

# ADAPTIVE RESILIENT ENVELOPES

Innovazione e sperimentazione  
negli involucri cromogenici e a cambiamento di fase

*Innovation and experimentation  
in chromogenic and phase change envelopes*

INDICE | INDEX

**Introduction** 11  
*Fabrizio Tucci, Valeria Cecafosso, Gaia Turchetti*

## PARTE I - INVOLUCRI A CAMBIAMENTO DI FASE

*Fabrizio Tucci, Valeria Cecafosso*

<b>1 Phase Change Materials: caratteri, proprietà, tipologie</b>	<b>19</b>
1.1 Considerazioni di inquadramento	19
1.2 Caratteristiche e proprietà dei PCM	21
1.2.1 Accumulo di energia termica	21
1.2.2 Caratteristiche dei PCM	23
1.2.3 Requisiti e proprietà dei PCM	24
1.3 Classificazione dei PCM	27
1.3.1 PCM organici	27
1.3.2 PCM inorganici	35
1.3.3 PCM Eutettici	37
<b>2 Phase Change Materials: prestazioni e applicabilità negli edifici</b>	<b>41</b>
2.1 Prestazioni dei PCM e potenzialità di miglioramento per l'architettura	41
2.1.1 Problemi tipici dei materiali e possibili soluzioni	41
2.1.2 Separazione di fase	41
2.1.3 Sotto raffreddamento	42
2.1.4 Incapsulamento	43
2.1.5 Metodi per incrementare la conducibilità termica dei PCM	48
2.2 Applicazione e applicabilità dei PCM negli edifici	51
2.2.1 Approccio per l'integrazione dei PCM negli involucri edilizi	51
2.2.2 Involucri verticali opachi e componenti opachi	52
2.2.3 Involucri verticali trasparenti e componenti traslucidi	56
2.2.4 Involucri orizzontali e componenti per soffitti, controsoffitti e pavimenti	58
2.2.5 Sistemi tecnologici integrati di climatizzazione attiva-passiva	60
2.2.6 Altre applicazioni dei PCM	62

**PARTE I I - INVOLUCRI CROMOGENICI***Fabrizio Tucci, Gaia Turchetti*

<b>3. Involucri Cromogenici Termocromici</b>	<b>71</b>
3.1 Considerazioni di inquadramento	71
3.2 Caratteristiche e proprietà dei vetri termocromici	73
3.2.1 Classificazione generale dei principali sistemi termocromici	73
3.2.2 Analisi della composizione e principi di funzionamento dei vetri termocromici	76
3.2.3 Le proprietà ottiche dei vetri termocromici	78
3.2.4 Le proprietà termiche dei vetri termocromici	80
3.2.5 Procedure di sperimentazione e ricerca sui vetri termocromici	82
3.2.6 Confronto con altri dispositivi cromogenici e con altri materiali trasparenti innovativi	96
3.3 Tipologie di vetro termocromico	99
3.3.1 Quadro generale	99
3.3.2 Dispositivo a base di ossidi metallici (nickel) inserito in U-glass	100
3.3.3 Dispositivo a base di ossidi metallici (nickel) inserito in U-glass colorato	102
3.3.4 Dispositivo a base di ossidi metallici (nickel) inserito in triplo vetrocamera	104
3.3.5 Dispositivo a base di ossidi metallici (VO <sub>2</sub> ) inserito in vetrocamera	106
3.3.6 Dispositivo con sistema a particelle fisse inserito in vetrocamera	110
3.3.7 Dispositivo con sistema a particelle fisse inserito in U-glass	112
3.3.8 Dispositivo con sistema a separazione di fase (Hydrogel)	114
3.3.9 Dispositivo termocromico termoriflettente	116
3.4 Applicazione e applicabilità dei termocromici negli edifici	119
3.4.1 Aspetti caratterizzanti il comportamento termocromico	119
3.4.2 Applicabilità del componente termocromico secondo l'orientamento e la posizione	120
3.4.3 Applicabilità del componente termocromico secondo la possibilità di uso nei diversi spazi	122
3.4.4 Applicabilità del componente termocromico secondo la tipologia del fattore forma	124
3.4.5 Applicabilità del componente termocromico secondo la posizione e funzione nell'edificio	126
<b>4. Involucri Cromogenici Elettrocromici</b>	<b>129</b>
4.1. Considerazioni di inquadramento	129
4.2. Caratteristiche e proprietà dei vetri elettrocromici	131
4.2.1 Caratteristiche fisiche e chimiche	131
4.2.2 Analisi della composizione e del principio di funzionamento	131
4.2.3 Caratteristiche tecniche dei dispositivi elettrocromici	132
4.2.4 Comportamento termico: individuazione e analisi delle principali proprietà termiche	135
4.2.5 Comportamento luminoso: individuazione e analisi delle principali proprietà ottiche	140
4.2.6 Analisi dei requisiti dei dispositivi elettrocromici	140
4.2.7 Comparazione tra i vetri elettrocromici e i vetri basso emissivi	141
4.2.8 Comparazione tra i vetri elettrocromici e i vetri a cristalli liquidi	141

4.3	Tipologie di vetro elettrocromico	143
4.3.1	Classificazione dei vetri elettrocromici secondo la composizione chimica e la stratificazione dei componenti	143
4.3.2	Dispositivi elettrocromici inorganici a cinque strati	144
4.3.3	Dispositivi elettrocromici inorganici a tre strati	146
4.3.4	Classificazione dei vetri elettrocromici secondo la composizione chimica e la colorazione assunta dal vetro	148
4.3.5	Classificazione dei vetri elettrocromici secondo le prestazioni date dall'inserimento di particolari componenti	152
4.3.6	Classificazione dei vetri elettrocromici secondo le prospettive di sviluppo e di ricerca	156
4.4	Applicazione e applicabilità degli elettrocromici negli edifici	160
4.4.1	Applicabilità del componente secondo l'orientamento e la posizione geografica	160
4.4.2	Applicabilità del componente secondo la tipologia architettonica	160
4.4.3	Applicabilità del componente secondo i tipi morfologici e il fattore forma	162
4.4.4	Applicabilità del componente secondo la posizione e la funzione assolta all'interno dell'involucro	164
4.4.5	Vantaggi e svantaggi dei dispositivi elettrocromici	164
<b>5.</b>	<b>Involucri Cromogenici a cristalli liquidi</b>	<b>169</b>
5.1	Considerazioni di inquadramento	169
5.2	Caratteristiche e proprietà	171
5.2.1	Descrizione delle caratteristiche chimiche e fisiche dei cristalli liquidi	171
5.2.2	Descrizione degli aspetti caratterizzanti il comportamento dei cristalli liquidi	180
5.2.3	Montaggio del vetro LC	181
5.2.4	Evoluzione, vantaggi e svantaggi della tecnologia LC	182
5.3	Tipologie di vetro a cristalli liquidi	185
5.3.1.	Dispositivo LC di sicurezza: miglioramento della privacy	186
5.3.2.	Dispositivo LC di sicurezza: miglioramento della resistenza	188
5.3.3.	Dispositivo LC di protezione: miglioramento della riflessione UV	190
5.3.4.	Dispositivo LC display: miglioramento della definizione delle immagini	192
5.3.5.	Dispositivo LC di protezione: miglioramento dell'isolamento acustico	194
5.3.6.	Dispositivo LC di protezione: miglioramento dell'isolamento termico	196
5.3.7.	Dispositivo LC di controllo: miglioramento della resistenza (+ rivestimento selettivo)	198
5.4	Applicazione e applicabilità dei cristalli liquidi negli edifici	201
5.4.1.	Le strategie a seconda del luogo	202
5.4.2.	Applicabilità del componente secondo la possibilità di utilizzo nei diversi spazi architettonici	204
5.4.3.	Applicabilità del componente a seconda della tipologia ed il fattore forma	206
5.4.4.	Applicabilità del componente secondo la posizione e funzione assolte dall'involucro.	208

## PARTE III - SPERIMENTAZIONE CONTEMPORANEA SUGLI INVOLUCRI CROMOGENICI E A CAMBIAMENTO DI FASE

<b>6. La sperimentazione contemporanea sugli involucri a cambiamento di fase</b>	<b>213</b>
<i>Valeria Cecafosso, con Alessia Caruso</i>	
1. Solar house Ebnat-Kappel, Svizzera	214
2. Passivhaus, Chignolo, Italia	218
3. Domat-Ems, Canton Grigioni, Svizzera	224
4. Haus der Gegenwart, Monaco, Germania	228
5. E&B Engelhardt und Bauer, Karlsruhe, Germania	232
6. Città Solare, Friburgo, Germania	236
7. Concil House, Melbourne, Australia	242
8. Eulachoof, Winterthur, Svizzera	248
9. Solarhaus, Washington, Stati Uniti	250
10. Marchè Internation Support Office, Lindau, Svizzera	254
11. Residenza E3, Colognola, Italia	260
12. BASF Research House, Nottingham, Inghilterra	264
13. Green Lighthouse, Copenhagen, Danimarca	268
14. NZi3 Innovation Institute, Christchurch, Nuova Zelanda	272
15. Wilo Nederland, Westzaan, Paesi Bassi	276
16. Crossway, Staplehurst, Inghilterra	278
17. House 2.0, Amsterdam, Paesi Bassi	282
18. SurPLUShome, Washington DC., Stati Uniti	286
19. Home+, Madrid, Spagna	290
20. Luukku House, Madrid, Spagna	294
21. Icon Innovation Center, Daventry, Inghilterra	298
22. Casa Solare, Vens, Italia	302
23. Floating Pavilion, Rijnhaven, Rotterdam, Paesi Bassi	306
24. Facoltà di Ingegneria molecolare e scienze, Seattle, Stati Uniti	310
25. Smart is green, Hamburg, Germania	312
26. Advanced Engineering Building, Brisbane, Australia	316
27. Federal Center south building, Seattle, Stati Uniti	320
28. One Church Square, Westminster, Inghilterra	324
<b>7. La sperimentazione contemporanea sugli involucri cromogenici</b>	<b>327</b>
<i>Fabrizio Tucci, Marco Giampaolletti</i>	
29. Bioshelter Headquarters, S. Francisco, Stati Uniti	329
30. Residence Du Parc, Torino, Italia	332
31. Hox Haus, Royal Holloway University of London, Egham, Inghilterra	334
32. Lanterna del TUM, Monaco di Baviera, Germania	336
33. Ministero del territorio, Infrastrutture, Trasporti e Turismo, Tokyo, Giappone	338
34. Studentato Cinq Rivage Nogata, Tokyo, Giappone	340
35. Padiglione giapponese Expo Internazionale 2005, Seto, Giappone	342
36. Bayerische Vereinsbank, Stoccarda, Germania	344
37. Centro amministrativo, Saint-Germain-el-Laye, Francia	346
38. Biblioteca Comunale, Hino, Giappone	348
39. Educational facility in Keller, Texas, Stati Uniti	349
40. Duca D'Aosta, Brescia, Italia	350

41. Hotel Best Western, Mestre, Italia	352
42. Università di Scienze Applicate, Kufstein, Austria	356
43. Residential Housing KNSM, Amsterdam, Olanda	358
44. Liceo Albert Camus, Frejus, Francia	360
45. Nuovo quartiere a Lipsia, Lipsia, Germania	362
46. Noyori Materials Science Laboratory, Nagoya, Giappone	364
47. Senior Living Facility in Wyoming, Michigan, Stati Uniti	366
48. Simulazione dell'applicazione dei vetri termocromici in 6 edifici tipo	368
49. Sunset Ridge Middle School, Northfield, Stati Uniti	370
50. The Globe of Science & Innovation, CERN, Ginevra, Svizzera	372
51. The East Wintergarden, Londra, Inghilterra	374
52. Civica Cherry Creek, Denver, Stati Uniti	376
53. Kenpinsky Hotel & Resort, Manama , Bahrein	378
54. Sede Centrale Portoghese Microsoft, Lisbona, Portogallo	380
55. Sunderland Royal Hospital, Sunderland, Inghilterra	382
56. Kentish Town Sport Centre, Londra, Inghilterra	384
57. The Grove, Los Gatos, California, Stati Uniti	386
58. Suite di Marketing, Elm Park, Dublino, Irlanda	388
59. Moor house, Londra, Inghilterra	390
60. Hotel Brew House, Royal Tunbridge Wells, Inghilterra	392
61. Ashford Castle, Cong, Irlanda	393
62. Cornerstone II, Cottonwood Heights, Utah, Stati Uniti	394
63. Hospital Paddington, Londra, Inghilterra	396
64. Metropolitan Cafè Kube, Parigi, Francia	398
65. Iata Executive Office, Ginevra, Svizzera	400
66. Hamilton AG, Biel, Svizzera	402
67. Tombola, Sunderland, Inghilterra	404
68. Saint Gobain, Milano, Italia	406
69. Mi-Link, Nivelles, Belgio	408
70. Schneider Electric, Ruel-Malmaison, Francia	409
71. Lactopole, Museum of Milk, Laval, Francia	410
72. Milano Design Week 2012, Milano, Italia	411
73. Chenel Ginza, Tokyo, Giappone	412
74. Nokia Headquarters, Antwerpen, Belgio	414
75. Tokyo Tower, Tokyo, Giappone	415
76. Okunoshima Island Visitor Center, Hiroshima, Giappone	416
77. Dexiah Holding, Bruxelles, Belgio	417
78. Aeroporto Internazionale di Siem Reap-Angkor, Cambogia	418
79. Kitasato University Hospital, Sagami-hara City, Giappone	419
80. Loewe Shop, Madrid, Spagna	420
81. Merriyell Yamate, Nagoya, Giappone	421
82. Comme chez Soi Restaurant, Bruxelles, Belgio	422
83. Volvo Roadshop, Itinerante	423
84. Triodos Bank, Zeist, Olanda	424
85. BT Auditorium and Media Centre, Londra, Inghilterra	425
86. Bombay Sapphire fish tanks, Aeroporto Heathrow Terminal 4, Londra, Inghilterra	426
87. Bertelsmann Expo 2000, Hannover, Olanda	427
88. Brussel center-Luxembourg Train Station, Bruxelles, Belgio	428

# ***Introduction***

A paradigm of our times is lowering the consumption of electric energy produced from conventional sources, a concern tied to limiting greenhouse gas emissions, without forgetting the need to mitigate the effects of climate change as well. Construction – as we know – is one of the sectors responsible for peak levels of consumption of electric energy. In recent years, emissions have risen in this sector to a greater extent than any other, though rates have levelled off in the last decade. But energy consumption by systems of heating, ventilation and air conditioning continues to rise, driven by growth in the demand for thermal comfort, as well as changing lifestyles.

A building's envelope regulates its thermodynamic system. One of the most effective ways of reduce the energy consumption of a building is to optimise its envelope. Experimental research, in which technological-environmental considerations play a leading role, has registered some intriguing advances in past decades in the development of a new adaptive-selective role for building envelopes, the goal being to arrive at an envelope capable of interfacing with its own surrounding environment, so as to formulate, from the resulting interactions, responses suited to the dynamics of the climate factors encountered in a given day or year, thus ensuring optimal quality of living while guaranteeing elevated levels of wellbeing for all users, in terms of temperature, luminosity, air quality and noise, all this with levels of energy consumption that are limited, and actually trending towards negative.

The thermal performance of the envelope is directly proportionate to its mass and to the thickness of the insulation on its outside surface. Overall energy efficiency, on the other hand, is a far more elaborate process. Thermal analysis shows that, if the effects of structural elements, such as thermal bridges, are taken into account, as well as imperfections in the installation of the insulation, air losses and deteriorating materials, then insulation plays a role, but as much as necessary. In buildings with low energy consumption, for that matter, insulation should not be considered the sole method for obtaining the best possible thermal performance from the envelope.

Solutions such as the use of phase change materials and chromogenic technology to control solar radiation can contribute significantly to the energy balance of the entire building.

Phase change materials, or PCM, are one of the devices of thermal control currently used in constructing building envelopes. PCM absorb the heat of solar radiation without a significant temperature increase, subsequently releasing the heat. Thermal storage is equally as important in conserving energy as the development of new energy sources, making a key contribution to the envelope's energy efficiency through significant energy savings, lower power loads in peak hours, the shifting of thermal loads from the building and, at times, improvements in the long-term durability of the system. In addition, it heightens the thermal comfort of the occupants.

As mentioned, phase change materials not only represent an effective method for storing thermal energy, but can also contribute to reducing carbon-dioxide emissions. These thermo-regulating products are capable of providing thermal inertia, which makes it possible to maintain a material at a pre-set temperature for a given period of time, a function of their capacity to release or absorb heat during the transformation of the thermodynamic system.

Ice was one of the first systems for the accumulation of heat. Man has used thermal accumulation to preserve foods, and later, in the food industry, to keep them at low temperatures during transport and storage. For generations, the Nordic peoples made ample use of this principle as a thermal stabiliser for their shelters. Once the properties of materials suited to keeping temperatures low were discovered, materials with higher melting points were studied, with the goal of creating a product capable of releasing the heat stored earlier.

Phase change materials were initially applied in buildings for heating and cooling. In the 40's, Telkes studied a solar-heating system for homes, and in 1948, he included phase change materials in the design of an experimental building constructed in Dover, Massachusetts, using, as his PCM, salt hydrates closed in metal containers connected to solar collectors. The outcome of the experiment was not positive, as the metal containers could withstand the corrosive action of the salts for only a limited period of time, revealing that the materials were incompatible.

PCM, therefore, are materials that have been well known for years, and are currently being studied and developed for application in numerous sectors, including eco-sustainable architecture and energy savings. Experimental use has produced positive results with panels of drywall or wood (cold ceilings), plaster, glass or plexiglas façade systems, systems of passive heating and cooling, accumulation (cold/heat storage), solar collectors and heat exchangers.

And yet they are still not used on a wide scale, due to reasons that range from a lack of economic convenience to shortcomings in technological reliability, especially in the long term. In any event, finding ways to preserve energy, and then reconvert it, is a major challenge, as the ability to store energy not only reduces the distance between supply and demand, but also improves the performance and reliability of energy systems, playing an important role in conserving energy.

This work sets out to illustrate the latest advances made with these materials, which are viewed as having enormous potential, though to date it has largely been left unexplored, meaning that prospects for growth are considerable. In fact, scientists, researchers and even the business world are focussing no small amount of attention on their current development, in light of the opportunities likely to present themselves.

Another potential field of exploration regards what are known as chromogenic materials, whose chief feature is their capacity to react dynamically to variations in environment factors, changing their levels of transparency practically in real time. Exploration of a method for varying transparency began towards the end of the 1870's, though it only recently that the research on the question has produced results suitable for application in industrial production. Transparent materials that behave in dynamic fashion constitute an innovation used in archi-

texture to minimise energy consumption and maximise light supply, thanks to their capacity to modify their physical-optical properties in response to external stimuli. The cutting edge of this experimentation is represented by chromogenic devices, which utilise materials capable of modifying their properties in reversible fashion, based on external climatic conditions, artificial stimulus from outside the materials and internal operational and functional needs. The external stimuli, either natural or artificial, can include exposure to solar radiation, application of an electric field, the transfer of electric discharges, the insertion and extraction of ions etc.. Thanks to the chemical-physical properties of the materials, in response to any variation in the stimuli, and based on its intensity, an enormous array of possible changes of state occur, ranging from an element with a high capacity to transmit solar radiation (in other words, transparent), to a partially reflective one (translucent), all the way to an element that affords little transmission, or that may even be totally reflective (semi-opaque, or almost opaque), with the latter being states in which the material refracts or absorbs all or a part of the spectrum of solar radiation.

Chromogenic devices can be divided into those that are activated electronically, and so require electric power from the outside, meaning that users can regulate them, then there are devices that are not activated electronically, and so they need no electric power from the outside, governing themselves instead through the use of the solar energy that strikes the glass.

In the first category – chromogenic devices made for electronic activation – the most promising systems, which are currently being studied, but have not yet appeared on the market, are electrochromic glass and liquid crystals. The second category, meaning devices that are activated electronically, but respond to passive stimuli arriving primarily from solar radiation, include photochromic and thermochromic glass, varieties that are still in the research and develop phase, though some initial applied experimentation has been carried out in pilot studies.

The book examines these new materials, considering how improvements in building-envelope technology can make possible constructions that function with extremely low heating and cooling loads. It is worth noting that the field of application of these new materials will not be new constructions alone, but will also include existing building stock, which, with its frequently inadequate energy performance, could make use of these new materials, one possibility being (or rather, as has been the case in recent years, and will continue to be in the future, the focus being) thoroughgoing retrofitting initiatives.

This would make it possible to meet the performance standards called for under the latest European Community directive on constructions, which sets minimum requirements of near zero energy by the end of 2020 for all new buildings. Furthermore, the 2018 revision of the directive calls on the member states to present retrofitting strategies designed to achieve full decarbonisation of their building stock by 2050, with meaningful intermediate targets set for 2030 and 2040, all of which constitutes progress in efforts to reach the goal of an environment that is vital, sustainable and pollution free of pollution.

The book is structured in three parts, with the first devoted to phase change envelopes, while the second addresses chromogenic envelopes, and the third presents case histories of the two types of envelopes.

The first part focuses on phase change materials, their function and historical highlights from past research, plus their sectors of application. A brief introduction looks at the theoretical underpinnings for the accumulation of thermal energy in the form of perceived heat, latent heat and thermochemical energy. The description of PCMs includes a look at their characteristics, at the performance requirements they are expected to meet and at their thermal, physical, kinetic, chemical, economic and environmental properties, examining the most significant aspects of each.

The next chapter provides an overview of the different types of PCMs, classifying them as organic, inorganic or eutectic, with each group further breaking down into subcategories based on chemical composition and distinctive features also indicated. The various characteristics of this vast selection of materials can be put to use in a variety of applications, eventually in relation to the environmental conditions of the external environment, so as to take advantage of their full potential. With this in mind, a number of recurring problems tied to these materials were examined, such as phase separation and sub-cooling, though proposed solutions were also described, including encapsulation and methods for increasing thermal conductivity.

Construction is a sector for which these materials have a particular vocation. This portion of the book concludes by taking a closer look at applications in this sector, examining the most widespread uses of the materials, in particular with respect to envelopes, as well as improvements that could be made in the world of construction and levels of environmental sustainability, together with a significant contribution to reducing emissions. Finally, mention is made of technological systems of climate control and applications in other sectors.

The second part analyses the chromogenic materials in detail, presenting their properties of adaptation, their different types and applications, along with the stimulus provided by current research, distinguishing, in three specific chapters, the behaviour of thermochromic and electrochromic devices, as well as that of liquid crystals, with respect to their potential for use in architectural envelopes.

The chapter on thermochromics begins by analysing their typical properties, with indications on their composition and functional principles, also viewed in light of major international experimental efforts. This is followed by a review of the main types of thermochromic devices, analysing their applicability as components of building envelopes. The chapter that follows, which deals specifically with electrochromics, has an initial, theoretical section that analyses the properties of the material and its primary modes of thermal and optical behaviour, followed by analysis of the different varieties, based on whether their chemical composition is organic or inorganic. Finally, liquid-crystal devices are examined, presenting their properties and ongoing development, the advantages and disadvantages of the different types, plus their possible applications in architecture.

These materials have been experimented with on countless occasions, and particularly in recent decades, in response to fundamental needs in the field of construction, and elsewhere, for at the same time that they meet the requests and demands of users, they also modify themselves passively, in response to varying levels of solar radiation, making possible a switch in the properties of the material, so that the passages of light and heat passing between the outside and the inside

are altered, significantly modifying not only thermal comfort, but the visual comfort of the space as well.

The third part brings together roughly thirty case histories on phase change envelopes and approximately sixty on chromogenic envelopes, all of which, taken together, provide a significant overview of the applications put to use in the initiatives carried out to date, confirming the elevated quality of the experimental research being done in these areas. Each case study indicates: the designer, the localisation, the conditions of the surrounding environment, the distribution features of the project, the energy requirements and devices in play, as well as a detailed examination of the case being examined, indicating the type of device utilised, its structural placement and the function performed.

The field of application of these materials, components and systems is continuously expanding, spreading not only in the field of construction, but in other sectors as well. A number of potential drawbacks remain unresolved, mainly in terms of cost, an issue that, to date, has limited their spread on the market, along with other conditions that arise during the transition phase of the material, as well as long-range functional consistency, all conditions that can vary, depending on the type of device involved. But viewed in the medium-long term, they should definitely be examined, studied, followed, experimented with and developed as types of systems that can prove increasingly effective as components of the architectural envelope of the city of the future.

## **2. Phase Change Materials: prestazioni e applicabilità negli edifici**

### **2.1 Prestazioni dei PCM e potenzialità di miglioramento per l'architettura**

#### **2.1.1 Problemi tipici dei materiali e possibili soluzioni**

La caratteristica principale condivisa da tutti i PCM è la loro transizione da solido a liquido durante il cambiamento di fase. Senza questa transizione il calore latente non verrebbe sfruttato e lo stoccaggio di energia o il controllo termico si baserebbero esclusivamente sul riscaldamento sensibile. Tuttavia, la transizione verso uno stato liquido impone di focalizzare l'attenzione sul contenimento della fase liquida in modo tale che le prestazioni del sistema e la sua affidabilità siano salvaguardate.

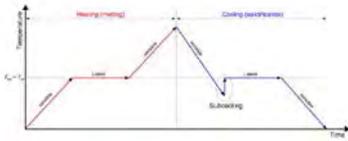
La transizione alla fase liquida, nella maggior parte dei casi, comporta anche un significativo cambiamento di densità con una corrispondente variazione di volume fino al 15-20% per i PCM più comuni. Questo cambiamento di volume deve essere tenuto in considerazione durante la progettazione dei sistemi con PCM.

Infine, nella maggior parte delle applicazioni con PCM, il tempo di risposta rappresenta una sfida significativa. Il PCM deve essere investito direttamente dal flusso di calore per favorire una rapida penetrazione e l'inizio della fusione. Tuttavia, la bassa conduttività termica dei PCM più diffusi, come già indicato, porta ad un'elevata resistenza termica che devia il flusso di calore in percorsi alternativi a resistenza inferiore, creando un bypass del flusso di calore del PCM che si traduce in una bassa velocità di trasferimento del calore entrante ed uscente per l'accumulo. Pertanto, nell'applicazione, la maggior parte dei progetti utilizza una qualche forma di miglioramento della conducibilità termica.

Una delle principali criticità dei PCM riguarda la loro durabilità, ossia la stabilità delle loro proprietà meccaniche e termiche nel tempo. La durabilità di un PCM dipende principalmente da quattro fattori chiave: la quantità di PCM presente, le temperature operative di ciclo, la configurazione fisica del PCM (disperso in una soluzione, ammassato insieme, etc.), e la conduttività termica dei materiali con cui viene a contatto (schiume, tubazioni, etc.). Qui di seguito verranno dunque esposte le maggiori questioni legate all'impiego di PCM e le corrispondenti soluzioni tipicamente adottate.

#### **2.1.2 Separazione di fase**

Quando una sostanza pura, ossia composta da un solo componente, viene riscaldata al di sopra della sua temperatura di fusione e quindi fusa, nella sua nuova fase liquida avrà una composizione omogenea proprio come lo era prima nella fase solida. Quando il materiale sarà raffreddato e riportato nella sua fase solida, la sua composizione continuerà ad essere omogenea. Se un materiale si comporta in questo modo, si dice allora che esso fonde congruentemente.



Sopra: Grafico dell'evoluzione della temperatura durante i processi di carica (fusione) e scarica (solidificazione) di un PCM ideale con sottoraffreddamento

Se invece di una sostanza pura si ha una miscela o un composto, può verificarsi la cosiddetta separazione di fase. A causa della gravità, infatti, la fase con maggiore densità si sedimenterà sul fondo del contenitore e la fase con minore densità si posizionerà sulla parte superiore dello stesso. In funzione di quanto sia importante la separazione di fase, il comportamento di un PCM in fusione viene descritto come semi-congruente o incongruente.

Per ovviare a questo inconveniente la soluzione più comunemente adottata prevede l'aggiunta di un materiale addizionale che possa comportare un incremento della viscosità. Così, a causa dell'accreciuta viscosità, le fasi troveranno un ulteriore ostacolo alla loro separazione. Solitamente questi materiali possono essere costituiti da matrici di altri materiali ad alta conducibilità in modo tale da avere anche un miglioramento dello scambio termico.

Questo problema risulta di particolare rilevanza nel caso di composti inorganici, specialmente di sali idrati, un'altra possibile soluzione prevede l'aggiunta di ulteriore acqua all'idrato salino. L'acqua addizionale rende più veloce l'omogeneizzazione della fase liquida mediante diffusione del sale ma, al contempo, diminuisce la densità di energia accumulabile e aumenta l'intervallo di fusione. Questa soluzione presenta però anche inconvenienti per cui in genere la si utilizza solo in seconda battuta e si preferisce l'adozione di matrici di materiali porosi.

### 2.1.3 Sottoraffreddamento

Molti PCM non solidificano al raggiungimento della temperatura di fusione, ma incominciano a cristallizzarsi ad una temperatura ben più inferiore a quella di congelamento per cui il processo si avvia in ritardo. Questo effetto è chiamato sottoraffreddamento.

A causa dell'effetto del sottoraffreddamento il calore latente non viene rilasciato subito al raggiungimento della temperatura di fusione. Questo effetto quindi porta alla necessità di una diminuzione della temperatura al di sotto della temperatura di cambiamento di fase per permettere l'inizio della cristallizzazione e il rilascio del calore latente stoccato nel materiale. Se la nucleazione non avviene del tutto, il calore latente non viene rilasciato del tutto. Nelle applicazioni tecniche del PCM, il sottoraffreddamento può rappresentare quindi un serio problema.

Se il calore ceduto durante la solidificazione è maggiore del calore sensibile perso a causa del sottoraffreddamento, la temperatura cresce fino alla temperatura di fusione e rimane costante fino a che il cambiamento di fase viene completato. Se invece le perdite dovute al sottoraffreddamento sono maggiori del calore latente rilasciato durante la cristallizzazione, è possibile che la temperatura non risalga alla temperatura di fusione.

Il principale approccio per limitare l'effetto del sottoraffreddamento per i PCM consiste nell'aggiungere dei speciali additivi, chiamati nucleatori, grazie ai quali si ottiene una nucleazione eterogenea. I nucleatori sono stati sviluppati per i PCM più diffusi e comportano la riduzione del sottoraffreddamento a solo qualche grado Kelvin. I nucleatori non sono altro che dei materiali con una struttura cristallina solida simile a quella dei PCM e consentono la crescita della fase solida del PCM sulla loro superficie.

### 2.1.4 Incapsulamento

Il PCM di solito viene incapsulato per essere implementato all'interno di una determinata applicazione. Questo per due principali motivi:

1. Contenere la fase liquida del PCM;
2. Evitare il contatto del PCM con l'esterno, che potrebbe alterare la composizione del materiale stesso.

L'incapsulamento viene solitamente classificato attraverso la sua taglia in macro- e micro-incapsulamento. Tutti questi sistemi sono simili in quanto il loro obiettivo comune è quello di contenere completamente il PCM liquido all'interno di una capsula di qualche tipo, fatta di un materiale che non cambi di fase. Questo guscio può essere semplice come una scatola di alluminio o complesso come una nanosfera polimerica.

Indipendentemente dalla complessità, un problema che tutti i contenitori devono affrontare riguarda il cambiamento del volume del PCM durante il processo di fusione. La maggior parte dei PCM mostrano un cambiamento di volume che può essere fino al 15-20% maggiore rispetto al volume del PCM solido iniziale.

All'interno del contenitore si viene così a formare uno spazio vuoto quando il materiale è nella sua fase solida. Questo spazio vuoto deve essere considerato durante la progettazione di qualsiasi tipo di contenitore in quanto ad esso sarà associato un vuoto d'aria che, a seconda della posizione nel contenitore, può comportare un degrado delle prestazioni di scambio termico.

La conducibilità termica dell'aria – pari a 0.026 W/mK a 20°C – è di diversi ordini di grandezza inferiore a quella di qualsiasi PCM e crea un'elevata resistenza termica che può deviare il flusso di calore verso percorsi alternativi. Pertanto, l'involucro deve essere progettato per favorire la formazione dello spazio vuoto in un luogo lontano dalla fonte di calore o che comunque possa influenzare il meno possibile lo scambio termico.

La posizione e le dimensioni dello spazio vuoto possono influenzare significativamente i gradienti di temperatura e la fusione del PCM all'interno di un contenitore, impedendo il flusso di calore e riducendo l'efficacia delle capacità di accumulo di energia. Ciò significa che, in normali condizioni operative, è necessario evitare situazioni in cui la fonte di calore sia posta sul piano superiore del contenitore PCM per ovvi motivi legati alla forza di gravità.

#### *Macro-incapsulamento (ca. 3mm)*

Il modo più semplice per racchiudere il PCM, affinché la fase liquida rimanga contenuta, consiste nell'utilizzare una scatola rettangolare, fabbricata con un materiale compatibile con il PCM scelto e provvista di un'alta conducibilità al fine di ridurre la resistenza termica. La compatibilità tra il PCM e il materiale del contenitore deve essere sempre tenuta presente poiché alcuni PCM sono corrosivi per alcuni materiali comuni. Ad esempio, i sali idrati presentano numerosi problemi di compatibilità con i materiali di contenimento.

L'acciaio inossidabile risulta resistente alla corrosione anche se la sua bassa conduttività termica rispetto ad altri materiali lo rende svantaggioso dal punto di vista dello scambio termico. Un altro aspetto di cui tenere conto quando si progetta un contenitore per PCM riguarda le perdite. Per questo devono essere usate guarnizioni e sigillanti che si

possano adattare anche a temperature più elevate. In altri casi si risolve la questione delle perdite utilizzando metodi definitivi come la saldatura.

Per ridurre al minimo i punti di perdita, è possibile utilizzare contenitori cilindrici o sferici anziché contenitori rettangolari o cubici.

Tutti i metodi di contenimento discussi qui possono essere combinati con i vari metodi di miglioramento della conduttività termica presentati in seguito per adattare il progetto all'applicazione specifica.

#### *Micro-incapsulamento (17-25 micron)*

La microincapsulazione dei PCM evita la voluminosità delle grandi capsule e presenta invece microsfele che incapsulano un nucleo di PCM.

Queste microcapsule contengono una massa significativamente più piccola di PCM rispetto ai contenitori macroscale discussi nella sezione precedente. Le piccole dimensioni offrono comunque ulteriori vantaggi. Infatti, accanto ai vantaggi legati al contenimento della fase liquida, altri aspetti positivi derivano dal miglioramento dello scambio termico a causa dell'aumento del rapporto tra la superficie di scambio e il volume delle capsule e dall'aumento della stabilità ciclica data dal fatto che la separazione di fase ora sarà limitata a distanze microscopiche.

I PCM sono disponibili nelle tre forme seguenti:

- *Powder* (polvere): le particelle di PCM sono racchiuse in un guscio e immerse in una soluzione acquosa. L'acqua viene quindi rimossa, lasciando una polvere di PCM incapsulato.
- *Cake* (torta): le particelle di PCM sono racchiuse in un guscio e quindi immerse in una soluzione acquosa. La maggior parte dell'acqua viene rimossa, lasciando una torta che contiene il 30% di acqua e il 70% di solidi.
- *Slurry* (sospensione): le particelle di PCM sono racchiuse all'interno di un guscio e quindi immerse in una soluzione acquosa. Una certa quantità di acqua viene rimossa, lasciando una sospensione formata per il 60% di acqua e il 40% di solidi.

Nella produzione di PCM microincapsulato un ruolo importante viene ricoperto dalla percentuale di riempimento della capsula stessa. Infatti, una percentuale maggiore di PCM entro la capsula comporta vantaggi legati ad un miglioramento delle prestazioni di scambio termico

#### *PCM in contenitori*

Per determinati tipi di applicazioni le micro e macrocapsule non sono sufficienti a contenere i *Phase Change Materials*. In questi casi i PCM vengono utilizzati all'interno di contenitori di medie e grosse dimensioni composti da materiali differenti purché compatibili con il tipo di PCM stesso. Questi contenitori offrono le stesse prestazioni delle capsule ma a differenza di queste ultime sono più resistenti e più facili da sottoporre a manutenzione.

Contenitori in alluminio sono spesso utilizzati per le applicazioni riguardanti le controsoffittature, in particolar modo quelle che prevedono il raffreddamento ventilato. I prodotti che usano contenitori in alluminio sono idonei anche per applicazioni in settori differenti da quello edile.

Contenitori polimerici sono invece più utilizzati per le applicazioni nei componenti traslucidi. Le caratteristiche di questa tipologia di contenimento si adattano molto bene alle esigenze di diversi settori da quello edile a quello alimentare e quello sanitario.

MICROINCAPSULAZIONE DEI PHASE CHANGE MATERIALS

DESCRIZIONE TIPOLOGIA DI CONTENIMENTO

La tecnica del microincapsulamento consiste nel contenere i Phase Change Materials in capsule di dimensioni piccolissime in modo da poter sfruttare al meglio le loro potenzialità all'interno dei composti nei quali vengono impiegati. Questo metodo è forse quello maggiormente usato nel campo edile, e non solo, perchè permette di sfruttare le capacità che i materiali possono esprimere quando sono sfusi, e al tempo stesso contenere i problemi che si hanno durante il passaggio di fase, come per esempio la dilatazione o l'insabbiatura.



ESEMPI DI APPLICAZIONI



GARATTERISTICHE TECNICHE DEL TIPO DI CONTENIMENTO

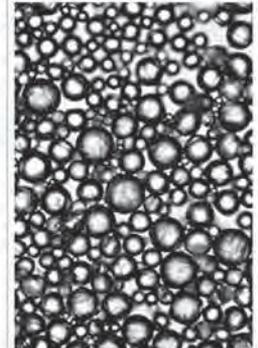
MATERIALE INVOLUCRO	Miscela di Poliolfine
TOSSICITA' INVOLUCRO	Neutralità chimica reciproca tra PCM e involucro
DIMENSIONE	Variabile da 5 µm a 15 µm
SALDATURA	Tecnologia a ultrasuoni
PRODUTTORI	Matrix Group; H+H Celcon; Siegmund; Baaf Micronal; Henkel; Themopal; Era-lehmbau; Dorken; Caparol; Ilkazell; Reminers; StoVerotec.
TIPOLOGIA DI PRODUZIONE	Involucro ottenuto per estrusione: nessuna perdita
COSTO DI PRODUZIONE	Elevato

VANTAGGI

- La microincapsulazione è la tipologia di contenimento che offre più soluzioni e applicazioni nel settore edile.

SVANTAGGI

- Nonostante la flessibilità, le microcapsule possono essere danneggiate dai cambiamenti di volume indotti dai cicli termici;  
- I PCM inorganici hanno bisogno di un contenitore a tenuta d'aria per ridurre la degradazione dei sali.



REQUISITI RICHIESTI PER LA TIPOLOGIA DI CONTENIMENTO

**FLESSIBILITA' CONTENIMENTO**

La microcapsula deve essere resistente alle sollecitazioni che potrebbero mettere a rischio l'involucro.

**RESISTENZA E CONDUCEBILITA' TERM.**

Il microcontenitore deve resistere fino alla temperatura di fusione del PCM contenuto e poter condurre il calore assorbito.

**STABILITA' AGLI ULTRAVIOLETTI**

La microcapsula deve sopportare l'esposizione ai raggi ultravioletti che potrebbero modificare il comportamento dei PCM.

**COMPATIBILITA' CHIMICA CON IL PCM**

La microcapsula deve sopportare l'esposizione ai raggi ultravioletti che potrebbero modificare il comportamento dei PCM.



PROVE DA SUPERARE PER LA TIPOLOGIA DI CONTENIMENTO

**CARICO**

Il microcontenitore deve resistere ad una determinata forza di compressione prima di subire deformazioni o cedimenti.

**FORATURA**

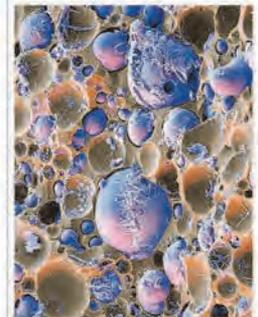
La microcapsula deve resistere ad una sollecitazione concentrata in un punto senza riportare fori.

**STABILITA' NEL TEMPO**

La capsula deve sopportare il cambiamento di fase del PCM per tutto il loro ciclo di vita senza riportare deterioramenti.

**ATTREZZABILITA'**

Le capsule devono consentire, con un congruo margine di sicurezza, la sospensione di oggetti sul componente in cui sono impiegate.



POSSIBILITA' DI IMPIEGO DELLA TIPOLOGIA DI CONTENIMENTO CON I SINGOLI PCM

PARAFFINA	ACIDI GRASSI	SUGAR ALCOHOLS	GLUCOLE POLIETILENICO	SOLUZIONI EUTETTICHE	SALI IDRATI	SALI	CLATRATO
●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●

UTILIZZO DELLA TIPOLOGIA DI CONTENIMENTO NELLE VARIE APPLICAZIONI

INVOLUCRI OPACHI	COMPONENTI OPACHI	ELEMENTI PER SOFFITTI	ELEMENTI PER CONTROSOFFITTI	ELEMENTI PER PAVIMENTI	INVOLUCRO TRASPARENTE	COMPONENTE TRASLUCIDO	SISTEMI DI CLIMATIZZAZIONE
●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●



### 2.1.5 Metodi per incrementare la conducibilità termica dei PCM

I PCM possiedono elevate capacità di accumulo ma sono caratterizzati da bassi valori della conducibilità termica [W/mK], ovvero la quantità di calore trasmessa per unità di tempo, per unità di superficie trasversale, per unità di spessore e per differenza di temperatura unitaria. Questo limite compromette fortemente la loro utilizzazione perché determina uno scambio termico lento e fasi di carica e scarica del materiale lunghe rendendo difficile il raggiungimento di valori di temperatura richiesti nei tempi attesi. Inoltre, bassi valori della conducibilità termica incidono sulle superfici di scambio in quanto a parità di risultato necessitano di più ampie superfici. Pertanto un sistema efficiente sul piano della trasmissione del calore tra PCM e fluido termovettore o tra PCM e ambiente circostante ha bisogno di adeguate tecnologie energetiche rilevanti anche sul piano economico.

Per aumentare i valori della conduttività sono state sviluppate diverse tecniche di miglioramento della trasmissione del calore e attraverso il miglioramento delle caratteristiche dei PCM. Al fine di migliorare le prestazioni del sistema queste applicazioni possono essere combinate. I metodi più diffusi prevedono:

#### - *Miglioramento delle caratteristiche dei PCM*

I PCM vengono trattati con l'aggiunta di materiali ad elevata conducibilità (particelle di rame, argento, alluminio, etc.) e bassa densità (fibre di carbone e paraffinici). Le frazioni di particelle metalliche disperse devono essere disposte in combinazione ottimale con i PCM per ottenere contemporaneamente un'elevata conduttività e una sufficiente massa di PCM che garantisca la densità di accumulo richiesta affinché non ci sia separazione. Un buon incremento della conducibilità si ottiene anche con l'uso della grafite che permette di avere elevate prestazioni in fase di riscaldamento del materiale possedendo una conducibilità comparabile con l'alluminio ma una densità molto minore.

#### - *PCM sfusi o immersi in matrice porosa*

I *Phase Change Materials* possono essere anche utilizzati, per le differenti applicazioni, senza uno specifico tipo di contenimento, cioè allo stato sfuso. Al fine di evitare che la capacità di accumulo di questi materiali sfusi perda potenzialità, gli stessi possono essere impiegati direttamente nella miscela chimica dei componenti tramite l'immersione di matrici porose nei PCM stessi quando si trovano allo stato liquido. In questo modo vengono ottenute diverse applicazioni in campo edile, sia opache che traslucide. Questo sistema è il più economico sul mercato.

I PCM immersi in matrice porosa sono di due tipi:

- PCM – alluminio, la conduttività efficace del composito dipende dalla frazione volumica di metallo e della resistenza di contatto. Il calore latente del composito, invece, dipende solo dalla frazione volumica di metallo;

- PCM - grafite: l'inserimento di una matrice porosa di grafite incrementa in modo considerevole la conduttività termica rispetto al PCM puro. Questo processo comporta una leggera diminuzione del calore latente per unità di volume che però risulta accettabile per l'impiego del composito ottenuto.

Sono anche frequenti l'uso di schiume metalliche a celle aperte. Le schiume metalliche sono strutture cellulari costituite da un metallo solido (rame, acciaio o alluminio) e da aria per il 75-95%. La composizione di pori d'aria può essere a celle chiuse, permettendo di ottenere elevate prestazioni in termini di isolamento, oppure a celle aperte formando una rete interconnessa che può essere impiegata come scambiatore di calore; infatti, la matrice metallica riscaldata anche elettricamente, consente al materiale fluido passando attraverso di essa di assorbire calore. Lo scambio di calore è efficiente in virtù del suo peso leggero in rapporto all'elevata superficie di trasmissione del calore e il trasferimento è veloce grazie alla bassa inerzia termica.

Le schiume metalliche presentano inoltre un'alta resistenza della struttura e non sono soggette a *shock* termici. La grande varietà di metalli e leghe disponibili permette di adattare la struttura allo specifico compito da svolgere.

#### - *Superficie metallica estesa o alettata*

L'accorgimento di adottare una superficie metallica estesa o alettata a contatto con il PCM permette di trasferire l'elevata conducibilità del metallo in maniera più efficace all'interno del mezzo, asportando il calore ad un tasso più elevato dal componente riscaldante, inoltre se il dissipatore è rivolto all'ambiente, ciò consente un ulteriore incremento del calore asportato per il contributo della convezione naturale.

#### - *Unità multiple di PCM*

Lo scambio termico dell'unità di accumulo durante le fasi di carica e scarica del materiale dipende dalla differenza tra la temperatura del fluido termovettore e la temperatura di fusione del PCM e questo determina l'efficacia del sistema. Quando è utilizzato un unico PCM, tale differenza di temperatura decresce lungo la direzione del flusso del fluido determinando una riduzione dello scambio termico e delle prestazioni del sistema. Invece 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.

#### - *Incapsulamento*

Questa metodica, come si è visto, consente di risolvere alcune problematiche connesse all'utilizzo dei PCM sfusi ma è utile anche per incrementare la superficie di scambio termico tra PCM e fluido per unità di volume determinando una maggior velocità di scambio.

Una volta che il PCM è stato scelto, primariamente sulla base dell'intervallo di temperature di applicazione, i successivi fattori da considerare in ordine di importanza sono la geometria del contenitore dei PCM e i parametri termici e geometrici dello stesso richiesti da un determinato quantitativo di materiale.

Ciascuno di questi fattori ha un'influenza diretta sulle caratteristiche della trasmissione del calore nel PCM e, in definitiva, condiziona l'intervallo di tempo di fusione e le prestazioni dell'unità di stoccaggio con materiali a cambiamento di fase.

## 2.2 Applicazione e applicabilità dei PCM negli edifici

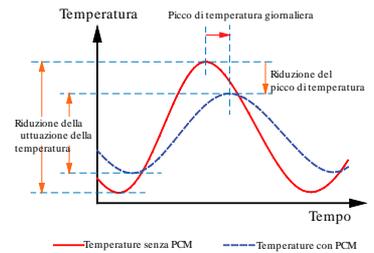
### 2.2.1 Approccio per l'integrazione dei PCM negli involucri degli edifici

I PCM trovano spazio in numerosi componenti dell'edificio, dall'involucro alle partizioni interne, spesso integrati con i materiali costruttivi, fino a veri e propri sistemi di accumulo appositamente annessi. Questi materiali forniscono all'edificio una massa termica artificiale basata non sulla capacità di accumulo inerziale, come nei materiali tradizionali, ma sul calore latente. La capacità di calore latente del PCM viene utilizzata per catturare direttamente l'energia solare o il calore o il freddo generati dall'uomo e ridurre le oscillazioni di temperatura nell'edificio.

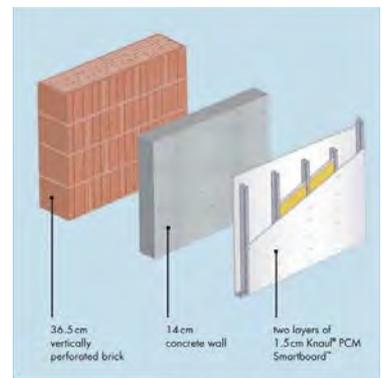
Oggi è possibile migliorare il comfort termico e ridurre il consumo di energia degli edifici senza un sostanziale aumento del peso dei materiali da costruzione mediante l'applicazione di PCM. Le temperature di picco massime e minime possono essere ridotte mediante l'uso di piccole quantità di PCM, miscelate con il materiale da costruzione o applicate come strato sottile alle pareti e alle coperture di un edificio. Inoltre, il consumo di energia può anche essere ridotto assorbendo parte dell'energia solare incidente e ritardando / riducendo il carico di calore esterno.

In definitiva i PCM hanno quindi la capacità di ridurre la temperatura massima dell'ambiente interno, ridurre le temperature in eccesso oltre la gamma di *comfort* termico, migliorare le prestazioni energetiche complessive dell'edificio e aumentare la resistenza termica come strato isolante.

Ciò che questi sistemi si propongono è di ottenere un clima ideale per l'essere umano, senza grosse fluttuazioni di temperatura sfruttando tutte le fonti possibili di generazione di caldo o freddo: stoccaggio stagionale, radiazione solare diretta, collettori solari, sonde geotermiche, ventilazione notturna, etc. al fine di mantenere la temperatura più vicina alla temperatura desiderata per tutto il giorno.

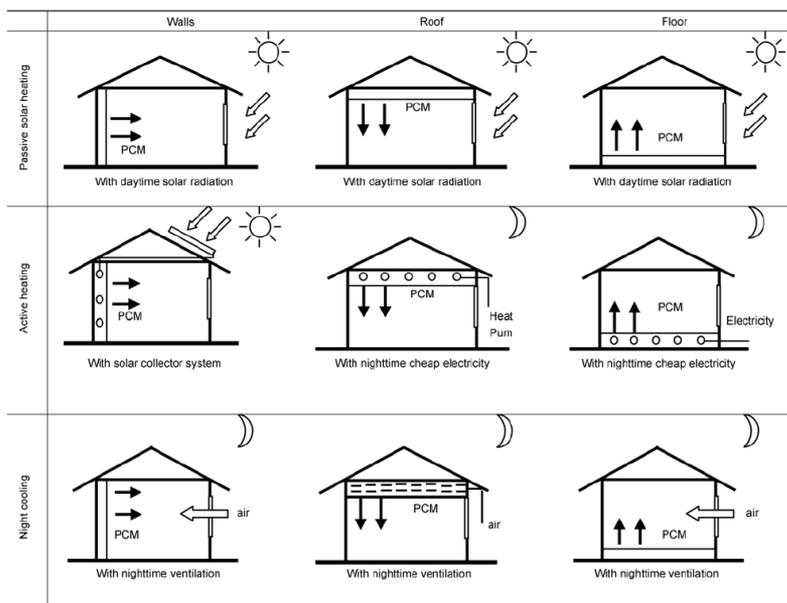


Sopra: Il grafico mostra come i PCM possono migliorare l'ambiente interno di un edificio riducendo i picchi di temperatura interna e le fluttuazioni



Knauf PCM Smartboard™ – the ideal material in modern lightweight construction providing the same thermal capacity as 36.5 cm of vertically perforated brick or 14 cm of concrete. (Comparison based on a smelting with Knauf PCM Smartboard™ and a 2-Kelvin change in temperature).

Sopra: Esempio di parete in PCM che mantiene le stesse capacità termiche di una parete di poroton da 36,5 cm e una parete di 14 cm in cemento



A fianco: Schema delle possibili applicazioni dei PCM in un edificio



Sopra: Le microparticelle PCM vengono facilmente incorporate nei materiali da costruzione come gesso o cemento e svolgono il loro compito di "heat buffer"



Sopra: PCM interposto tra isolamento e pannelli in cartongesso. Possono essere usati anche come barriera al vapore

Nella climatizzazione degli edifici i PCM vengono quindi utilizzati:

- "incorporati" nei materiali da costruzione, miscelandoli, in fase liquida o in polvere, con materiali quali intonaci, nelle miscele dei calcestruzzi, massetti e sottofondi gesso o cemento;
- "immersi" dentro un materiale da costruzione poroso, come blocchi di cemento o gesso e l'assorbimento avviene per azione capillare;
- "integrati" nei componenti costruttivi, applicato uno strato sottile alle pareti, alle coperture e ai sistemi di facciata vetrati. L'integrazione di PCM nell'involucro degli edifici ha attirato un grande interesse negli ultimi 10 anni.

Fattori che influenzano la scelta dei PCM

L'efficienza delle prestazioni dei PCM dipende fortemente dall'esecuzione del ciclo quotidiano completo di fusione / congelamento per essere pronti per il ciclo successivo il giorno seguente e da diversi altri fattori:

- condizioni climatiche esterne;
- scopo dell'applicazione PCM;
- orientamento e radiazione solare incidente;
- condizioni ambientali interne;
- tipo di PCM;
- materiali e stratigrafia del componente tecnologico;
- posizione e installazione di PCM nell'edificio;
- costi di investimento.

## 2.2.2 Involucri verticali opachi e componenti opachi

L'involucro dell'edificio grazie alla sua dimensione ha potenzialmente una elevata possibilità di conservare energia termica. Una facciata PCM è in grado di catturare una grande parte della radiazione solare incidente sulle pareti o sulle coperture dell'edificio. Nello specifico, all'isolamento dell'involucro esterno può essere affiancata l'inerzia termica artificiale, programmabile sulla temperatura desiderata, grazie ai PCM. Durante il giorno i PCM applicato all'involucro passano dalla fase solida a quella liquida immagazzinando il calore in eccesso che altrimenti surriscalderebbe l'ambiente. Durante la notte, al calare della temperatura, il materiale si solidifica nuovamente, cedendo il calore accumulato, ed è quindi pronto a compiere un nuovo ciclo il giorno successivo. Così in estate, i PCM lavorano principalmente per smorzare l'onda di calore durante il giorno ed è importante che si scarichino durante la notte per funzionare nuovamente il giorno seguente. Nel periodo invernale viceversa, il calore accumulato durante le ore calde viene rilasciato durante la notte ed è importante prevedere un sistema che permetta di ritardare la perdita di calore verso l'esterno.

Di seguito sono riportate le principali modalità applicative.

- *Blanket PCM per murature*: questo materiale è applicabile con facilità e ogni elemento può essere sostituito singolarmente ed essendo rivestito in pannelli C-Tide (*Changeable Thermal Inertia Dry Enclosures*) e possiede un'elevata compatibilità con gli altri materiali. PCM interposto tra isolamento e pannelli in cartongesso. Possono essere usati anche come barriera al vapore



Sopra: Nuovo legno trasparente  
sviluppato da KTH Royal Institute  
of Technology di Stoccolma

- *Pannello leggero per interni*: I laminati per rivestimento sono economici e sono molto usati in una grande varietà di applicazioni. I processi mediante i quali i materiali a cambiamento di fase possono essere incorporati all'interno dei pannelli possono avvenire sia imbevendo le porosità dell'intonaco asciutto nel PCM liquido, sia aggiungendo questi ultimi nella fase di solidificazione dell'intonaco stesso. Allo stesso modo si possono ottenere muri leggeri per strutture prefabbricate.

- *Pannello di tamponamento esterno*: La stratigrafia della parete che vede l'applicazione del PCM sul lato esterno consente di assorbire il flusso termico dovuto alla radiazione e dalla differenza di temperatura dell'aria durante il giorno, mentre di notte di rilasciare l'energia accumulata verso l'esterno quando la temperatura scende al di sotto di quella di fusione del materiale.

- *Intonaco*: Le capsule di cera (paraffina) di dimensioni microscopiche contenute in uno strato di intonaco, consentono di mantenere temperature gradevoli all'interno degli edifici. Si tratta dunque di micro-accumulatori di calore latente, che viene assorbito durante la fusione della cera stessa (22-26 °C), ed è rilasciato quando la cera si solidifica. Queste microcapsule di cera sono protette da un involucro di plastica, in modo da non fuoriuscire dall'intonaco, durante il cambiamento di fase della liquidazione.

- *Calcestruzzo con PCM*: Un altro metodo per applicare i PCM nelle strutture degli edifici consiste nell'incorporare i PCM in matrici di cemento o cementi a celle aperte. Questo composito viene chiamato *thermocrete*. Si rileva che le tecniche di incorporazione del PCM influenzano notevolmente la capacità di accumulo termico. È stato messo a punto un nuovo calcestruzzo innovativo con PCM al fine di sviluppare un prodotto che migliora gli aspetti termici senza influire sulla resistenza meccanica del muro di cemento. Il nuovo materiale ha raggiunto una resistenza a compressione superiore a 25 MPa e una resistenza alla spaccatura di trazione superiore a 6 MPa mentre nessuna differenza si è verificata negli effetti del PCM dopo 6 mesi di funzionamento.

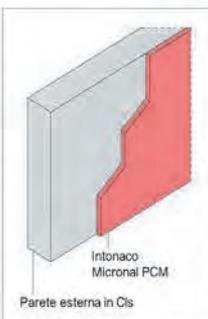
- *Mattoni con PCM*: Costruendo un edificio con mattoni o altri materiali impregnati di PCM si ottiene una struttura con un'elevata inerzia termica senza che a questa sia associata una massa eccessiva. I materiali a cambiamento di fase vengono macro-incapsulati all'interno della muratura di mattoni o in alternativa si sfrutta la porosità del materiale di base per impregnarlo di PCM. I mattoni così ottenuti devono comunque garantire la richiesta stabilità strutturale durante i molteplici cicli termici. In questo modo si ottengono ottimi incrementi delle performance termiche rispetto ad un equivalente volume di normali mattoni.

- *Sistema di facciata attiva con raffreddamento ad acqua o ad acqua e aria*: Questo tipo di muro integra le caratteristiche di una parete ad acqua con i sistemi di accumulo che sfruttano i materiali a cambiamento di fase (PCM) ottenendo un sistema con prestazioni ottimali. I PCM possono essere installati prima della parete ad acqua, dopo o su entrambi i lati. Infatti, nonostante le pareti ad acqua fossero il miglior sistema di accumulo di calore sensibile, la loro capacità termica risultava comunque inferiore rispetto ai sistemi di accumulo latente.

INVOLUCRO OPACO E COMPONENTI OPACHI

INTONACO A RITENZIONE DI CALORE CON MICROCAPSULE DI PCM

Nome Prodotto	Intonaco Micronal PCM		
Casa Produttrice	BASF		
Caratteristiche	Questo intonaco per interni è costituito per il 10-25% da particelle di cera in grado di accumulare il calore latente e di garantire una temperatura interna costante tra 20°C e i 26°C. La paraffina microincapsulata è il PCM in grado di garantire buone prestazioni per questo componente.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



ESEMPI DI APPLICAZIONI



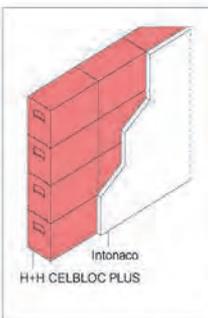
School Building Diekirch



OL House Ludwigshafen

CALCESTRUZZO CELLULARE CON PCM IN MACROCAPSULE

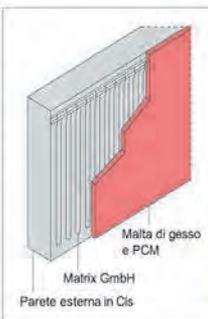
Nome Prodotto	H+H CELBLOC PLUS		
Casa Produttrice	H+H e BASF		
Caratteristiche	Incorporando i materiali a cambiamento di fase all'interno del calcestruzzo poroso si è aumentata la capacità di accumulo di calore dei blocchi e della parete. Il PCM che si adatta meglio a questo tipo di applicazione è la paraffina microincapsulata.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



Casa 3 litri - Saline di Ostia Antica

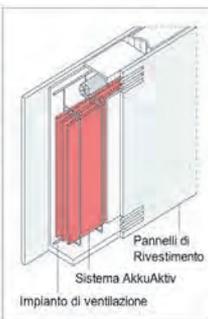
SISTEMA DI FACCIATA ATTIVA CON RAFFREDDAMENTO AD ACQUA

Nome Prodotto	Matrix GmbH		
Casa Produttrice	RUBITHERM		
Caratteristiche	Malta di gesso e PCM addossati a una matrice con tubi capillari che permette raffreddamento del componente tramite il passaggio dell'acqua. La paraffina ed alcuni tipi di sali eutettici microincapsulati si adattano a questa tipologia di prodotto.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●

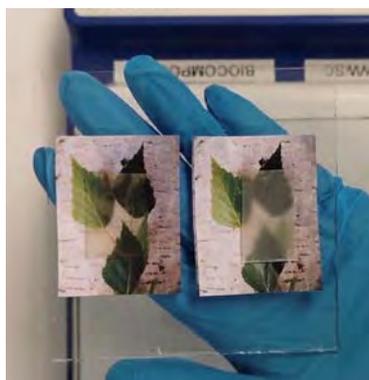


SISTEMA DI FACCIATA ATTIVA CON RAFFREDDAMENTO AD ACQUA E ARIA

Nome Prodotto	AkkuAktiv		
Casa Produttrice	ZAE BAYERN		
Caratteristiche	Impianto di ventilazione montato o costruito in una partizione come un sistema modulare. Pannelli di alluminio con misti di paraffina e sale idrato, tubi di rame per la ricarica, e mini fan-coil per l'immissione dell'aria.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



BASF House University of Nottingham



Sopra: Nuovo legno trasparente sviluppato da KTH Royal Institute of Technology di Stoccolma

- *Sistemi di accumulo passivo*: I muri Trombe, esempi di sistemi a guadagno indiretto per il riscaldamento solare passivo, sono costruiti con uno strato singolo o doppio di vetro o polycarbonato montato a circa 10 cm da una spessa parete spesso realizzata in cemento e per assorbire l'energia termica che viene quindi stoccata nella massa della parete. I PCM inseriti nella parete durante il giorno si fondono grazie alla radiazione solare incidente, mentre, durante la notte, il calore viene rilasciato all'interno tornano allo stato solido. Per un dato ammontare di calore accumulato, le unità contenenti PCM richiedono minor massa per la parete di accumulo (a scambio sensibile). I PCM utilizzati solitamente sono sali idrati o idrocarburi, spesso con l'aggiunta di additivi metallici per incrementarne conduttività ed efficienza.

### 2.2.3 Involucri verticali trasparenti e componenti traslucidi

L'obiettivo dell'integrazione di un PCM nella componente di vetro è quello sia di utilizzare l'energia solare in un modo più efficiente sia di ridurre la discrepanza temporale tra la disponibilità di energia solare e la domanda di energia di riscaldamento/raffreddamento. A causa delle proprietà spettrali di alcuni PCM (ad es. cera di paraffina), l'inserimento di tale strato in un componente trasparente consente alla parte visibile della radiazione solare di entrare nell'ambiente interno assorbendo la maggior parte della radiazione infrarossa e di conservarla all'interno del vetro. Inoltre grazie all'esposizione diretta alla radiazione solare, si ottiene un migliore sfruttamento dell'energia solare (accumulo di energia), poiché il PCM può essere "attivato" in un modo più semplice (meno problemi dovuti alla cosiddetta "profondità di penetrazione")

La densità di energia che può essere immagazzinata (principalmente irradiazione solare), a una temperatura quasi costante grazie allo sfruttamento del latente il calore di fusione del PCM, è molto più elevata dei componenti per vetri convenzionali. I vantaggi attesi delle componenti vetrati con PCM comprendono quindi:

Sul bilancio termico dell'edificio si evidenziano quindi i seguenti vantaggi:

- una riduzione e uno spostamento del guadagno di calore solare attraverso i vetri durante i giorni estivi, con una corrispondente diminuzione del carico di raffreddamento e della domanda di energia di raffreddamento;
- una riduzione della differenza tra la domanda di riscaldamento e la disponibilità di energia solare durante l'inverno grazie all'effetto *buffering*.

Inoltre, questo tipo di tecnologia presenta anche vantaggi in termini di *comfort* termico e visivo:

- un migliore controllo della radiazione solare visibile e una riduzione del rischio di abbagliamento determinando un migliore sfruttamento dell'illuminazione diurna e del *comfort* visivo;
- una mitigazione delle temperature interne della superficie del vetro, che porta a un miglioramento del *comfort* termico.

- *Legno trasparente*: Si tratta di un materiale che, opportunamente trattato, è in grado di far passare la luce e di assorbire/rilasciare calore. Per far diventare trasparente il legno viene eliminata la lignina dal suo

ELEMENTI E COMPONENTI PER SOFFITTI E CONTROSOFFITTI



PANNELLO PER CONTROSOFFITTO

Nome Prodotto	DELTA - COOL 24		
Casa Produttrice	DELTA System		
Caratteristiche	Pannello composto da uno strato di PCM contenuto all'interno di due laminati di alluminio. I PCM usati in questo prodotto devono essere necessariamente macroincapsulati all'interno di buste plastiche. A questa tipologia di prodotto si adattano i PCM inorganici, specialmente i sali idrati.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



ESEMPI DI APPLICAZIONI



Single-family house in Landschlacht



Terraced house



New semidetached wooden house



Intech - Verwaltungsgebäude building



Dallmayr in Munchen

PANNELLO PER CONTROSOFFITTO CON CONTROLLO DELLA VENTILAZIONE

Nome Prodotto	PCM CoolDeck		
Casa Produttrice	CLIMATOR		
Caratteristiche	Pannello composto da uno strato di PCM contenuto all'interno di due laminati di alluminio. I PCM usati in questo prodotto sfruttano una movimentazione artificiale dell'aria all'interno dei controsoffitti. Il PCM utilizzato per questo componente opaco è esclusivamente la paraffina.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



PANNELLO PER CONTROSOFFITTO CON CONTROLLO DELLA VENTILAZIONE

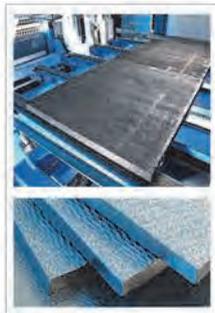
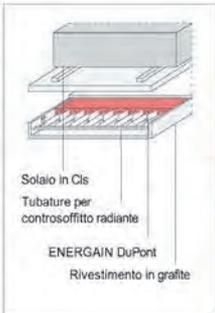
Nome Prodotto	ENERGAIN DuPont		
Casa Produttrice	DuPont		
Caratteristiche	Pannello di controsoffitto dallo spessore di 5 mm, che consiste in un laminato di alluminio contenente un compound di copolimero e cera paraffinica, installato sotto il rivestimento di cartongesso insieme ad un sistema di ventilazione controllata. La paraffina è il PCM più adatto a questo prodotto.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



Innovative Lösungen

PANNELLO PER SOFFITTO RADIANTE

Nome Prodotto	ECOPHIT LC		
Casa Produttrice	ZAE BAYERN - SGL		
Caratteristiche	Pannello per soffitto radiante con rivestimento esterno in grafite e riempimento interno con PCM organici. Il PCM che si adatta meglio a questo tipo di pannello è la paraffina.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●





Sopra: Profili in PCM per applicazione sotto pavimento

interno (il composto chimico-organico che nel legno assorbe la quantità maggiore della luce) e viene riempita la micro-porosità con un mix di acrilico e di un materiale a cambiamento di fase (glicole polietilenico, atossico e biodegradabile). Quando si scalda con l'irraggiamento solare, il legno diventa più trasparente mentre il materiale PCM assorbe e trattiene il calore, passando da solido a liquido; quando invece il legno si raffredda, per esempio di notte, il PCM torna allo stato solido cedendo il calore accumulato in precedenza e si opacizza un po', mantenendo comunque un buon livello di trasparenza.

- *Lastre di vetro contenenti PCM*: Questo tipo di applicazione è la più diffusa per le pareti traslucide. Oltre ad essere di facile applicazione, questo tipo di facciata offre anche un'ottima manutenzione e la massima compatibilità con gli altri materiali che la compongono. Questo prodotto conserva tutte le caratteristiche che fanno apprezzare il vetro a cui unisce le caratteristiche dei componenti con PCM. Ai requisiti richiesti il prodotto risponde con massimi livelli di applicazione, manutenzione e compatibilità con gli altri materiali.

#### - *Elementi schermanti con PCM*

Le schermature contenenti PCM sono posizionate dalla parte esterna delle finestre. Nei climi o nelle stagioni calde durante il giorno vengono aperte ed il lato interno viene esposto alla radiazione solare che fonde il materiale a cambiamento di fase, il quale assorbe ed accumula il calore. Durante le ore notturne, le imposte vengono chiuse e le finestre aperte, così che il calore irradia dai PCM verso l'interno della stanza.

### **2.2.4 Involucri orizzontali e componenti per soffitti, controsoffitti e pavimenti**

L'applicazione dei PCM in controsoffitti consentono di sfruttare notevolmente gli apporti energetici interni o i raffrescamenti notturni e, di fatto, fornisce un volano inerziale con l'impiego di una quantità di materiale fino a 40 volte inferiore in peso rispetto alla stessa prestazione fornita da un nucleo massiccio in calcestruzzo. (le lastre in gesso rispetto contenenti paraffine con soli 15 mm di spessore equivalgono alla capacità termica di un solaio composto da 100 mm di calcestruzzo e da 150 mm di laterizio).

Altra combinazione interessante risulta quella con i cosiddetti tetti ventilati che raccolgono il freddo durante le ore notturne per raffrescare l'interno durante il giorno, passando attraverso lo stoccaggio operato dai pannelli a soffitto o da altri elementi contenenti PCM. Il raffrescamento dell'ambiente interno può essere coadiuvato da un sistema di ventilazione controllata. Questo sistema di accumulo termico, rispetto alle soluzioni convenzionali che utilizzano la soletta in calcestruzzo, consente uno stoccaggio del calore più efficiente dato che l'aria fresca ad alta densità convogliata nel controsoffitto si raccoglie presso il pannello in PCM; tutto il soffitto può accumulare calore se l'intercapedine superiore non è interrotta da travature e l'aria fresca può fluire; infine, finché la superficie dei pannelli a soffitto sono mantenuti alla temperatura di transizione dei PCM per un periodo sufficientemente esteso, la temperatura interna dell'edificio può essere incrementata.

ELEMENTI E COMPONENTI PER SOFFITTI E CONTROSOFFITTI



PANNELLO PER CONTROSOFFITTO

Nome Prodotto	KARTON - SANA CLIMA		
Casa Produttrice	Ton - Gruppe		
Caratteristiche	Pannello in terra cruda per controsoffitto con paraffina microincapsulata. Anche altri tipi di PCM organici si adattano bene a questo tipo di prodotto, purché microincapsulati.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



ESEMPI DI APPLICAZIONI



Haus Der Gegenwart in Munich



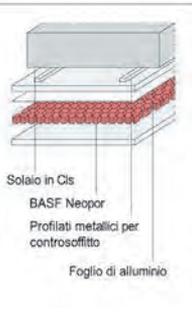
Badenova buiding in Offenburg



Aggelidis & Georgakopoulos offices

PANNELLO PER CONTROSOFFITTO

Nome Prodotto	Neopor		
Casa Produttrice	BASF		
Caratteristiche	Pannello sandwich contenenti una struttura alveolare composta da filamenti di PCM. Per questa tipologia di prodotto si possono usare PCM organici e inorganici.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



PANNELLO PER CONTROSOFFITTO

Nome Prodotto	Styrodur		
Casa Produttrice	BASF		
Caratteristiche	Lastra rigida composta da una matrice mista di sali idrati e paraffina rivestita da una lamina di alluminio. Per questa tipologia di prodotto si deve usare esclusivamente il misto di PCM inorganico - organico di sali idrati e paraffina.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



PANNELLO PER SOFFITTO RADIANTE

Nome Prodotto	ClimSel C24		
Casa Produttrice	Climator		
Caratteristiche	Pannello per soffitto radiante con rivestimento esterno in alluminio con riempimento di sali idrati e sistema di ventilazione per il controllo del cambiamento di fase. Anche altri tipi di PCM inorganici possono essere utilizzati per questo prodotto.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



I PCM si possono integrare anche ai solai interpiano di un edificio, con una funzione naturalmente diversa rispetto a quella che ricoprono nei muri perimetrali. In questo caso essi vanno tendenzialmente posizionati all'interno della stratigrafia del solaio in modo che siano a contatto con il sistema radiante. Essi svolgono la funzione, da un lato, di ridurre il surriscaldamento dei solai direttamente esposti alla radiazione in estate, e dall'altro, in inverno, di assorbire calore dall'impianto radiante durante la notte e rilasciarlo di giorno.

### 2.2.5 Sistemi tecnologici integrati di climatizzazione attiva-passiva

Passando ai sistemi attivi di riscaldamento, per caricare i PCM di calore latente, la sorgente termica può essere elettrica (con l'obiettivo di produzione in *off-peak*, e con il vantaggio di presentare una certa semplicità impiantistica e di gestione), oppure si può utilizzare l'acqua calda (ottenuta da fonte solare, geotermica o altro) o infine ricorrere a sistemi misti ad acqua-aria che si presentano interessanti per la fornitura di energia termica all'involuppo dell'edificio integrato con i PCM stessi.

Nel raffrescamento con sistemi attivi, quasi sempre integrati con la ventilazione notturna, può essere impiegato il passaggio di acqua fredda nelle pareti o il tradizionale condizionamento dell'aria (eventualmente prodotti in *off-peak*) per ottenere l'accumulo di freddo nella struttura.

Al riguardo la previsione di sfruttamento delle energie rinnovabili per l'accumulo termico latente negli edifici dovrebbe portare all'indicazione dei materiali PCM più adatti alle varie condizioni applicative e lo sviluppo dei relativi metodi di progettazione con una valutazione sugli effetti e benefici sull'applicazione di queste tecnologie.

Infine, si segnalano altri sistemi attivi, che si differenziano da quelli sopra descritti perché distinti da altri elementi costruttivi e funzionali all'edificio, anche se spesso ne costituiscono la fonte energetica di partenza per l'utilizzo finale nel riscaldamento o raffrescamento dell'ambiente interno, quale il sistema di accumulo di energia solare termica a rocce interrate. Si rileva che le rocce costituiscono una valida alternativa all'acqua per temperature superiori ai 100°C anche se la loro capacità termica è inferiore. Inoltre, a parità di accumulo, è richiesto un maggior volume però compensato da costi contenuti. In questo caso si tratta di stoccaggio a calore sensibile.

#### *Serbatoio accumulatore di calore per impianti di collettori*

Questo tipo di prodotto è parecchio utilizzato nelle grandi strutture per la climatizzazione di grandi ambienti. Essendo un prodotto indipendente dall'impianto diretto è in grado di rispondere ai requisiti richiesti con ottimi risultati sia per la facilità di applicazione, la manutenzione e la compatibilità con gli altri materiali.

#### *Sistemi tecnologici di climatizzazione: Serbatoio di refrigerazione accumulatore di energia*

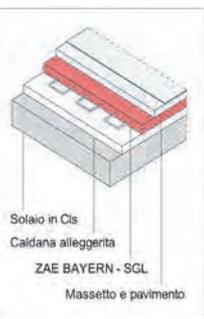
Come il precedente prodotto, questo serbatoio è facilmente applicabile e in grado di offrire un'ottima compatibilità con gli altri materiali, ma a seconda della sua grandezza varia la difficoltà della manutenzione.

ELEMENTI E COMPONENTI PER PAVIMENTI



RIVESTIMENTO PER PAVIMENTI RADIANTI

Nome Prodotto	ZAE BAYERN		
Casa Produttrice	ZAE BAYERN - SGL		
Caratteristiche	PCM granulato da inserire come sottofondo ad un impianto di riscaldamento a pavimento. A questa tipologia di prodotto si adattano i PCM organici, specialmente la paraffina.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



ESEMPI DI APPLICAZIONI



Luchthavens Eindhoven Airport

PANNELLO PER PAVIMENTI RADIANTE

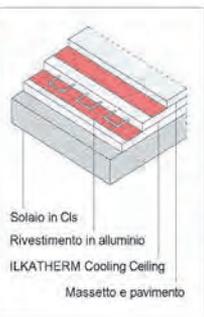
Nome Prodotto	TEAP Energy TEA 29 PCM CAPSULES		
Casa Produttrice	TEAP		
Caratteristiche	PCM in capsulate bombate rigide da inserire come sottofondo ad un impianto di riscaldamento o raffreddamento ad acqua. A questa tipologia di prodotto si adattano i PCM inorganici, soprattutto i sali idrati.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



Deerns Consulting Engineers Building

PANNELLO PER PAVIMENTI RADIANTE

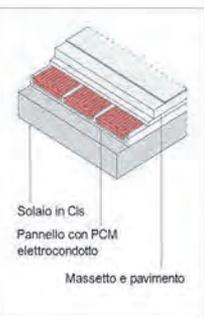
Nome Prodotto	ILKATHERM Cooling Ceiling		
Casa Produttrice	ILKAZELL - BASF MICRONAL		
Caratteristiche	Lastra da inserire nel pavimento per il riscaldamento e raffreddamento a terra costituita da diversi strati: foglio di rivestimento in alluminio, schiuma rigida in poliuretano, tubi in pvc con passo di 10 mm. La paraffina macroincapsulata si adatta al meglio a questa tipologia di prodotto.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



Haus in Herrenberg - Moenchberg

PANNELLO ELETTRICO PER PAVIMENTI RADIANTE

Nome Prodotto	Pannello con PCM elettrocondotto		
Casa Produttrice	-		
Caratteristiche	Pannelli rigidi di PCM da inserire nel pavimento per il riscaldamento e raffreddamento a terra e attraversati da lamelle elettriche. A questa tipologia di prodotto si adattano tutti i PCM con una buona conducibilità.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ●	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ●	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ●



#### *Sistemi tecnologici di climatizzazione: Ventilconvettore con PCM*

I pannelli di PCM inseriti nel prodotto sono molto semplici da installare e offrono un'ottima compatibilità con gli altri materiali dipendente dal fatto che la macrocapsule sono disposte in un contenitore isolato e facilmente estraibile ma nel processo di manutenzione possono creare problemi diminuendo la propria efficacia a livello termico.

#### **2.2.6 Altre applicazioni dei PCM**

- *Settore informatico*: i PCM sono stati introdotti come sistema di mantenimento della temperatura ottimale nelle *motherboard*. Il procedimento di applicazione nei sistemi informatici risulta essere piuttosto complesso perché si tratta di micro-applicazioni. Anche la manutenzione non è molto facile da effettuare, mentre risulta essere migliore, rispetto agli altri requisiti, la compatibilità con gli altri materiali.

- *Settore alimentare*: la scelta di usare i PCM nei contenitori trasportabili per alimenti è data dal fatto che può essere impiegata sia per alte che per basse temperature a seconda del materiale scelto, sfruttando il punto di fusione ideale. In questo campo i requisiti sono soddisfatti al meglio.

- *Settore sanitario*: i prodotti utilizzati in questo campo sono finalizzati al mantenimento di campioni di sangue. I PCM vengono impiegati nella composizione chimica, quindi sono semplici da applicare, di facile manutenzione e assolutamente compatibili con gli altri materiali.

- *Settore automobilistico*: questi prodotti sono spesso inseriti all'interno di strati di materiali differenti, non è molto semplice da applicare e ancora meno da sottoporre a manutenzione. Più elevata è la risposta alla compatibilità con altri materiali.

INVOLUCRO TRASPARENTE E COMPONENTI TRASLUCIDI



LASTRE DI VETRO CONTENENTI PCM

Nome Prodotto	INGLAS PRISM (Applicazioni Verticali)	
Casa Produttrice	INGLAS	
Caratteristiche	<p>Il PCM è stato inserito dapprima in cassette di plastica trasparente (PP stabilizzato contro UV) ermeticamente sigilate da 140 grammi l'una e di dimensione 100 x 100 x 20 mm, poste tra due lastre di vetro.</p> <p>La paraffina è il PCM più adatto a questo prodotto.</p>	
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ● ○	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ● ○
	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ● ○	



ESEMPI DI APPLICAZIONI



Stevenage Borough Council Offices



GSW Headquarters

LASTRE DI VETRO CONTENENTI PCM

Nome Prodotto	INGLAS PRISM (Applicazione Orizzontale)	
Casa Produttrice	INGLAS	
Caratteristiche	<p>Il PCM è stato inserito solo in cassette di plastica trasparente (PP stabilizzato contro UV) ermeticamente sigilate da 140 grammi l'una e di dimensione 100 x 100 x 20 mm.</p> <p>La paraffina è il PCM più adatto a questo prodotto.</p>	
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ● ○	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ● ○
	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ● ○	



FACCIATA TRESLUCIDA COMPOSTA DA PCM

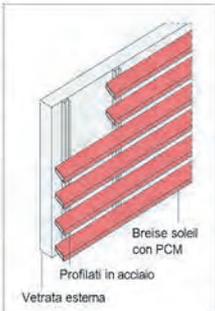
Nome Prodotto	GLASSX Crystal	
Casa Produttrice	GLASSX	
Caratteristiche	<p>Il PCM è stato inserito direttamente nell'elemento di facciata, tra i composti chimici che lo vanno a costituire; così facendo si rende il prodotto più efficace a livello termico rispetto a qualsiasi tipo di elemento opaco.</p> <p>I sali idrati sono il PCM più adatto a questo prodotto.</p>	
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ● ○	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ● ○
	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ● ○	



The First BIPV Building in Japan

ELEMENTI FRANGISOLE CON PCM

Nome Prodotto	Breise soleil con PCM integrati	
Casa Produttrice	-	
Caratteristiche	<p>Il PCM può essere sia inserito nell'elemento breise soleil traslucido tra i composti chimici che lo vanno a costituire, così come potrebbe essere contenuto in appositi contenitori di plastica e inserito per moduli nel componente stesso.</p> <p>Sali idrati e paraffina sono adatti a questo prodotto.</p>	
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ● ● ● ● ● ○	 MANUTENZIONE COMPONENTE ● ● ● ● ● ○
	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ● ● ● ● ● ○	



Centro ricerche Rockwool

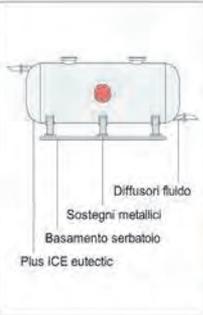
SISTEMI TECNOLOGICI DI CLIMATIZZAZIONE



ESEMPI DI APPLICAZIONI

SERBATOIO ACCUMULATORE DI CALORE PER IMPIANTI DI COLLETTORI SOLARI

Nome Prodotto	Plus ICE eutectic		
Casa Produttrice	EPS		
Caratteristiche	Il PCM è contenuto all'interno di un serbatoio che accumula il calore dell'acqua calda prodotta dai collettori solari durante la fase di soleggiamento e lo rilascia quando il collettore è in regime di non funzionamento. Le soluzioni eutettiche si adattano a questo prodotto.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ●●●●○	 MANUTENZIONE COMPONENTE ●●●●○	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ●●●●○



Stabilimento Eidos a Torino



Gotzkowskystraße in Berlin



Solar House



AVAX Offices Building



Biblioteca Centrale a Phoenix



Sustainable Built Environments

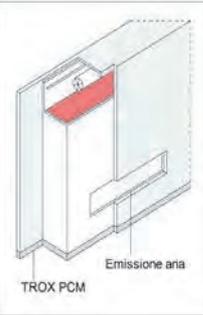
SERBATOIO DI REFRIGERAZIONE ACCUMULATORE DI ENERGIA

Nome Prodotto	STL CRISTOPIA		
Casa Produttrice	CRISTOPIA		
Caratteristiche	Il PCM è contenuto all'interno di sfere con diametri variabili da 77 mm a 98 mm poste in serbatoi dalla capacità variabile. Lo scambio termico tra le sfere ed il sistema si attua per l'intermediazione di un fluido circolante nel serbatoio. I PCM adatti al prodotto sono le soluzioni eutettiche.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ●●●●○	 MANUTENZIONE COMPONENTE ●●●●○	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ●●●●○



VENTILCONVETTORE CON PCM

Nome Prodotto	TROX PCM		
Casa Produttrice	TROX Technik		
Caratteristiche	E' un ventilconvettore costituito da una batteria di scambio termico aria/acqua, un ventilatore, un filtro dell'acqua, una vaschetta per la raccolta della condensa e un contenitore per tutti i tipi di PCM macroincapsulati.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ●●●●○	 MANUTENZIONE COMPONENTE ●●●●○	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ●●●●○



VENTILCONVETTORE CON PCM

Nome Prodotto	Ecophit GCLC		
Casa Produttrice	SGL GROUP		
Caratteristiche	E' un ventilconvettore costituito da una batteria di scambio termico aria/acqua, un ventilatore, un filtro dell'acqua, una vaschetta per la raccolta della condensa e dei pannelli misti PCM - Grafite. I PCM adatti a questa applicazione sono quelli organici microincapsulati.		
Requisiti	 FACILITÀ DI APPLICAZIONE ●●●●○	 MANUTENZIONE COMPONENTE ●●●●○	 COMPATIBILITÀ CON ALTRI MATERIALI ●●●●○

