ISSN:2038-2723

CONDIZIONAMENTO
RISCALDAMENTO
REFRIGERAZIONE

AiCARR journal

LA RIVISTA PER I PROFESSIONISTI DEGLI IMPIANTI HVAC&R

ANNO10 - *MARZO-APRILE 2019*

Organo Ufficiale AiCARR

REVISIONE DEL PACCHETTO UNI/TS 11300

NUOVI REFRIGERANTI, QUALI PROSPETTIVE?

STRUTTURE SANITARIE
MONITORAGGIO DEI COSTI MANUTENTIVI

IMPIANTISTICA NEL REPARTO DI PROCREAZIONE MEDICALMENTE ASSISTITA

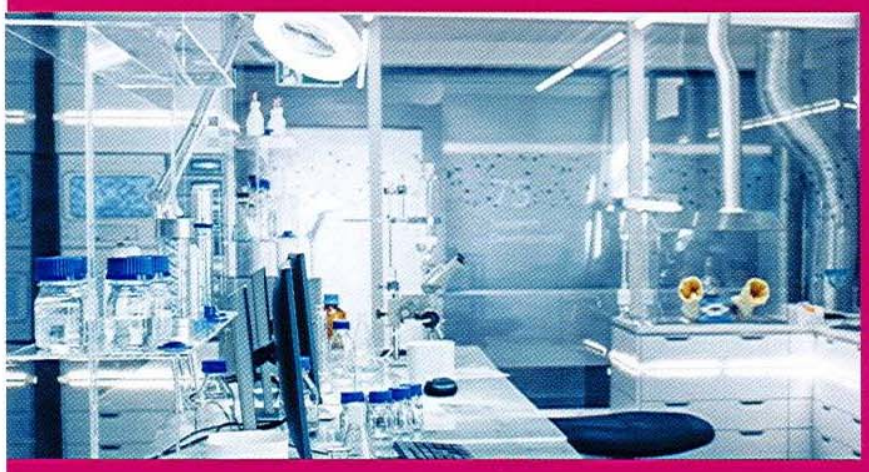
SISTEMA SPERIMENTALE DI REFRIGERAZIONE IN AUTO-CASCATA

CASE STUDY

RIQUALIFICAZIONE E AMPLIAMENTO DI UN OSPEDALE

DIAGNOSI ENERGETICA NEL SETTORE CARTARIO

USO DEI PCM IN EDILIZIA



AiCARR Cultura e Tecnica per Energia Uomo e Ambiente
Quine Business Publisher

EDIFICI PER LA SANITÀ
EFFICIENZA NELL'INDUSTRIA

POSTE ITALIANE SPA – POSTA TARGET MAGAZINE - GIPA/LO/CONV/003/2013

PCM

Utilizzo dei materiali a cambiamento di fase in edilizia

Caratteristiche, tipologie e campi applicativi dei PCM, che rappresentano una delle soluzioni più interessanti per l'isolamento termico degli edifici

*P. Corongiu, M. Papagni, M. Surra**

Da gennaio 2019, con l'inizio dell'era NZEB, l'esigenza di progettare edifici che abbiano elevatissime prestazioni energetiche è diventata sempre più stringente. Un modo particolarmente efficace per aumentare l'inerzia termica dell'involucro edilizio consiste nell'adozione dei materiali a cambiamento di fase, i PCM (dall'inglese Phase Changing Materials), che forniscono soluzioni efficienti sotto il profilo del risparmio energetico e del comfort.

I PCM

I PCM sono materiali in grado di accumulare il calore latente scambiato nel passaggio di fase per poi rilasciarlo, mantenendo costante la propria temperatura in volumi ridotti e con modeste dilatazioni (il cambiamento di fase a pressione costante interviene ad una ben definita temperatura).

In Figura 1 è riportato il confronto tra il comportamento di un accumulo sensibile, liquido o solido, e quello di un accumulo latente. Il materiale scelto come esempio cambia di fase alla temperatura di circa 27 °C.

Partendo dalla temperatura di 20 °C l'energia accumulata cresce con una pendenza legata al calore specifico del materiale. In corrispondenza della temperatura di cambiamento di fase il PCM presenta un grande incremento nella capacità di accumulo di energia termica, la cui entità è data dal calore latente di fusione della sostanza. Al termine del passaggio di fase, l'energia termica fornita fa crescere nuovamente la temperatura del materiale allo stato liquido incrementandone ulteriormente la capacità di accumulo (calore sensibile).

Allo stesso modo, quando il valore della temperatura diminuisce, il materiale solidifica e cede energia (calore latente di solidificazione), riscaldando l'ambiente esterno.

PCM IN EDILIZIA

L'inserimento di un PCM nell'involucro edilizio annulla lo scambio termico tra esterno e ambiente fino al cessare della capacità di accumulo del materiale a cambiamento di fase.

Infatti, la capacità di accumulo di una massa unitaria di PCM è data dalla variazione di entalpia che essa è in grado di assorbire:

$\Delta h = c_p \cdot \Delta t + \lambda$

dove:

c_p = calore specifico del materiale [kJ/kg/K]

Δt = differenza tra la temperatura iniziale del PCM e la temperatura di cambiamento di fase [°C]

λ = calore latente di fusione, caratteristico del materiale [kJ/kg]

Tabella 1 – Valutazione dell'intervallo di tempo corrispondente alla capacità di accumulo del PCM

Ora	$F(\tau)$	Temperatura dell'aria esterna t_e [°C]	Irradianza solare globale sul piano orizzontale $I_{o,s}$ [W/m²]	Temperatura fittizia sole-aria t_{sa} [°C]	Energia termica entrante riferita all'intervallo orario $E = q \cdot 1$ [Wh/m²]	Energia termica immagazzinabile dal PCM Δh [Wh/m²]	Capacità di accumulo in ore [h]
5 a.m.	1,00	20,0	152,2	21,8	45,0	45,0	1
6 a.m.	0,98	20,2	377,3	24,7	117,5	117,5	1
7 a.m.	0,93	20,8	555,7	27,5	187,5	148,2	47'
Totale						310,7	2 h 47'

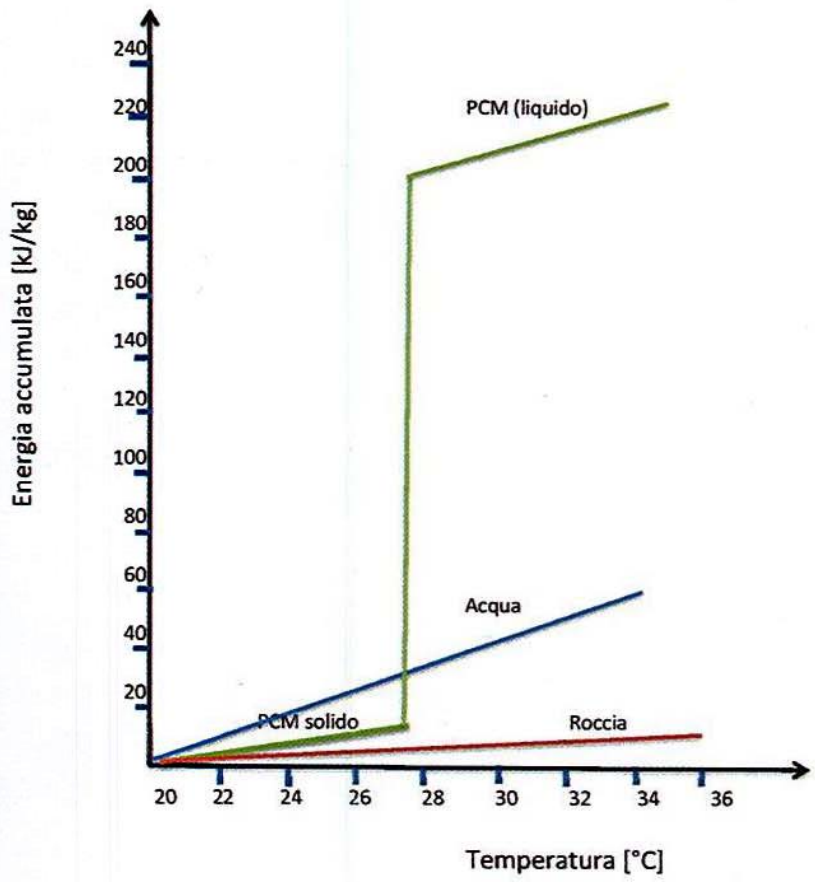


Figura 1 – Confronto della capacità di accumulo al crescere della temperatura fra un accumulo sensibile d'acqua, uno di roccia e uno latente con cambiamento di fase a 27 °C. Da (Lazzarin, 2014)

Si immagini, al fine di ridurre il carico termico trasmesso da una copertura in condizioni estive a Torino, di utilizzare un pannello composto di PCM caratterizzato da:

$t_{PCM} = 29$ °C = temperatura di cambiamento di fase

$c_p = 3{,}14$ kJ/kg/K

$\lambda = 200$ kJ/kg

$\rho_s = 4{,}9$ kg/m² = densità superficiale (spessore pannello 6 mm).

A luglio, mese più caldo dell'anno, la temperatura estiva di progetto è $t_a = 31$ °C con un'escursione giornaliera di $\Delta t_{max} = 11$ °C (UNI, 2016-2) e il valore medio mensile dell'irradianza solare globale sul piano orizzontale, $I_{m,s} = 278$ W/m² (UNI, 2016-1).

In queste condizioni il flusso termico proveniente dall'esterno determina un aumento del valore della temperatura da $t_n = 20$ °C, valore teorico notturno, a $t_{PCM} = 29$ °C corrispondente alla temperatura di fusione.

L'energia immagazzinabile dal PCM è data da:

$\Delta h = 3{,}14 \cdot 9 + 200 = 228{,}3$ kJ/kg $= 6{,}34 \cdot 10^{-2}$ kWh/kg

Si considera una finitura della copertura di colore chiaro cui corrisponde un coefficiente di assorbimento della radiazione solare $a = 0{,}3$ e un coefficiente di resistenza termica superficiale esterna $R_{se} = 0{,}04$ m²K/W (UNI, 2018). In tali condizioni la temperatura sole-aria (temperatura fittizia che tiene conto contemporaneamente sia degli scambi termici conduttivi e convettivi con l'aria esterna che dell'irraggiamento solare ricevuto) vale:

$t_{sa} = I_{o,s} \cdot R_{se} \cdot a + t_e$

dove $I_{o,s}$ = valore massimo orario dell'irradianza solare globale sul piano orizzontale

La temperatura dell'aria esterna t_e è variabile nell'arco diurno secondo la (UNI, 2016-2):

$t_e = t_a - F(\tau) \cdot \Delta t_{max}$

essendo $F(\tau)$ il fattore orario di distribuzione della temperatura.

I valori di irradianza solare globale sul piano orizzontale (UNI, 2016-1) sono considerati con andamento orario a partire dal sorgere del sole.

Il flusso termico entrante è quindi dato da:

$$q = \frac{(t_{sa} - t_n)}{R_{se}} \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

valore che varia come riportato nella Tabella 1, da cui si ricava il tempo massimo corrispondente alla capacità di accumulo:

$$\vartheta = \Delta h \cdot \frac{\rho_s}{q} \; [h]$$

Pertanto, il pannello di PCM scelto per questo esempio, riferito alle più gravose condizioni estive per la località considerata, è in grado di assorbire l'energia termica entrante per quasi 3 ore, periodo che potrà prolungarsi significativamente adottando semplici tecniche costruttive quali ad esempio un tetto ventilato.

È evidente che con una simulazione dinamica si può valutare la quantità di PCM da installare per attenuare l'onda termica in funzione dell'esposizione dell'elemento di involucro edilizio, sfruttando l'escursione termica giornaliera per consentire lo "scarico" del PCM, cioè la cessione della quantità di energia assorbita, che avverrà alla temperatura di solidificazione del materiale. A questo proposito va sottolineato che, a parità di PCM impiegato, le sue prestazioni sono legate alla variazione giornaliera del valore della temperatura esterna, che deve essere tale da consentire la cessione dell'energia termica accumulata: sono quindi favoriti climi con escursioni termiche elevate durante le 24 ore.

Questa condizione non sempre si verifica, per cui occorre in genere individuare una tecnologia impiantistica in grado di favorire la fase di "scarico" del PCM, che può essere costituita da un sistema di ventilazione naturale o ibrido (Surra e Simonetti, 2001) o da un impianto di raffrescamento direttamente a contatto con il PCM, in modo da ottimizzarne il ciclo di funzionamento, di taglia notevolmente inferiore rispetto a sistemi di condizionamento veri e propri.

USE OF PHASE CHANGE MATERIALS (PCM) IN CONSTRUCTION

Phase change materials (acronym PCM) are substances that can accumulate thermal energy during fusion, subtracting it from the environment and then releasing it when the temperature value decreases, during the solidification phase. PCMs can improve the summer performance of buildings with low thermal inertia and can increase winter performance directly when the accumulation of thermal energy during the day reduces the heating load in the night. In addition, PCMs have the function to limit external temperature peaks and to transpose them temporally, with the effect of damping internal temperature fluctuations, reducing the amplitude of the oscillation during the day. The applications in the building field are particularly interesting and can concern both opaque and transparent elements of building envelope. Current technology ensures phase change materials with high durability, conductivity and thermal diffusivity characteristics

Keywords: **PCM, phase change, thermal storage, thermal inertia, latent heat, thermal conductivity, thermal diffusivity**

SISTEMI DI ACCUMULO (Noro, 2016)

Accumulo sensibile

Un accumulo sensibile è costituito da materiale che nei processi di carica e scarica termica non cambia di fase. Si può realizzare con liquidi o con solidi. Nel campo della climatizzazione ambientale la sostanza liquida più utilizzata è l'acqua, eventualmente in miscela con glicole antigelo, in ragione della sua grande disponibilità, non tossicità, basso costo ed elevato calore specifico.

Nel caso di materiali solidi vengono utilizzati rocce, ciottoli, mattoni pieni, cemento o terreno, di solito nella forma di "letto impaccato" che necessita di un fluido (in genere aria) che effettui lo scambio termico utile.

Le problematiche dell'accumulo sensibile sono sostanzialmente legate alla bassa densità energetica consentita (energia accumulabile per unità di volume) e alla temperatura variabile nel corso della carica e della scarica dell'accumulo. In particolare per i liquidi c'è l'esigenza di conservare un adeguato gradiente di temperatura all'interno dell'accumulo.

Accumulo latente

L'accumulo latente è dovuto alla variazione di entalpia associata allo scambio termico legato al passaggio di fase liquido-solido o viceversa di una determinata massa di sostanza.

In passato l'accumulo latente era ottenuto quasi esclusivamente tramite ghiaccio. Recentemente la ricerca ha individuato sostanze che operano il cambiamento di fase nelle condizioni e alle temperature più diverse, consentendo di realizzare accumuli per applicazioni che vanno dalla climatizzazione degli edifici a quelle di potenza.

Un importante requisito della sostanza da utilizzare come accumulo termico è costituito dalla diffusività termica, data dal rapporto tra la sua capacità di condurre e quella di accumulare energia termica, che ne indica la rapidità nel seguire le variazioni di temperatura a fronte di una somministrazione di energia termica:

$$a = \frac{k}{\rho \cdot c_{p,sol}} \quad \left[\frac{m^2}{s}\right]$$

dove:

k = conducibilità termica [W/mK]

ρ = densità [kg/m³]

$c_{p,sol}$ = calore specifico a pressione costante allo stato solido [J/(kgK)]

La diffusività termica è utile per descrivere la propagazione di un campo termico in condizioni non stazionarie per cui non è sufficiente che il materiale sia molto conduttivo, in grado di lasciarsi attraversare facilmente da un flusso termico in presenza di un gradiente di temperatura, ma è necessario che esso sia anche poco massivo e con basso calore specifico. In caso contrario il flusso sarebbe ingente nei primi strati del materiale, ma non riuscirebbe ad attraversare i successivi.

Accumulo termochimico

L'accumulo di calore avviene sotto forma di energia sia termica, come calore sensibile dei reagenti chimici, sia chimica, legata alla variazione di entalpia dovuta alle reazioni di adsorbimento reversibili. La tecnologia è attualmente poco sviluppata, ma si prevede che entro il 2030 possa collocarsi sul mercato come accumulo di calore negli impianti termoelettrici solari e nelle applicazioni di recupero termico industriale ad alta temperatura.

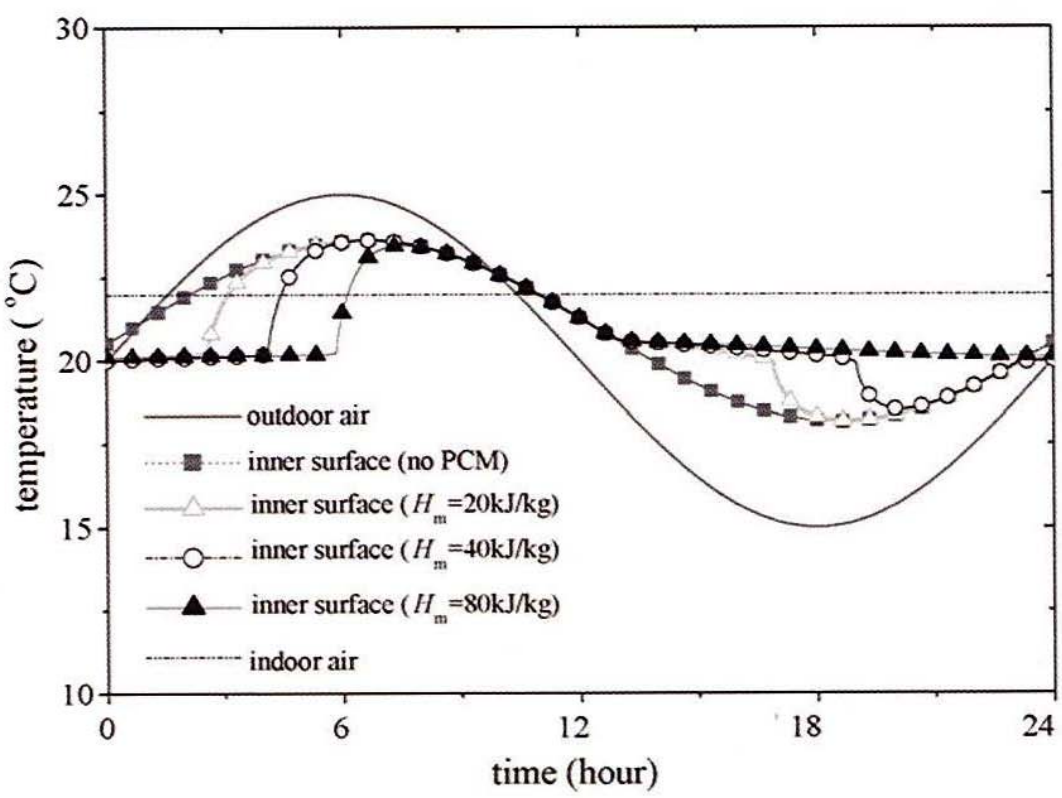


Figura 2 – Temperatura sulla faccia verso l'interno di una parete contenente PCM aventi diversi calori latenti di fusione, indicati in Figura con Hm. Da (Zhang et al., 2008)

TIPOLOGIE

Il materiale a cambiamento di fase può essere costituito da elementi opachi:

- lastre di gesso contenenti PCM in microcapsule (rivestimento di interni e pareti divisorie);
- intonaco caricato con una piccola quantità di microcapsule contenenti PCM (rivestimenti interni);
- pannelli macroincapsulati flessibili con PCM minerale inorganico.

Oppure da elementi trasparenti:

- pannelli trasparenti in lastre di polimetilmetacrilato (PMMA) contenenti microcapsule di PCM;
- elementi trasparenti in vetro a più strati con intercapedini contenenti gas nobili con materiali a cambiamento di fase.

I primi materiali a cambiamento di fase testati in edilizia sono stati gli organici, di cui fanno parte gli acidi grassi e le paraffine. Queste ultime non sono tossiche, corrosive e igroscopiche e sono chimicamente stabili; tuttavia la loro durata in genere non supera i 10 anni, sono tendenzialmente infiammabili, essendo derivati del petrolio, e il loro smaltimento è complesso e costoso.

Oggi i più performanti e sicuri sono i materiali inorganici di ultima generazione, come i sali idrati e gli eutettici. Per quanto riguarda i primi, l'assenza di tossicità, la non infiammabilità e i nuovi involucri in alluminio e polimero li rendono adattabili a molteplici installazioni e abbinabili a diversi sistemi di posa; inoltre, non presentano il problema dell'isteresi e del sottoraffreddamento nei processi di solidificazione.

APPLICAZIONI

La differenza di capacità di accumulo tra i PCM e i classici materiali da costruzione è notevole.

Le possibili applicazioni sono molteplici e vanno opportunamente progettate per le situazioni in essere. Infatti, un'errata valutazione della situazione da affrontare, così come un'installazione di un PCM non preceduta da uno studio adeguatamente approfondito, può determinare un sottoutilizzo o un annullamento delle proprietà del materiale. In generale, ai fini della determinazione della quantità di PCM da installare, occorre conoscere:

- le caratteristiche termofisiche del PCM impiegato;
- i valori di temperatura dell'ambiente interno e di quello esterno;
- i flussi termici da attenuare, ottenuti con simulazioni dinamiche;
- la massa della superficie di scambio termico.

In caso di applicazioni di tipo attivo, per le quali la fase di scarico del PCM viene favorita tramite tecnologie impiantistiche, le soluzioni adottabili possono essere innumerevoli e richiedono una fase progettuale ancora più complessa.

I PCM possono essere utilizzati anche per migliorare le prestazioni estive degli edifici dotati di scarsa inerzia termica e possono incrementarne le prestazioni invernali, in modo diretto, quando

l'accumulo di energia termica durante il giorno consente di ridurre il carico termico per riscaldamento durante la notte.

Inoltre, i PCM hanno la funzione di limitare l'effetto dei picchi di temperatura esterna e traslarli temporalmente, con il risultato di smorzare le fluttuazioni di temperatura interna, riducendone l'ampiezza dell'oscillazione nell'arco della giornata, come si evince dalla Figura 2.

Il beneficio è di tipo energetico, in quanto la riduzione del carico massimo porta a una diminuzione della potenza del condizionatore e alla produzione di energia frigorifera durante le ore caratterizzate da valori di temperatura dell'aria minori, quindi con rendimento EER maggiore.

Da uno studio condotto a Hong Kong (Sun et al., 2013) risulta che la riduzione del carico di picco può variare tra il 10% (strutture massive) e il 57% (edifici leggeri e termicamente isolati) adottando semplici strategie di controllo.

Un altro utilizzo dei PCM è costituito dal loro impiego in accoppiamento con lo sfruttamento della radiazione solare o in associazione a impianti a pannelli radianti, così da accumulare l'energia termica che poi viene immessa in ambiente quando viene interrotto il flusso termico al pannello.

Un'interessante applicazione dei PCM è quella del controllo dei carichi solari diretti mediante il loro inserimento negli elementi trasparenti di involucro (Perino e Serra, 2014). L'impiego di vetrate con PCM integrati consente di aumentarne considerevolmente l'inerzia termica attenuando il flusso di radiazione entrante. Questa tecnologia consente di migliorare, per molte condizioni di funzionamento, il comfort termico interno (riduzione dell'effetto radiante dell'involucro con attenuazione delle condizioni estreme di superficie calda in estate e fredda in inverno) e le prestazioni energetiche della superficie vetrata.

CONCLUSIONI

I materiali a cambiamento di fase costituiscono attualmente una consolidata tecnologia in grado di migliorare le caratteristiche di inerzia termica delle strutture configurandosi come massa "artificiale" in grado di migliorare il comfort ambientale agendo sulla temperatura radiante superficiale dell'involucro edilizio e restituendo l'energia termica, durante la fase di scarico, a temperatura costante.

La riduzione del flusso termico e il suo sfasamento consente inoltre una sensibile riduzione dei carichi termici con consistenti risparmi energetici.

La scelta del materiale e il suo dimensionamento nella particolare applicazione deve essere comunque oggetto di attenta valutazione attraverso adeguati software di simulazione dinamica. ■

* *Paolo Corongiu e Mauro Papagni*, 4e Servizi (e-4e S.r.l.), Morgex (AO)
Marco Surra, libero professionista Rivoli (TO) - Socio AiCARR

CARATTERISTICHE DEI PCM

Un materiale a cambiamento di fase da utilizzare in campo edilizio deve possedere ben determinati requisiti che possono essere riassunti in (Lazzarin et al., 2011):

Caratteristiche termofisiche

- **temperatura di fusione nel campo di interesse delle applicazioni edilizie;**
- **elevato calore latente di fusione per unità di volume e di massa;**
- **elevato calore specifico, per ridurre il volume e la massa del sistema a parità di energia accumulata, o incrementare la capacità di accumulo a parità di ingombri;**
- **ridotto coefficiente di dilatazione termica volumetrica durante la solidificazione, in modo da rendere minima la variazione di volume durante il cambiamento di fase e massimizzare il riempimento del materiale di incapsulamento;**
- **elevata conduttività e diffusività termica, per aumentare la velocità di scambio termico nel PCM;**
- **bassa pressione di vapore alla temperatura di utilizzo, in modo da ridurre il rischio di rottura del materiale di contenimento;**
- **possibilità di un numero elevatissimo di cicli di fusione–solidificazione senza perdita delle caratteristiche.**

Proprietà cinetiche

- **stabilità di cristallizzazione del materiale per un numero elevato di cicli di cambiamento di fase, per mantenere elevata nel tempo l'efficienza di accumulo;**
- **ridotto sottoraffreddamento ed elevato tasso di crescita dei cristalli solidi di materiale, per evitare che il valore della temperatura di passaggio di fase vari, così da garantire la possibilità di scegliere il materiale migliore in relazione all'applicazione.**

Proprietà chimiche

- **stabilità chimica e bassa corrosività al fine di massimizzare la durata del PCM e dei materiali con i quali può venire a contatto;**
- **non pericolosità o atossicità, al fine di minimizzare i rischi di emissioni nocive in caso di fuoriuscita del PCM dal materiale di contenimento per rottura accidentale.**

Caratteristiche ambientali e di sicurezza

- **sicurezza: origine organica o da sali inorganici e non da idrocarburi (paraffine);**
- **possibilità di smaltimento del materiale al termine del ciclo di vita.**

Caratteristiche economiche

- **facile disponibilità in grandi quantità;**
- **basso costo specifico.**

BIBLIOGRAFIA

- Lazzarin R.M. 2014. L'accumulo di energia termica: nuove tecnologie e possibilità applicative. Atti Convegno AICARR "Le nuove sfide della progettazione integrata per il benessere ed il risparmio energetico negli edifici", Padova, 5 giugno.
- Lazzarin R.M., Noro M., Busato F. 2011. Studio di sistemi di accumulo a cambiamento di fase nel solar cooling. ENEA: Report Ricerca di Sistema Elettrico" Report RdS/2011/256, settembre.
- Noro. M. 2016. Potenzialità e limiti dell'utilizzo dei PCM (Phase Change Materials) nello stoccaggio termico. Atti Convegno AICARR, Padova, 9 giugno.
- Perino M., Serra V. 2014. L'innovazione nell'involucro edilizio: dal concetto di "isolamento" a quello di "integrazione e multifunzionalità". Atti Convegno AICARR, Padova, 5 giugno.
- Sun Y., Wang S., Xiao F., Gao D. 2013. Peak load shifting control using different cold thermal energy storage facilities in commercial buildings: A review. Energy Conversion and Management, 71, 101-114.
- Surra M., Simonetti M. 2001. Integrazione dei sistemi di ventilazione ibrida negli edifici. Atti Convegno AICARR, Bologna, 18 ottobre.
- UNI, 2016a. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata. Norma UNI 10349-1. Milano: Ente Italiano di Unificazione.
- UNI, 2016b. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 2: Dati di progetto. Norma UNI 10349-2. Milano: Ente Italiano di Unificazione.
- UNI. 2018. Componenti ed elementi per l'edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodi di calcolo. Norma UNI EN ISO 6946. Milano: Ente Italiano di Unificazione.
- Zhang Y., Lin K., Jiang Y, Zhou G., 2008. Thermal storage and nonlinear heat-transfer characteristics of PCM wallboard. Energy and Buildings 40(9),1771–1779.