù dell'ampio potenziale di incremento della conducibilità e svantaggi limitati, rispetto alle altre pratiche, consiste nell'utilizzo di sistemi combinati PCM-schiume metalliche. Nei capitoli che seguono, sono riportate alcune delle principali applicazioni relative alle tecniche di incremento dello scambio termico nei PCM, sia con serbatoio, che con PCM integrati nelle componenti dell'involucro edilizio. Nel dettaglio, dato il grande interesse e potenziale fornito dai sistemi con schiume metalliche, e considerata l'attività sperimentale delle prossime annualità, finalizzata anche alla valutazione delle performance del sistema serbatoio a PCM con schiume integrate, la parte relativa alle applicazioni di accumulo con serbatoio sono inerenti all'utilizzo di tale tecnica.

4.2 Principali applicazioni di sistemi combinati PCM – schiume metalliche

Recentemente, le schiume metalliche hanno attratto un grosso interesse in virtù delle grosse potenzialità offerte. Nel corso degli anni, la comunità scientifica si è soffermata sulla quantificazione dell'incremento delle prestazioni dei PCM dovute alla conduzione, nonché sugli effetti dovuti alla modalità di applicazione del carico termico, della morfologia e dei moti convettivi naturali che si instaurano all'interno del PCM quando questo è in fase liquida.

Li et al. [53], applicando il carico termico da un lato, hanno osservato che le schiume a celle aperte in rame aumentano rapidamente la velocità di passaggio di fase del PCM, nonostante la matrice solida ostacoli i moti convettivi naturali. Tra i vari parametri morfologici, la porosità risulta avere un effetto sullo scambio termico molto maggiore rispetto ai PPI. In Figura 15, è analizzato l'effetto della porosità e dei PPI sulla temperatura della parete riscaldata del PCM. Si osserva che le temperature della parete sono più basse per valori minori di porosità. Questo implica che la resistenza termica nel resto del PCM è ridotta dalla maggiore presenza della schiuma metallica in termini volumetrici, favorendo quindi il passaggio di fase nelle parti del PCM lontane dalla parete riscaldata. Le lettere A, B, C e D rappresentano l'istante temporale in cui avviene la fine del passaggio di fase. Per quanto riguarda l'effetto dei PPI, si osserva che la variazione dei PPI non influenza le prestazioni del PCM come avviene per la porosità; tuttavia, vi è un lieve miglioramento per bassi valori di PPI. Gli autori riportano anche che a bassi PPI la distribuzione di temperatura all'interno del PCM è più uniforme proprio perché vi è un minore ostacolo dei moti convettivi naturali.

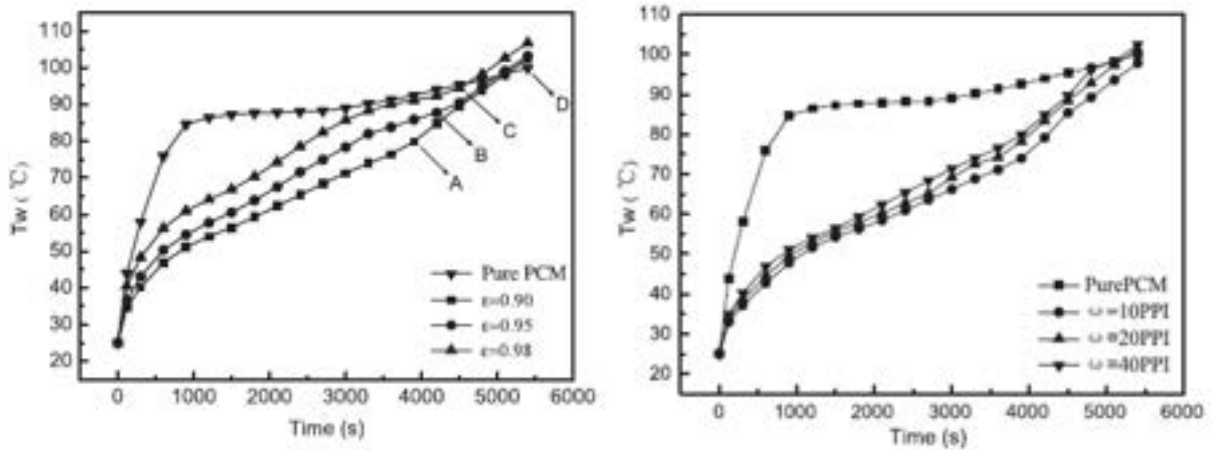


Figura 15. Effetto della porosità e dei PPI sulla temperatura della faccia riscaldata (adattato da [53])

Tian e Zhao [54] hanno utilizzato il metodo dell'entalpia per modellare un PCM immerso in una schiuma metallica riscaldato dal basso. Il loro modello è stato validato con esperimenti riportati nello stesso lavoro. In Figura 16 è riportato il confronto tra un campione di RT58 puro e due schiume con 85% e 95% di porosità, che corrispondono rispettivamente a 15% e 5% di densità relativa. Sull'asse delle ascisse si riporta la temperatura misurata ad 8 mm dalla base riscaldata (nell'esperimento sono anche posizionate altre termocoppie a 16 mm e a 24 mm di distanza dalla base), mentre sulle ordinate si riporta la differenza di temperatura (ΔT) tra la base riscaldata del PCM e la temperatura misurata ad 8 mm. Si osserva subito che l'utilizzo della schiuma metallica ha elevati vantaggi dal punto di vista termico in quanto vi è una riduzione della resistenza termica, soprattutto nella fase solida. Tali vantaggi aumentano al diminuire della porosità. Inoltre, l'incremento in termini di potenza termica può arrivare fino a 5-20 volte in fase solida, e a 3-10 volte durante il passaggio di fase. A valle di un'analisi numerica, gli autori conclusero anche che una schiuma ad alti valori di PPI migliora lo scambio termico in quanto dotata di una superficie di scambio termico maggiore.

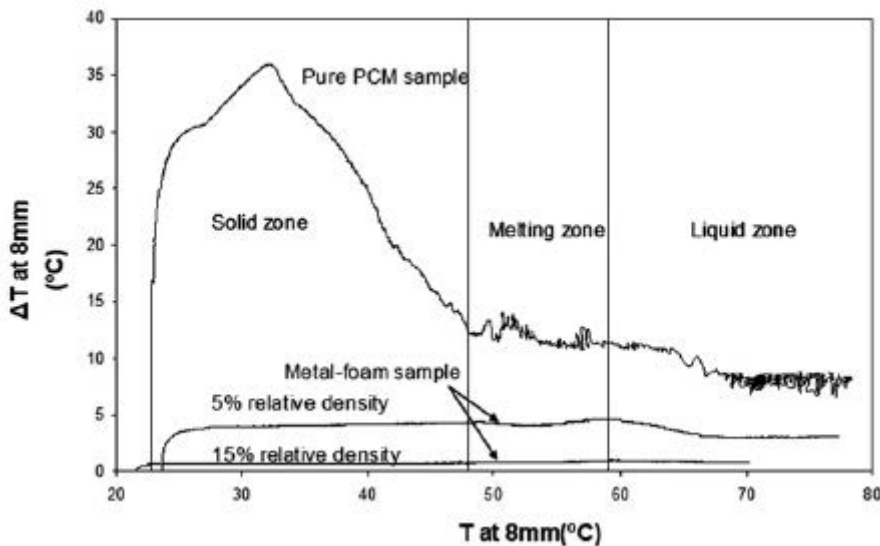


Figura 16. Differenze di temperatura all'interno di un PCM: effetto dell'utilizzo di schiume a diversa porosità (densità relativa) [54].

La conducibilità effettiva per schiume a celle aperte immerse in una paraffina è stata analizzata da Xiao et al. [55]. Nel loro studio, è stato riscontrato un forte aumento della conducibilità dovuto alla porosità, mentre invece gli effetti dei PPI sulla conducibilità termica globale risultano essere minimi. L'effetto della

porosità sulla conducibilità termica è riportato in Figura 17, sia per schiume di rame con paraffina che per schiume in nickel con paraffina. Avendo il rame una conducibilità termica più elevata del nickel, si riscontrano valori di conducibilità maggiori. Tuttavia gli autori riportano anche che il rame si corrode più facilmente del nickel, concludendo che la scelta della matrice solida deve essere un compromesso tra stabilità e conducibilità termica. Rispetto al caso di pura paraffina, gli autori hanno misurato un incremento della conducibilità termica pari a 44 volte per una schiuma in rame con circa l'89% di porosità e 25 PPI.

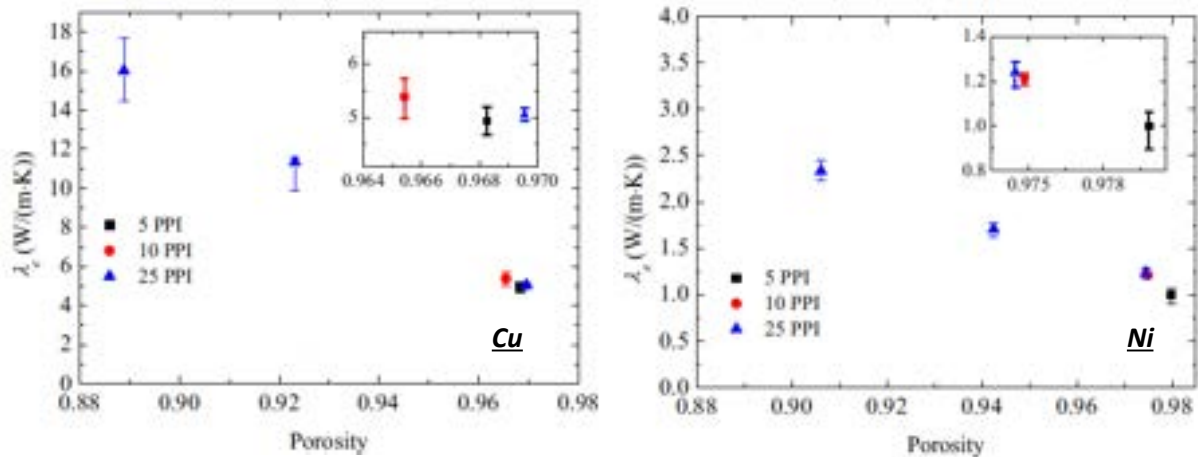


Figura 17. Effetto della porosità sulla conducibilità termica in una schiuma con PCM: rame (sinistra) e nickel (destra) (adattato da [55])

Gli effetti dei PPI per una schiuma riscaldata dal basso sono stati analizzati da Mancin et al. [56]. È stato concluso che i PPI hanno un effetto minimo sullo scambio termico. Un confronto tra un PCM riscaldato dal basso senza schiuma e con schiuma in rame è riportato in Figura 18. Fronte di liquefazione senza schiuma e con una schiuma in rame con 94% circa di porosità e 5 PPI dopo 10', 20', 30' e 40'. Tale schiuma è in rame, con una porosità pari a 93.5% e 5 PPI, mentre la potenza termica applicata è 20 W (il flusso termico è 12.5 kW/m²). Si osserva che dopo 20 minuti il PCM senza schiuma inizia già a passare di fase; tuttavia, dopo 40 minuti, il 98% del PCM con schiuma è già diventato liquido, mentre nel caso del solo PCM senza schiuma solo il 62.5% del materiale è diventato liquido.

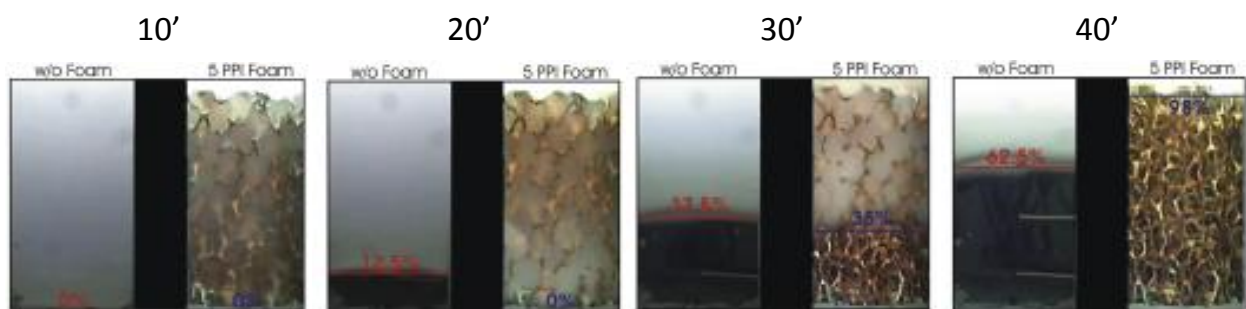


Figura 18. Fronte di liquefazione senza schiuma e con una schiuma in rame con 94% circa di porosità e 5 PPI dopo 10', 20', 30' e 40' [56].

Uno dei limiti delle schiume, forse il principale, risiede nell'elevato costo. Da una prima indagine, è emerso che per dei campioni di una schiuma in alluminio, di dimensioni comprese tra 800 e 100 cm³, i costi possono variare tra circa 3000 e 9000 €/kg. Dall'analisi è emerso che il costo specifico, in genere, dipende dalle dimensioni dei campioni, e che aumenta man mano che le dimensioni dei campioni si riducono, a causa dei costi di attivazione dei processi produttivi, i quali, nel caso di campioni molto piccoli, hanno un effetto predominante sui costi totali.

4.3 Utilizzo dei PCM all'interno dell'involucro edilizio

Da quanto visto nei paragrafi precedenti, migliorare lo scambio termico in serbatoi di accumulo con PCM vuol dire avere fasi di carica e scarica del materiale più rapide. Inoltre, si è visto, come l'incremento della conducibilità termica sia necessario per assicurare cicli di passaggio di fase completi per tutto il materiale. Ad oggi, però, la completa fusione dei materiali a cambiamento di fase in soluzioni impiantistiche non è sempre raggiunta e questo, evidentemente, limita la capacità di accumulo di calore latente, laddove parte del mezzo resta in fase solida. Diversamente, se il medesimo obiettivo di miglioramento dello scambio termico deve essere raggiunto anche in componenti dell'involucro edilizio, con il fine di limitare quanto più possibile la rientrata termica, immagazzinando energia durante il passaggio di fase del PCM, la priorità deve essere data alla scelta idonea del punto di fusione del materiale. Dovendo il ciclo di carica e scarica del materiale compiersi in un intervallo temporale pari 24 ore, la velocità dei processi di scioglimento e solidificazione è un parametro da tenere sotto controllo, ma di secondaria importanza.

Come noto, l'energia può essere immagazzinata nei materiali, producendo un incremento dell'energia interna, sia in forma di calore sensibile (la qual cosa determina un incremento di temperatura dello stesso), sia in forma di calore latente, allorquando il materiale è interessato da un passaggio di fase, con processo di saturazione a temperature pressoché costante (Figura 19).

Nel primo caso, la quantità di energia immagazzinabile dipende da proprietà dei materiali, quali densità e calore specifico, nonché, evidentemente, dalla sua quantità. Al contrario, l'accumulo di calore latente è basato sul fenomeno di assorbimento/cessione di energia, rispettivamente durante i processi di fusione e solidificazione, di un materiale soggetto al passaggio di fase. Ad oggi, lo sfruttamento di tale meccanismo di scambio termico è di grande interesse per applicazioni in edilizia, al fine di ottenere due effetti benefici relativamente alle condizioni di temperatura interne, principalmente nella stagione estiva, nonché un'analoga riduzione della richiesta di condizionamento ambientale. In particolare, l'utilizzo di PCM può consentire [57]:

- l'incremento della capacità di accumulo delle pareti, senza ricorrere a materiali ad alta densità o elevato calore specifico (materiale di derivazione legnosa);
- la riduzione dei carichi di picco e dell'ampiezza dell'onda termica.

Nel dettaglio, per applicazioni in edilizia, i PCM sono solidi a temperatura ambiente ma quando questa sale e supera una certa soglia, che varia a seconda del materiale e della concentrazione, passano in fase liquida, accumulando, nella fusione, calore latente.

Allo stesso modo, quando la temperatura scende, il materiale si solidifica e cede calore (latente di solidificazione). Tutto ciò avviene correttamente se sono note le temperature all'interno del componente edilizio.

Negli ultimi anni sono diversi gli autori che si sono concentrati sulle opportunità, offerte dai PCM, in merito al miglioramento dei parametri termici dinamici dell'involucro edilizio, e quindi sulla possibilità di ottenere una minore trasmittanza periodica, un minore fattore di attenuazione dell'onda termica, un maggiore sfasamento tra il picco della sollecitazione esterna (effetto della radiazione solare sulle superfici esterne dell'involucro in abbinamento alle temperature esterne) e il massimo flusso entrante in ambiente attraverso le strutture.

In letteratura, ad oggi sono disponibili molti studi che concentrano le ricerche sugli effetti dei PCM in edifici ventilati naturalmente [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] e quindi mirati a valutare le potenzialità di tali materiali al fine di migliorare le condizioni di temperatura in ambiente, senza ricorso ad impianti di climatizzazione, oppure a valutare la capacità di sfasamento ed attenuazione del picco di carico [66].

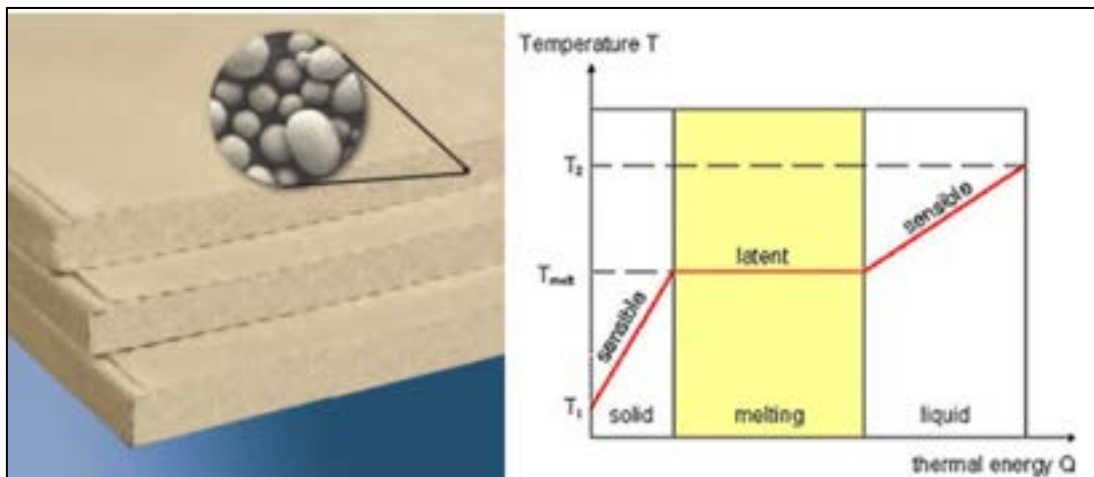


Figura 19 – PCM integrati in pannelli per edilizia e correlazione e costanza della temperatura durante il passaggio di fase.

Per quanto concerne la modellazione numerica, fermo restando la necessità di utilizzo di un codice di calcolo operante in regime dinamico, mediante bilanci sub-orari estesi all'intera stagione, non sono adoperabili metodi diffusi, quali la risoluzione mediante funzioni di trasferimento, richiedendosi, diversamente, discretizzazione spaziale del dominio di calcolo (parete/solaio) e risoluzione del campo termico, al fine di individuare le temperature nodali. Facendo un passo indietro, mediante algoritmi basati sull'uso di funzioni di trasferimento, il flusso termico entrante in un edificio è correlato a quello omologo, agli istanti di tempo precedenti, alla temperatura superficiale interna ed esterna, alla 'storia' delle temperature superficiali interne agli istanti precedenti.

Metodi numerici piuttosto che analitici sono necessari per determinare i coefficienti delle funzioni di trasferimento.

I codici per la simulazione termo-energetica dinamica operano principalmente mediante rappresentazione in spazio di stato, che prevede il ricorso all'algebra matriciale per eliminare il vettore "variabili di stato" e correlare direttamente gli output (i flussi termici) al vettore di input (le temperature superficiali) e alla storia temporale di input ed output. Pertanto, la potenza del metodo sta nell'eliminazione delle variabili di stato-spazio (i.e., le temperature ai nodi) e la determinazione dei flussi come funzione degli input (Figura 20).

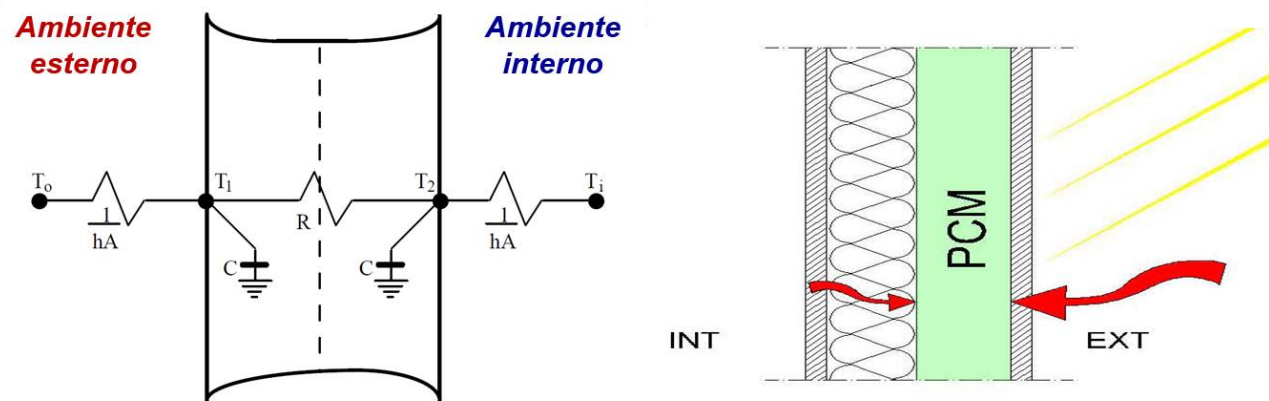


Figura 20 - Rappresentazione in spazio di stato di una parete a due nodi.

La rappresentazione stato-spazio a tempo continuo è un metodo ottimo, che risolve il problema differenziale mediante ricorso all'algebra matriciale.

Nessun metodo basato sulle funzione di trasferimento, però, consente di conoscere il campo di temperature entro il muro (Figura 20 e Figura 21).

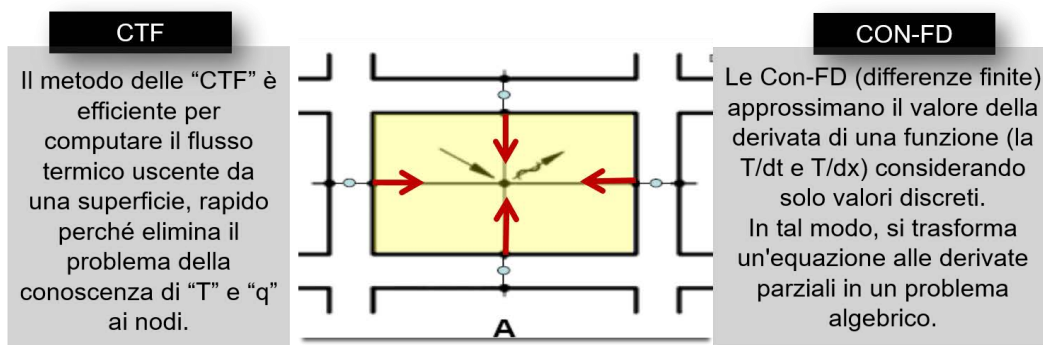


Figura 21 - Simulazione Energetica dinamica: confronto tra funzioni di trasferimento (CTF) e analisi alle differenze finite (CON-FD).

Al contrario, nella progettazione e nella verifica dell'applicabilità e dell'efficacia di un materiale a cambiamento di fase, sarà necessario utilizzare altri metodi numerici, più onerosi dal punto di vista dei tempi computazionali e della potenza di calcolo.

In particolare, anche il campo di codici commerciali si restringe. Ad oggi, infatti, i tradizionali motori di calcolo commerciali adoperati in ambito CFD, operanti mediante metodi di risoluzione ai volumi finiti "FVM" o agli elementi finiti "FEM", non consentono simulazioni energetiche dinamiche di edifici complessi.

I sopra citati sono, in breve, metodi numerici che approssimano la risoluzione del campo termico (Figura 22). Numericamente, si discretizza il dominio di calcolo, nella realtà continuo, in una griglia di nodi (mesh) su cui si operano i bilanci energetici.

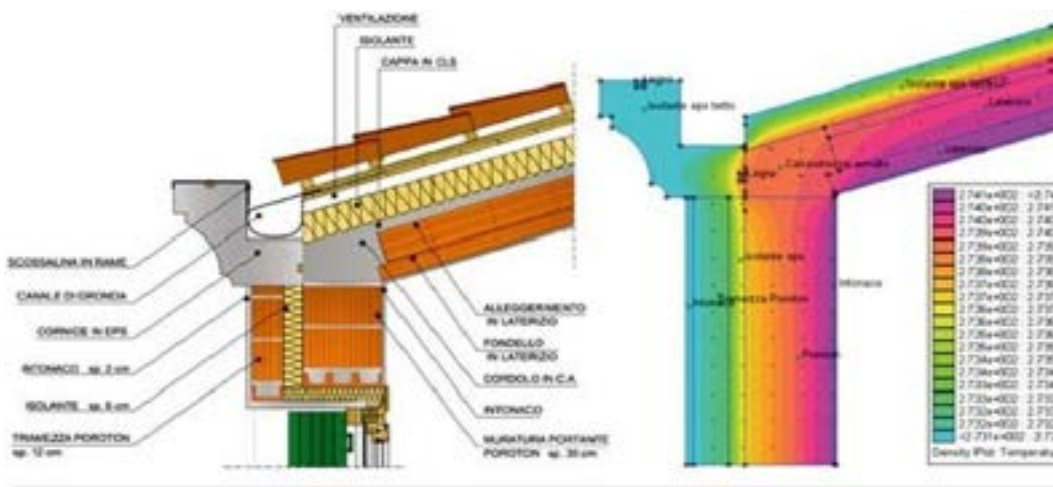


Figura 22 - Risoluzione del campo termico in involucro edilizio.

Invero, nell'analisi energetica dinamica degli edifici, vi sono diversi limiti che complicano un accoppiamento continuo tra analisi tempo-varianti estese all'edificio come dominio di calcolo (BEPS – Building Energy Performance Simulation) e analisi numeriche FEM/FVM. Discontinuità di vario genere, prima tra tutte quella relativa all'onere e quindi ai tempi della computazione, rendono di fatto, inapplicabile o estendibile a brevi istanti temporali, tale analisi accoppiata, le cui potenzialità e criticità sono evidenziate in [67] [68] [69] [70].

Una soluzione di compromesso, che consente l'uso di codici per la simulazione energetica dinamica, anche risolvendo il campo termico in parete, evidentemente con una flessibilità minore rispetto a quanto reso possibile da un codice prettamente CFD (tra cui Comsol e Fluent, per citarne due tra i più diffusi commercialmente), è il ricorso a metodi di risoluzione dei bilanci di energia attraverso le differenze finite. Questa, ad esempio, è la modalità attraverso cui EnergyPlus opera, su definizione dell'utente, per risolvere compiutamente il calcolo del contributo di materiali a cambiamento di fase all'interno di strutture murarie.

La discretizzazione spaziale del dominio consente di determinare le temperature ai nodi e quindi il raggiungimento, o meno, del punto di fusione del materiale a cambiamento di fase.

Un'ampia analisi numerico-sperimentale è stata condotta in [71], in cui diversi pannelli contenenti PCM sono testati per edifici dall'involucro edilizio leggero, e, in seguito, i dati sperimentali sono interpretati mediante modellazione del cambiamento di fase attraverso la definizione di una capacità termica apparente.

Altri studi numerici sulla simulazione di materiali a cambiamento di fase, condotti con riferimento alle prestazioni potenziali in edilizia, sono proposti in [72] [73] e [74]. In particolare, Shilei et al. [72] hanno valutato intonaci PCM per migliorare la prestazione energetica invernale degli edifici, misurando, secondo diverse procedure basate sull'utilizzo di tecniche DSC (i.e., differential scanning calorimetry) temperatura di transizione di fase e calore latente di fusione. Allo stesso modo, con riferimento all'intero anno, e quindi il comportamento nella stagione di riscaldamento ed in quella di raffrescamento, Pasupathy e Velraj [73] valutano le prestazioni di PCM, in doppio o singolo strato.

Diversamente, Ascione et al. [74] hanno valutato le prestazioni di diversi materiali a cambiamento di fase, anche con differenti punti di fusione e in mono o doppio strato, in diversi climi europei, evidenziando criticità connesse alla scelta del corretto passaggio di fase per migliorare le prestazioni nelle stagioni intermedie o nel periodo più caldo della stagione estiva, la posizione più opportuna, gli impatti sulle prestazioni energetiche dell'edificio in termini di riduzione del fabbisogno di energia per il raffrescamento e miglioramento delle condizioni ambientali.

Il problema dell'ottimizzazione dello scambio termico, con particolare riferimento a tecniche per ottimizzare il processo di carica (fusione) e scarica (solidificazione) richiede abbinamento, nelle ore notturne, a sistemi di raffrescamento passivo, quali la ventilazione notturna naturale o meccanica.

Recentemente, Barzin *et al.* [75] hanno osservato il miglioramento delle prestazioni di intonaci PCM mediante accoppiamento con tecniche di ventilazione notturna. Lo studio è stato condotto con approccio sperimentale, mediante costruzione di due identiche celle di prova, e, nelle medesime condizioni operative, la ventilazione notturna ha consentito risparmi energetici, su base settimanale, del 73%.

Faheem *et al.* [76], in una pubblicazione scientifica del 2016, hanno testato numericamente, con validazione sperimentale, una soluzione edilizia di PCM alquanto innovativa, e quindi micro incapsulamento di materiali a cambiamento di fase in soluzioni di involucro edilizio ventilate, trovando che, laddove i PCM sono utilizzati in involucri leggeri (i.e., 'low thermal mass buildings'), la loro efficacia è fortemente connessa, per il regime estivo, alla quantità di ventilazione notturna.

L'efficacia dell'accoppiamento tra componenti di involucro edilizio con incapsulamento di materiale a cambiamento di fase e fase di scarico dei PCM mediante ventilazione notturna è tema studiato anche da Solgi *et al.* [77]. Gli autori hanno valutato l'efficacia di tale accoppiamento per un edificio per uffici, laddove la principale necessità, in regime estivo, è contenere la rientrata termica diurna (ore occupate), cosicché l'accumulo di calore latente nel PCM, poi scaricato mediante ventilazione meccanica nelle ore notturne, risulta alquanto idoneo. Il caso studio è investigato mediante approccio numerico, in clima caldo ed arido, rivelando che con talune eccezioni (piani terra), l'uso dei PCM contribuisce notevolmente a ridurre il fabbisogno di raffrescamento dell'edificio.

Lo stesso principio, e quindi l'uso diurno dei materiali a cambiamento di fase per attenuare le rientrate termiche dall'esterno verso l'interno, nonché lo scarico notturno mediante cessione del calore accumulato attraverso un'opportuna ventilazione, è il tema analizzato da Jaworosky [78], che però integra i materiali a cambiamento di fase in un controsoffitto, concepito esso stesso come sistema di ventilazione. La struttura del solaio è al 27% in materiale a cambiamento di fase. Il PCM raffresca l'aria di ventilazione nelle ore diurne, mentre il medesimo sistema, nelle ore notturne, è ventilato al fine di scaricare e solidificare nuovamente il materiale a cambiamento di fase. I risultati dello studio evidenziano quella che è una criticità già in precedenza presentata, e quindi la necessità di un'accurata progettazione di temperatura di fusione e flusso d'aria, perché non sempre, negli studi condotti in [78], tutto il materiale cambia di fase, limitando quindi la propria efficacia.

Invero, il miglioramento dello scambio termico in materiali a cambiamento di fase è argomento ampiamente trattato dalla letteratura, relativamente ad applicazioni in edilizia e, fatte salve sporadiche

esperienze diverse, trattanti complesse integrazioni ed accoppiamenti dei PCM in sistemi energetici attivi, la più efficace strategia consiste proprio nell'uso combinato di materiali a cambiamento di fase per mitigare le condizioni ambientali interne diurne, per poi scaricare il calore in essi accumulato nelle ore notturne mediante ventilazione. Tali aspetti sono stati affrontati da:

- Kamali [79] che ha proposto un'ampia revisione scientifica dell'applicabilità e della convenienza tecnica dei materiali a cambiamento di fase come strategia per operare free-cooling degli edifici. In particolare, un macro-criterio di scelta è l'escursione giornaliera delle temperature, nonché la temperatura diurna esterna della località. Ancora, l'autore ha evidenziato come, durante la fase di carico (ore diurne), il tasso di ventilazione, in impianti ibridi e quindi PCM integrati in sistemi di ventilazione, deve essere di circa 3-4 volte inferiore rispetto al flusso d'aria necessario, nelle ore notturne, per scaricare (solidificare) il materiale.
- Sharma *et al.* [80], analogamente, hanno proposto una descrizione di molti lavori scientifici basati sull'utilizzo di materiali a cambiamento di fase in edilizia. Tra gli altri, particolarmente interessanti sembrano i PCM integrati negli schermi solari, cosicché, oltre alla riflessione della radiazione incidente, anche l'energia che poi sarebbe emessa all'interno dell'ambiente, dalla parte retrostante delle lamelle, è assorbita dal materiale, a temperatura costante, per alimentarne il processo di fusione. Ovviamente, l'escursione notturna, in sistemi solari posti esternamente, sarà funzionale alla solidificazione del materiale.

Per quanto concerne l'applicabilità di PCM in edilizia, Waqas e Din [81], hanno sottolineato come, oltre alla necessità di una progettazione adeguata, il criterio della convenienza tecnico-economica non possa essere trascurato, essendo ancora poche le applicazioni reali di involucri contenenti materiali a cambiamento di fase, talché il mercato ancora non risulta né di ampia scala né particolarmente competitivo, rispetto ad altre soluzioni tecniche di maggiore commercializzazione. Le medesime considerazioni sono proposte in [74] in cui, con riferimento al mercato europeo, l'analisi proposta contempla sia gli aspetti termici che energetici che economici.

Sicuramente la prestazione dei materiali a cambiamento di fase integrati in involucri edilizi può essere migliorata ricorrendo a soluzioni ibride, in cui, sebbene il PCM sia integrato in elementi murari o orizzontamenti, e quindi capace di accumulare calore latente durante la fase di carica, la fase di scarica è ottenuta mediante processi energetici attivi, anche se caratterizzati dal mero assorbimento elettrico di pompe/circolatori o ventilatori. E' questo il caso di scarica notturna dello strato di PCM mediante:

- a) ventilazione meccanica che direttamente lambisce l'intonaco a cambiamento di fase. Il flusso d'aria, laminare o turbolento, mediante sistemi di ventilazione con terminali perimetrali, asporta per convezione energia termica dallo strato (Figura 23);

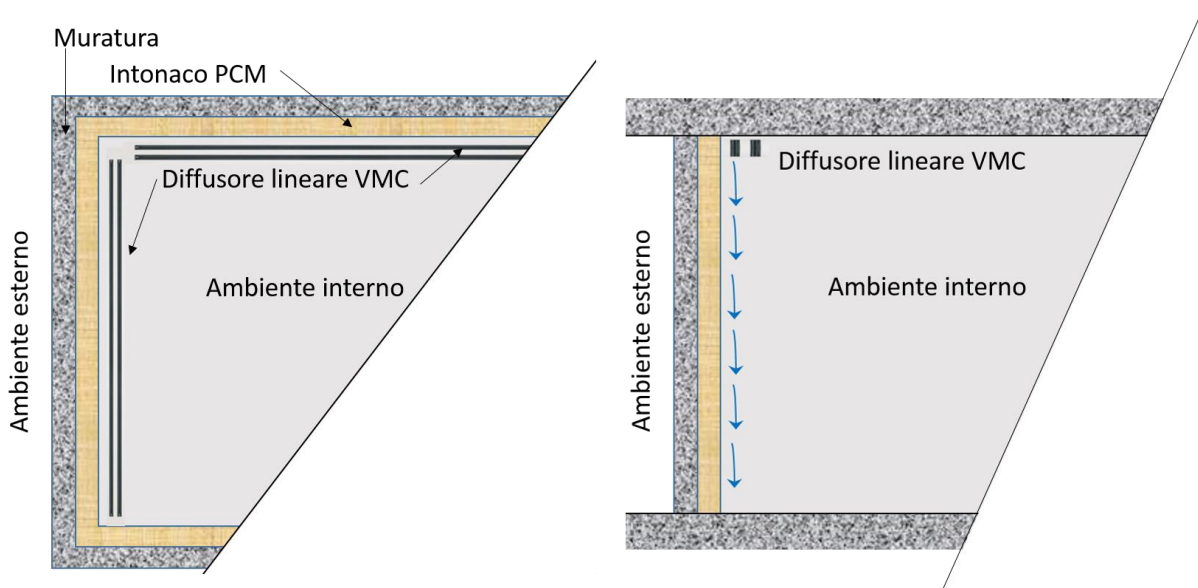


Figura 23 - Ventilazione meccanica controllata notturna per scaricare l'intonaco a cambiamento di fase. A sinistra, planimetria; a destra, sezione verticale.

- b) ventilazione meccanica in micro-canali inseriti all'interno dello strato di PCM. La soluzione, ingegneristicamente più complessa, a causa delle perdite di carico significative connesse alla movimentazione di aria in canali dai diametri esigui (ordine dei 25 - 40 mm), può concentrare, mediante opportune serrande, la ventilazione notturna all'interno dei canali inseriti nelle fodere interne dei muri (Figura 24);

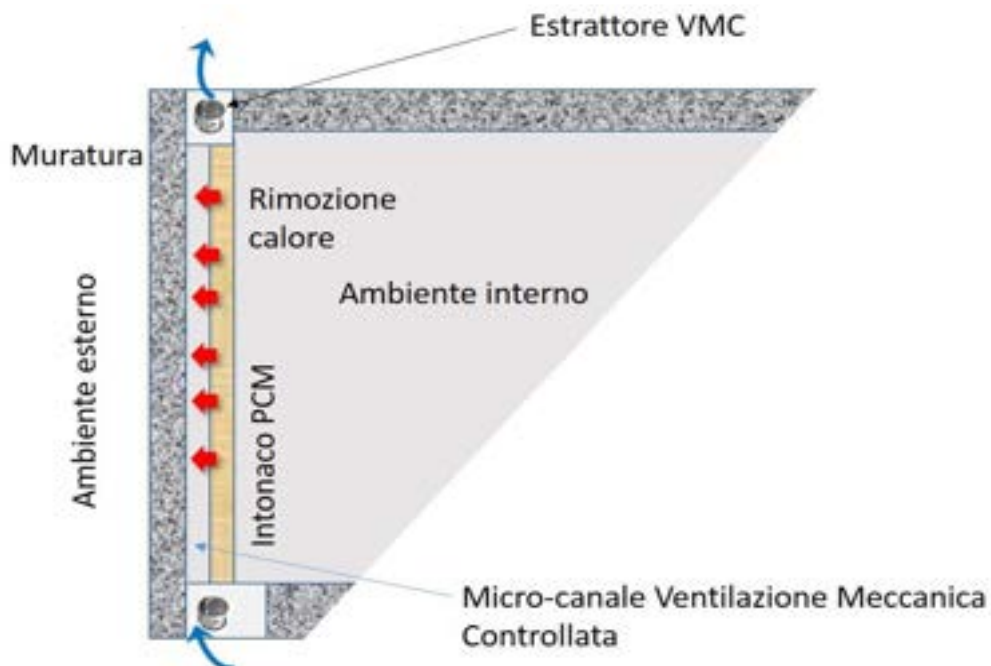


Figura 24 - Ventilazione meccanica controllata notturna in micro-canale aeraulico in parete.

- c) ricorso a micro-tubazioni (serpentine), inserite all'interno dello stesso strato PCM, all'interno delle quali scorre acqua o soluzione di acqua/glicole, al fine di raffreddare e quindi riportare in fase solida, il materiale a cambiamento di fase (Figura 25).

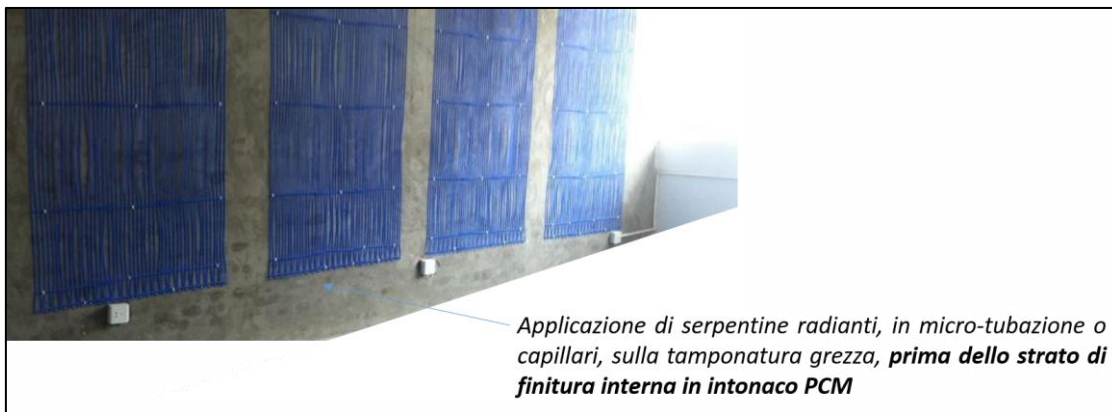


Figura 25 - Scarico di PCM medianete serpentine idroniche a parete.

Le tre soluzioni (ventilazione VMC ambientale, ventilazione VMC in micro-canali, distribuzione idronica in strato PCM) sono di particolare interesse scientifico. In particolare, la soluzione c), ovvero scarico del PCM mediante serpentine all'interno del materiale (tipologia di serpentina raffigurata in Figura 25), consente l'abbinamento a molteplici soluzioni energetiche da fonte rinnovabile, utilizzate in modalità passiva, tra le quali:

- utilizzo notturno di "water pond" in cui l'acqua si raffredda per irraggiamento notturno con la volta celeste e l'ambiente circostante (Figura 26);
- pompe di calore geotermiche utilizzate in modalità passiva (esclusivo pompaggio dell'acqua dalle sonde, con opportuni scambiatori di calore per raffreddare il fluido secondario che fluisce nei pannelli radianti a parete (Figura 27)).

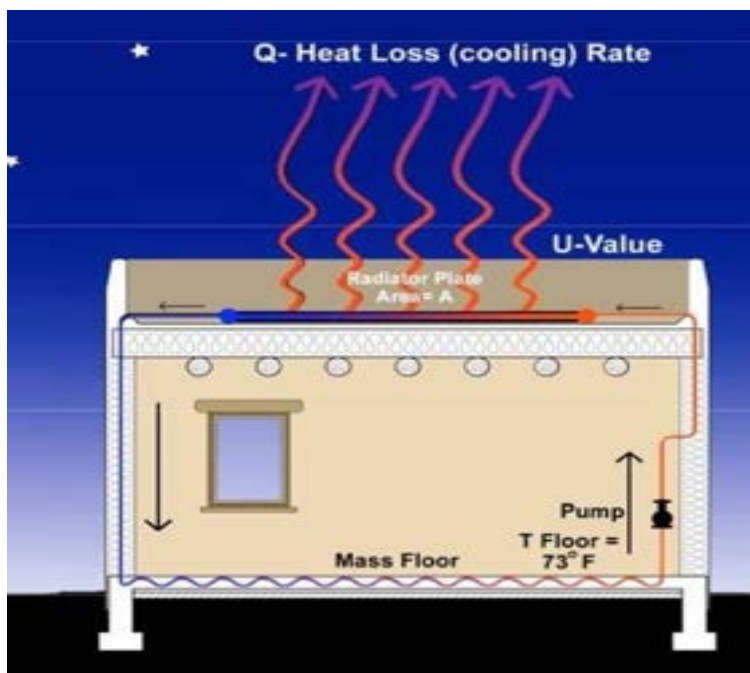


Figura 26 - Water pond per raffreddamento notturno di involucro edilizio. Immagine tratta da <https://betterarchitecture.files.wordpress.com/2013/02/principles.jpg>.

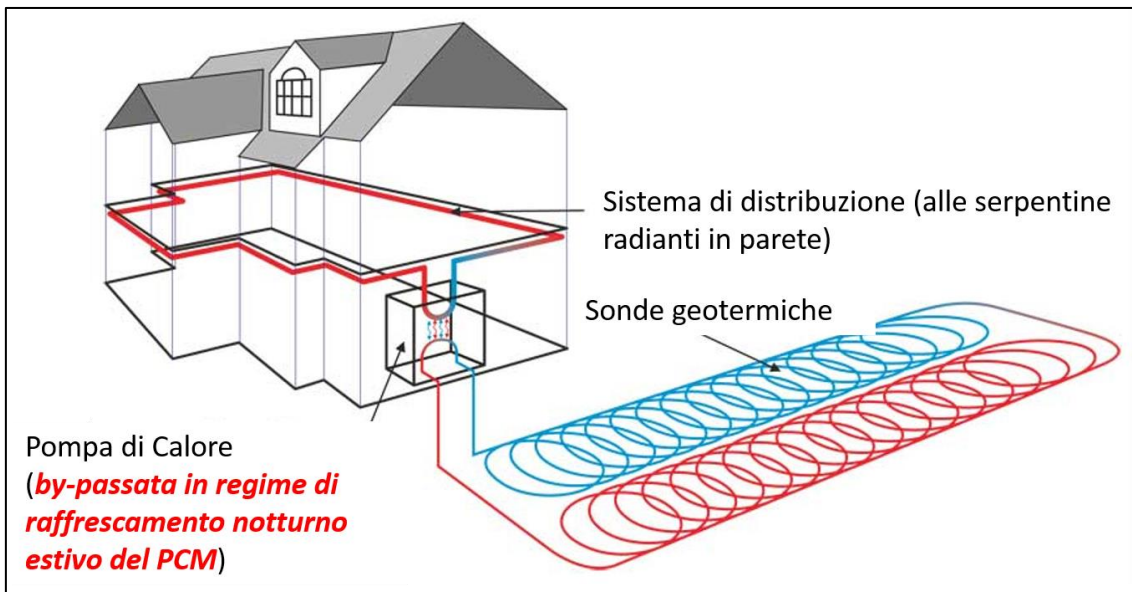


Figura 27 - Sonde geometriche abbinata a pompe di calore del tipo acqua-acqua, utilizzate in modalità passiva e quindi senza funzionamento del compressore ma solo dei sistemi di circolazione.

Infine, un'ultima soluzione, ancora volta a migliorare la prestazione dell'involucro edilizio, favorendo il raffreddamento passivo, è l'adozione di sistemi a cambiamento di fase in controsoffitti, con ventilazione a tutto ricircolo (nelle ore diurne) al fine di provvedere ad un raffreddamento del flusso d'aria mediante asportazione del calore, a temperatura costante, di uno scambiatore a cambiamento di fase. In regime notturno, l'apertura delle griglie di ventilazione consente la solidificazione, e quindi la scarica, del mezzo. La soluzione è rappresentata in Figura 28.

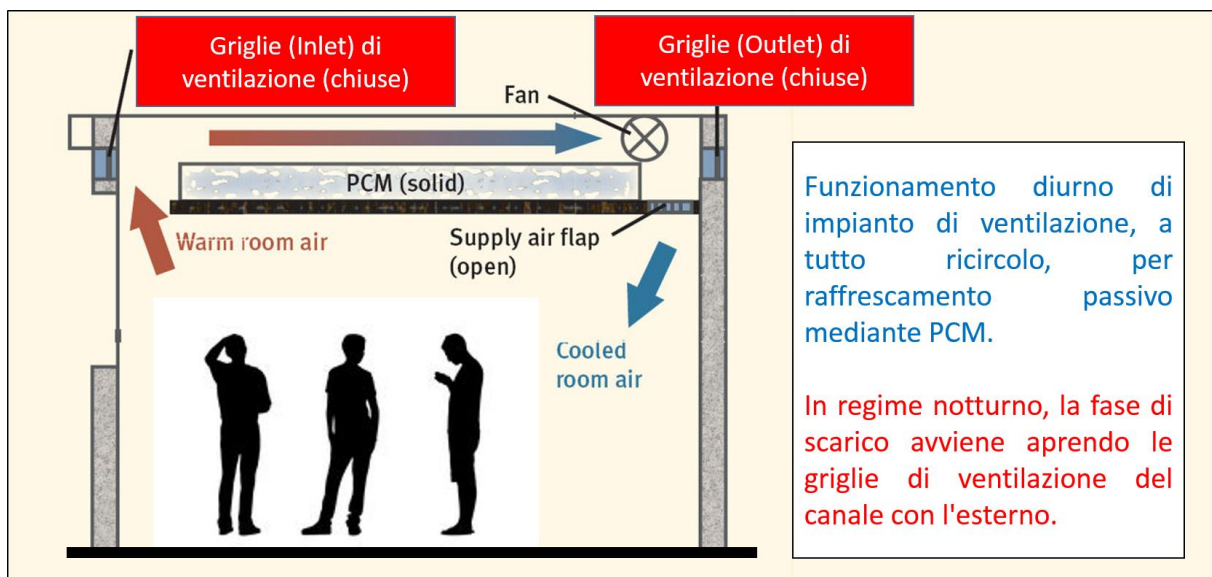


Figura 28 - Sistema di solidificazione di PCM mediante flusso d'aria a tutto ricircolo.

4.4 Conclusioni della Fase B

Alla luce di quanto visto, risulta chiaro che le schiume metalliche offrono un potenziale notevole in termini di incremento delle prestazioni dei sistemi di accumulo con PCM. Queste, infatti, ne determinano un aumento della conducibilità termica, anche di due ordini di grandezza, e consentono di incrementare l'aliquota di calore accumulato/rilasciato durante ogni ciclo. Dalla trattazione, è emerso che tali prestazioni migliorano man mano che la porosità della schiuma diminuisce, in virtù della presenza di una maggior quantità di materiale ad elevata conducibilità. Inoltre, tra i vari tipi di metalli, quello più promettente risulta essere il rame, in quanto caratterizzato da un'elevata conducibilità termica, nell'ordine dei 400 W/m/K. Tuttavia, questo presenta un'azione corrosiva più spinta rispetto ad altri metalli, come nickel. Uno dei limiti delle schiume, forse il principale, risiede nell'elevato costo.

Come rilancio dell'uso dei materiali a cambiamento di fase in soluzioni di involucro edilizio, interessate da importanti studi scientifici negli anni scorsi ma poi, per ragioni tecnico-economiche accantonate dalla comunità nazionale ed internazionale coinvolta nella ricerca di soluzioni per il raffrescamento ambientale a basso impatto, risulta, ad avviso degli autori, necessaria un'integrazione di tali tecnologie con sistemi da fonte rinnovabile passiva, aerotermica e/o geotermica, al fine di migliorare:

- ✓ lo scambio termico e quindi l'efficacia nella rimozione del calore latente durante la fase di scarica;
- ✓ la convenienza economica, essendo sì richiesta un'ulteriore spesa energetica, seppur minima, dovuta alla movimentazione dei fluidi, ma tale da migliorare e garantire i corretti cicli di fusione (accumulo termico) e solidificazione (scarica) dei materiali. Ciò è necessario come forma di controllo del processo, e quindi completo sfruttamento della transizione di fase.

5 Riferimenti bibliografici

- [1] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009), pp. 318–345.
- [2] P. Zhang, X. Xiao, Z.W. Ma. A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement. *Applied Energy*, 165 (2016), pp. 472–510.
- [3] M. Rady. Granular phase change materials for thermal energy storage: experiments and numerical simulations. *Applied Thermal Engineering*, 29 (2009), pp. 3149–3159.
- [4] S. Jegadheeswaran, S.D. Pohekar. Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009), pp. 2225–2244.
- [5] R. Velraj, R.V. Seeniraj, B. Hafner, C. Faber, K. Schwarzer. Experimental analysis and numerical modeling of inward solidification on a finned vertical tube for a latent heat storage unit. *Solar Energy*, 60 (1997), pp. 281–90.
- [6] A. Castell, C. Sole, M. Medrano, J. Roca, L.F. Cabeza, D. Garcia. Natural convection heat transfer coefficients in phase change material (PCM) modules with external vertical fins. *Applied Thermal Engineering*, 28 (2008), pp. 1676–86.
- [7] M. Lacroix. Study of the heat transfer behavior of a latent heat thermal energy storage unit with a finned tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36 (1993), pp. 2083–92.
- [8] P. Lamberg, R. Lehtiniemi, A.M. Henell. Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 43 (2004), pp. 277–87.
- [9] U. Stritih. An experimental study of enhanced heat transfer in rectangular PCM storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 (2004), pp. 2841–7.
- [10] Y. Zhang, Z. Chen, Q. Wang, Q. Wu. Melting in an enclosure with discrete heating at a constant rate. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 6 (1993), pp. 196–201.
- [11] Y. Jellouli, R. Chouikh, A. Guizani, A. Belghith. Numerical study of the moving boundary problem during melting process in a rectangular cavity heated from below. *American Journal of Applied Sciences*, 4 (2007), pp. 251–6.
- [12] H. Ettouney, H. El-Dessouky, A. Al-Ali. Heat transfer during phase change of paraffin wax stored in spherical shells. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 127 (2005), pp. 357–65.
- [13] H. Ettouney, H. El-Dessouky, E. Al-Kandari. Heat transfer characteristics during melting and solidification of phase change energy storage process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43 (2004), pp. 5350–7.
- [14] M. Lacroix, M. Benmadda. Numerical simulation of natural convection-dominated melting and solidification from a finned vertical wall. *Numerical Heat Transfer Part A*, 31 (1997), pp. 71–86.
- [15] M. Lacroix, M. Benmadda. Numerical simulation of natural convection-dominated melting and solidification from a finned vertical wall. *Numerical Heat Transfer Part A*, 31 (1997), pp. 71–86.
- [16] J. Wang, G. Chen, H. Jiang. Theoretical study on a novel phase change process. *International Journal of Energy Research*, 23 (1999), pp. 287–94.
- [17] M.M. Farid, A. Kanzawa. Thermal performance of a heat storage module using PCM's with different melting temperatures: mathematical modeling. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 111 (1989), pp. 152–7.
- [18] H. Michels, R. Pitz-Paal. Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants. *Solar Energy*, 81 (2007), pp. 829–37.
- [19] J. Wang, Y. Ouyang, G. Chen. Experimental study on charging processes of a cylindrical heat storage capsule employing multiple-phase-change materials. *International Journal of Energy Research*, 25

(2001), pp. 439–47.

- [20] M. Fang, G. Chen. Effects of different multiple PCMs on the performance of a latent thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*, 27 (2007), pp. 994–1000.
- [21] R.V. Seeniraj, R. Velraj, N.L. Narasimhan. Thermal analysis of a finned-tube LHTS module for a solar dynamic power system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38 (2002), pp. 409–17.
- [22] M.N.A. Hawlader, M.S. Uddin, M.M. Khin. Microencapsulated PCM thermal energy storage system. *Applied Energy*, 74 (2003), pp. 195–202.
- [23] Y. Özonur, M. Mazman, H.Ö. Paksoy, H. Evliya, Microencapsulation of coco fatty acid mixture for thermal energy storage with phase change material. *International Journal of Energy Research*, 30 (2006), pp. 741–749.
- [24] L. Sánchez-Silva, J.F. Rodríguez, A. Romero, A.M. Borreguero, M. Carmona, P. Sánchez, Microencapsulation of PCMs with a styrene-methyl methacrylate 154 Y. *Energy and Buildings*, 106 (2015), pp. 134–155.
- [25] X. Qiu, G. Song, X. Chu, X. Li, G. Tang, Microencapsulated n-alkane with p(n-butyl methacrylate-co-methacrylic acid) shell as phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy*, 91 (2013), pp. 212–220.
- [26] A. Jamekhorshid, S. Sadrameli, M. Farid, A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 31 (2014), pp. 531–542.
- [27] E. Onder, N. Sarier, E. Cimen, Encapsulation of phase change materials by complex coacervation to improve thermal performances of woven fabrics. *Thermochimica Acta*, 467 (2008), pp. 63–72.
- [28] J. Giro-Paloma, Y. Konuklu, A.I. Fernández, Preparation and exhaustive characterization of paraffin or palmitic acid microcapsules as novel phase change material. *Solar Energy*, 112 (2015), pp. 300–309.
- [29] S. Alay, C. Alkan, F. Göde, Synthesis and characterization of poly (methyl methacrylate)/n-hexadecane microcapsules using different cross-linkers and their application to some fabrics. *Thermochimica Acta*, 518 (2011), pp. 1–8.
- [30] S. Benita (Ed.), *Microencapsulation: Methods and Industrial Applications*, CRC Press, Taylor & Francis: Boca Raton, FL, USA, 2005.
- [31] Y. Konuklu, M. Ostry, H. O. Paksoy, P. Charvat. Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications. *Energy and Buildings*, 106 (2015), pp. 134–155.
- [32] H. Mehling, S. Hiebler, F. Ziegler. Latent heat storage using a PCM-graphite composite material. In: *Proceedings of 8th international conference on thermal energy storage; 2000*.
- [33] D. Hailot, X. Py, V. Goetz, M. Benabdelkarim. Storage composites for the optimization of solar water heating systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 86 (2008), pp. 612–7.
- [34] L.F. Cabeza, M. Ibanez, C. Sole, J. Roca, M. Nogues. Experimentation with water tank including a PCM module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90 (2006), pp. 1273–82.
- [35] A. Elgafy, K. Lafdi. Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials. *Carbon*, 43 (2005), pp. 3067–74.
- [36] K. Tumirah, M.Z. Hussein, Z. Zulkarnain, R. Rafeadah Nano-encapsulated organic phase change material based on copolymer nanocomposites for thermal energy storage. *Energy*, 66 (2014), pp. 881–890.
- [37] Q.I. Zhang, H. Wang, Z. Ling, X. Fang, Z. Zhang RT100/expand graphite composite phase change material with excellent structure stability, photo-thermal performance and good thermal reliability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 140 (2015), pp. 158–1.
- [38] A. Sari. Thermal reliability test of some fatty acids as PCMs used for solar thermal latent heat storage applications. *Energy Conversion Management*, 44 (2003), pp. 2277–2287.
- [39] N. Sahan, M. Fois, H. Paksoy. Improving thermal conductivity phase change materials-A study of paraffin nanomagnetite composites. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 137 (2015), pp. 61–67.

- [40] S. Jesumathy, M. Udayakumar, S. Suresh. Experimental study of enhanced heat transfer by addition of CuO nanoparticle. *Heat and Mass Transfer*, 48 (2012), pp. 965–978.
- [41] S. C. Lin, H. H. Al-Kayiem. Evaluation of copper nanoparticles – Paraffin wax compositions for solar thermal energy storage. *Solar Energy*, 132 (2016), pp. 267–278.
- [42] R. Velraj, R. V. Seeniraj, B. Hafner, C. Faber, K. Schwarzer. Heat transfer enhancement in a latent heat storage system. *Solar Energy* (65) 1999, pp. 171–180.
- [43] H. Ettouney, I. Alatiqi, M. Al-Sahali, S. A. Al-Ali. Heat transfer enhancement by metal screens and metal spheres in phase change energy storage systems. *Renewable Energy*, 29 (2004), pp. 841–860.
- [44] H. Ettouney, I. Alatiqi, M. Al-Sahali, K. Al-Hajirie. Heat transfer enhancement in energy storage in spherical capsules filled with paraffin wax and beads. *Energy Conversion and Management*, 47 (2006), pp. 211–228.
- [45] J. Fugai, M. Kanou, Y. Kodama, O. Miyatake. Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers. *Energy Conversion and Management*, 41 (2000), pp. 1543–1556.
- [46] I. Dincer, M. A. Rosen. *Thermal Energy Storage: systems and applications*. John Wiley & Sons, 2002.
- [47] L. Klimes, P. Charvat, M. Ostry. Challenges in the computer modeling of phase change materials. *Materials and Technologies*, 46 (2012), pp. 335–338.
- [48] D. Zhao, G. Tan. Numerical analysis of a shell-and-tube latent heat storage unit with fins for air-conditioning application. *Applied Energy*, 138 (2015), pp. 381–392.
- [49] V.R. Voller. Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems. *Numerical Heat Transfer Part B*, 17 (1990) pp. 155–169.
- [50] M. Ezra, Y. Kozak, V. Dubovsky, G. Ziskind. Analysis and optimization of melting temperature span for a multiple-PCM latent heat thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*, 93 (2016), pp. 315–329.
- [51] E. Franquet, S. Gibout, P. Tittleinc, L. Zalewski, J.P. Dumas. Experimental and theoretical analysis of a cement mortar containing microencapsulated PCM. *Applied Thermal Engineering*, 73 (2014), pp. 32–40.
- [52] S. Feng, M. Shi, Y. Li, T. J. Lu. Pore-scale and volume-averaged numerical simulations of melting phase change heat transfer in finned metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90 (2015), pp. 838–847.
- [53] W. Q. Li, Z. G. Qu, Y. L. He, W. Q. Tao. Experimental and numerical studies on melting phase change heat transfer in open-cell metallic foams filled with paraffin. *Applied Thermal Engineering*, 37 (2012), pp. 1–9.
- [54] Y. Tian, C. Y. Zhao. A numerical investigation of heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous metals. *Energy*, 36 (2011), pp. 5539–5546.
- [55] X. Xiao, P. Zhang, M. Li. Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 81 (2014), pp. 94–105.
- [56] S. Mancin, A. Diani, L. Doretto, K. Hooman, L. Rossetto. Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams. *International Journal of Thermal Sciences*, 90 (2015), pp. 79–89.
- [57] R. J. Duffin, G. A. Knowles. Passive wall design to minimize building temperature swing. *Solar Energy*, 33 (1984), pp. 337–342.
- [58] M. Koschenz, B. Lehmann. Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energy and Buildings*, 36 (2004), pp. 567–578.
- [59] W. Xiao, X. Wang, Y. Zhang. Analytical optimization of interior PCM for energy storage in a lightweight passive solar room. *Applied Energy*, 86 (2009), pp. 2013–2018.
- [60] A. Oliver. Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: thermal energy storage in buildings through latent heat. *Energy and Buildings*, 48 (2012), pp. 1–7.

- [61] F. Kuznik, J. Virgone, J. Noel. Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Applied Energy*, 86 (2009) pp. 2038–2046.
- [62] L. F. Cabeza, C. Castellon, M. Nogues, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillag. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, 39 (2007), pp. 113–119.
- [63] P. Arce, C. Castellon, A. Castell, L. F. Cabeza. Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings. *Energy and Buildings*, 44 (2012), pp. 88–93.
- [64] J. Kosny, E. Kossecka, A. Brzezinski, A. Tleoubaev, D. Yarbrough. Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs). *Energy and Buildings*, 52 (2012), pp. 122–131.
- [65] G. Evola, L. Marletta, F. Sicurella. A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. *Building and Environment*, 59 (2013), pp. 517–527.
- [66] C. K. Halford, R. F. Boehm. Modeling of phase change material peak load shifting. *Energy and Buildings*, 39 (2007), pp. 298–305.
- [67] F. Ascione, L. Bellia, A. Capozzoli. A coupled numerical approach on museum air conditioning: Energy and fluid-dynamic analysis. *Applied Energy*, 103 (2013), pp. 416–427.
- [68] Z. Zhai, Q. Chen. Solution characters of iterative coupling between energy simulation and CFD programs. *Energy and Buildings*, 35 (2003), pp. 493–505.
- [69] Z. Zhai, Q. Chen, P. Haves, J. H. Klems. On approaches to couple energy simulation and computational fluid dynamics programs. *Building and Environment*, 37 (2002) pp. 857–864.
- [70] Z. J. Zhai, Q. Chen, Performance of coupled building energy and CFD simulations. *Energy and Buildings*, 37 (2005), pp. 333–344.
- [71] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallè, D. Quenard. Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material. *Energy and Buildings*, 38 (2006), pp. 357–366.
- [72] L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui. Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter. *Energy and Buildings*, 38 (2006), pp. 18–24.
- [73] A. Pasupathy, R. Velraj. Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management. *Energy and Buildings*, 40 (2008), pp. 193–203.
- [74] F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, F. de Rossi, G. P. Vanoli. Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season. *Applied Energy*, 113 (2014), pp. 990–1007.
- [75] R. Barzin, J. J. J. Chen, B. R. Young, M. M. Farid. Application of PCM energy storage in combination with night ventilation for space cooling. *Applied Energy*, 158 (2015), pp. 412–421.
- [76] A. Faheem, G. Ranzi, F. Fiorito, C. Lei. A numerical study on the thermal performance of night ventilated hollow core slabs cast with micro-encapsulated PCM concrete. *Energy and Buildings*, 127 (2016), pp. 892–906.
- [77] E. Solgi, R. Fayaz, B. M. Kari. Cooling load reduction in office buildings of hot-arid climate, combining phase change materials and night purge ventilation. *Renewable Energy*, 85 (2016), pp. 725–731.
- [78] M. Jaworski. Thermal performance of building element containing phase change material (PCM) integrated with ventilation system: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 70 (2014) pp. 665–674.
- [79] S. Kamali. Review of free cooling system using phase change material for building. *Energy and Buildings*, 80 (2014), pp. 131–136.
- [80] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, D. Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009), pp. 318–345.
- [81] A. Waqas, Z. Ud Din. Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18 (2013), pp. 607–625.

- [82] Castell A, Sole C, Medrano M, Roca J, Cabeza LF, Garcia D. Natural convention heat transfer coefficients in phase change material (PCM) modules with external vertical fins. *Appl Therm Eng* 2008;28:1676–86.
- [83] Ettouney H, Alatiqi I, Al-Sahali M, Al-Hajirie K. Heat transfer enhancement in energy storage in spherical capsules filled with paraffin wax and beads. *Energy Convers Manage* 2006;47:211–28.

Curricula del gruppo di lavoro

RESPONSABILE SCIENTIFICO

Nicola Bianco è Professore Associato di Fisica Tecnica Industriale (SSD ING-IND/10) presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, presso la quale si è laureato in Ingegneria Meccanica, con lode. Precedentemente, presso il medesimo Ateneo ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei sistemi termo-meccanici ed ha svolto servizio come Ricercatore universitario a tempo indeterminato. E' coordinatore del corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica per l'Energia e l'Ambiente.

E' stato Responsabile Scientifico o componente del gruppo di lavoro nell'ambito di convenzioni di Ricerca Scientifica con l'ENEA, il Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, la Regione Campania, il Ministero della Giustizia.

Relativamente alle tematiche di ricerca, negli anni scorsi ed attualmente è coinvolto in studi di Trasmissione del Calore (convezione naturale e mista in canali e cavità, conduzione termica in solidi con variabile generazione interna), Energia Solare (progettazione termo-energetica di sistemi solari), Termo-fisica dell'involucro edilizio (sistemi solari passivi e soluzioni di architettura bioclimatica). Svolge la funzione di revisore per riviste internazionali e conferenze internazionali. E' autore di oltre 130 pubblicazioni, pubblicate presso sedi editoriali internazionali e nazionali.

GRUPPO DI LAVORO

Assunta Andreozzi è Professore Associato di Fisica Tecnica Ambientale (SSD ING-IND/11) presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II. Si è laureata in Ingegneria Aerospaziale con voto 110/110 e lode presso la Seconda Università degli Studi di Napoli, presso cui ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in "Scienze e Tecnologie Aerospaziali" e le è stato conferito un assegno per la collaborazione ad attività di ricerca, cofinanziato dal Fondo Sociale Europeo per la Regione Campania sul P.O. "Ricerca, Sviluppo Tecnologico ed Alta Formazione 1994/99" e inquadrato nel progetto di ricerca dal titolo: "Metodologie di ottimizzazione strutturale basato su tecniche avanzate, orientate ad un uso razionale dell'energia" – settore disciplinare I02B.

Ha svolto servizio come Ricercatore universitario a tempo indeterminato presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II dal 2002 al 2011.

Svolge attività di ricerca in Trasmissione del calore, in particolare nella convezione naturale e mista in canali e cavità, scambio termico in mezzi porosi, termofluidodinamica dell'incendio e bio heat transfer. È autore di circa 100 lavori scientifici la maggior parte dei quali pubblicati su riviste internazionali o su atti di congressi internazionali. È stato ed è inserito in progetti di ricerca nazionali finanziati dal Ministero dell'Università e convenzioni di ricerca con enti pubblici e privati.

È stato responsabile scientifico del progetto di Ricerca: "Analisi e progetto termofluidodinamico dei processi di lavorazione continui dei materiali" finanziato dalla Regione Campania.

Fabrizio Ascione è Ricercatore di Fisica Tecnica Ambientale, in servizio presso il Dipartimento di ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico. Ha conseguito, con lode e dignità di stampa, la laurea in Architettura presso la Facoltà di Architettura dello stesso ateneo. Nel Dicembre del 2009 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici. Da Marzo 2010 a Giugno 2012 è stato Assegnista di Ricerca presso l'Università degli Studi del Sannio in Benevento. Ad oggi, svolge attività di ricerca nell'ambito della Tecnica del Controllo Ambientale, con particolare riferimento alle tematiche del "passive and low-energy heating and cooling" per il settore civile.

E' docente in supplenza di insegnamenti afferenti al SSD ING-IND/11. Svolge la funzione di revisore per riviste internazionali. E' autore di circa 80 pubblicazioni, pubblicate presso sedi editoriali internazionali e nazionali.

Marcello Iasiello è titolare di una borsa di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Napoli Federico II. Presso tale ateneo, egli ha conseguito con lode nel Dicembre 2012 la laurea magistrale in Ingegneria Meccanica per l'Energia e l'Ambiente, con una tesi sull'analisi numerica della convezione forzata in schiume metalliche. Tale lavoro di tesi è stato conseguito in parte presso la University of Connecticut, dove egli è stato Visiting Scholar dal Maggio del 2012 ad Agosto del 2012. Sempre presso l'Università di Napoli Federico II, egli ha conseguito nel Maggio del 2016 il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici, con tesi sui fenomeni di trasporto in mezzi porosi come schiume metalliche e sistemi biologici. E' stato vincitore di una borsa di studio nell'ambito del programma STAR (Sostegno Territoriale delle Attività di Ricerca), per svolgere attività di ricerca su fenomeni di trasporto in sistemi biologici dal Marzo del 2014 a Settembre del 2014, presso la University of California, Riverside.

Martina Caliano è una studentessa al terzo anno del corso di Dottorato in Ingegneria Industriale, presso l'Università di Napoli Federico II, presso la quale, nel 2013, ha conseguito con lode, la laurea in Ingegneria Meccanica per l'Energia e l'Ambiente. Da Novembre 2013 a Ottobre 2014 è stata Assegnista di ricerca presso l'Università della Calabria, nell'ambito dell'AR – “CONDIZIONAMENTO INNOVATIVO, MATERIALI DI INVOLUCRO ED USO DEI PCM” del progetto nazionale RES NOVAE. Collabora con il centro ricerche ENEA di Portici dal 2012, nell'ambito delle tematiche di ricerca relative ai sistemi di accumulo dell'energia termica (a calore sensibile e con materiali a cambiamento di fase), a sistemi per l'efficiamento di infrastrutture energetiche e all'ottimizzazione di sistemi di poligenerazione distribuita.