

1. ESTADO DEL ARTE

1.1. INTRODUCCIÓN

Debido a que la energía térmica necesaria para que un material cambie de fase es relativamente alta, se ha buscado recientemente aprovechar ese potencial para utilizarlo en el almacenamiento de calor. Los materiales empleados para tal efecto son denominados “materiales de cambio de fase” o “PCM” que corresponde a sus siglas en inglés (phase change materials).

1.2. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA

Una manera de reducir las desventajas o inconvenientes derivadas del desfase entre la oferta y la demanda de energía en un edificio es mediante el almacenamiento de energía térmica. Las tecnologías existentes para ello son:

- Almacenamiento en forma de calor sensible (agua, rocas) utilizando el aumento o reducción de temperatura para el almacenamiento de energía.
- Almacenamiento en forma de calor latente (hielo, parafinas, hidratos de sal), aprovechando el elevado valor de la entalpía del cambio de fase.
- Almacenamiento por medio de reacciones químicas endotérmicas o exotérmicas reversibles.

El uso del almacenamiento térmico tiene las siguientes ventajas[2]:

- Puede conservar la energía derivada de muchas fuentes que de otra forma se desperdiciaría: energía solar, calor residual de los equipos y procesos, calor proporcionado por la infiltración de aire caliente y los ocupantes. El principio se puede aplicar tanto a la calefacción como a la refrigeración.

- Suaviza las puntas y los valles de demanda de energía, estableciéndose una relación más homogénea entre la oferta y la demanda. Como resultado, la inversión y los costes de operación de las instalaciones para la producción de frío y/o calor, su transmisión y distribución se pueden reducir y el rendimiento del sistema mejorar.

En 1983 Abhat [1] realizó una clasificación de sustancias de cambio de fase usadas para el almacenamiento térmico (Figura 1)

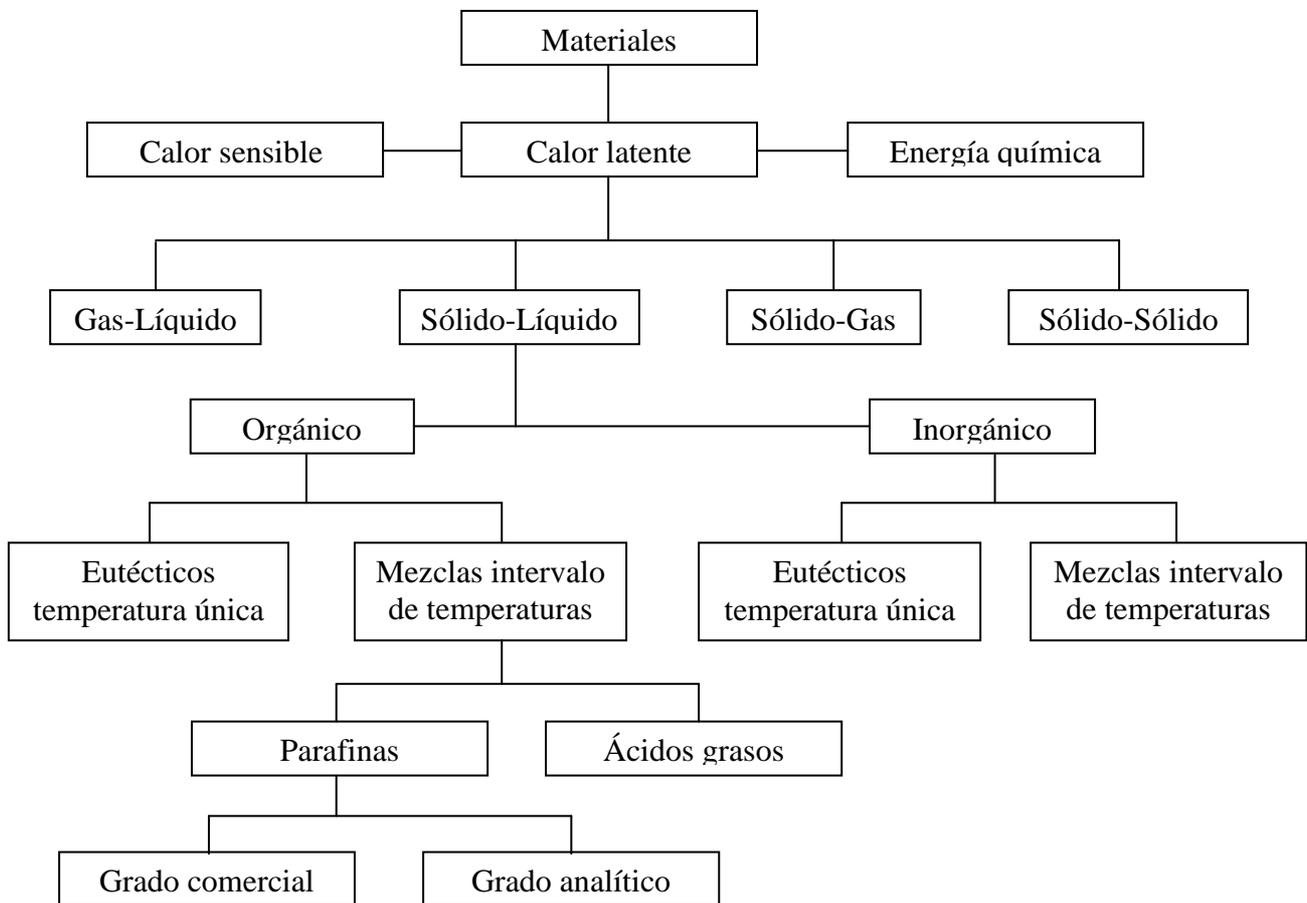


Figura 1. Clasificación de sustancias de cambio de fase según Abhat

1.3. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

El calor latente es la energía necesaria para el cambio de fase de un material y en general presenta mayor densidad de energía que el calor sensible. Hay tres tipos de cambio de fase: sólido-sólido, sólido-líquido y líquido-gas. El cambio de fase líquido-gas es el de mayor densidad de energía, pero la expansión volumétrica involucrada presenta inconvenientes técnicos. Por otro lado, el cambio de fase sólido-sólido presenta la menor densidad de energía. El cambio de fase sólido-líquido presenta alta densidad de energía y tiene poca expansión volumétrica, convirtiéndolo en el más conveniente ([3],[4]). Un sistema de almacenamiento de energía con materiales de cambio de fase tiene un volumen inferior a uno de calor sensible [5] y el proceso se produce en un estrecho rango de temperaturas [6].

1.4. MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (PCM) EN LA EDIFICACIÓN

Ya en 1975 Telkes [8] y Lane en 1986 ([9], [12]) publicaron sobre el uso de PCM en la edificación y el uso de componentes estructurales para el almacenamiento térmico se señaló en 1975 por Barkmann y Wessling [13], y por otros autores ([2], [3]).

La temperatura interior en un edificio depende de las condiciones exteriores, interiores y de las características térmicas de la edificación, como la capacidad térmica de los materiales, que tiene un efecto como el mostrado en la figura 2.

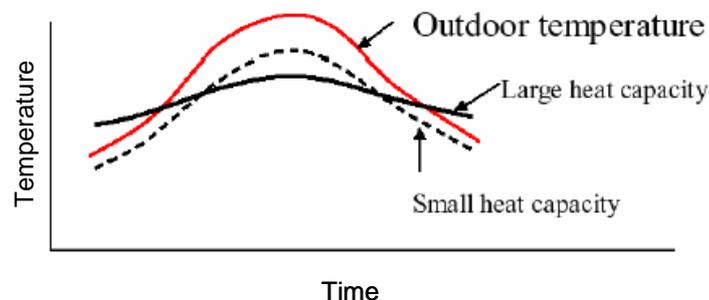


Figura 2. Estabilización de la temperatura interior de un edificio por el efecto de la inercia térmica [15]

Con el fin de mantener bajo el peso del edificio, actualmente la mayoría de los materiales de construcción son livianos, lo que trae como consecuencia una baja capacidad calorífica. La introducción de materiales de cambio de fase puede aumentar la inercia térmica del edificio, sin modificar su peso. Sin embargo, es necesario disponer de área de transferencia de calor suficiente para liberar esa energía [14] y es imprescindible que se pueda descargar el material por medio de la ventilación durante la noche[15].

La Figura muestra una comparación entre el espesor de material requerido para obtener la misma capacidad térmica que la obtenida con un centímetro de PCM:

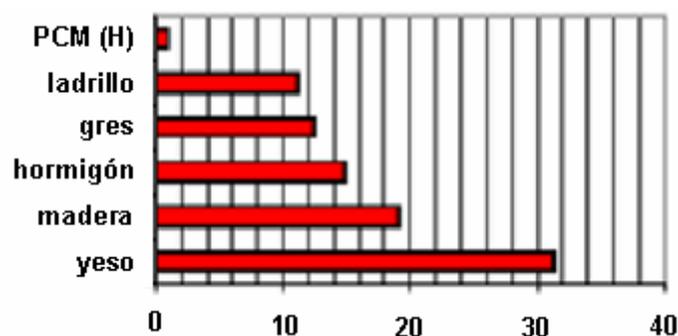


Figura 3. Espesor requerido de distintos materiales para obtener la misma capacidad térmica [15].

Las características requeridas para el empleo de materiales de cambio de fase en la edificación son:

- Temperatura de cambio de fase entre 20 y 27°C
- Alta estabilidad a los ciclos de cambio de fases debido a la larga vida útil de los edificios.
- No corrosivos para reducir el riesgo de fuga de su contenedor y evitar daños en la estructura del edificio.

Una limitación de los PCM para su aplicación en la construcción es la estacionalidad, pues el PCM debe ser seleccionado para aplicaciones de sólo refrigeración o de calefacción. Esta limitación reduce los beneficios térmicos, el ahorro energético y su viabilidad económica. Pasupathy y Velraj [115] estudiaron un concepto de doble capa de PCM para que funcionara durante todo el año.

1.4.1. Clasificación

Sharma y Sagara [10] presenta una clasificación detallada de los materiales de cambio de fase (figura 4).

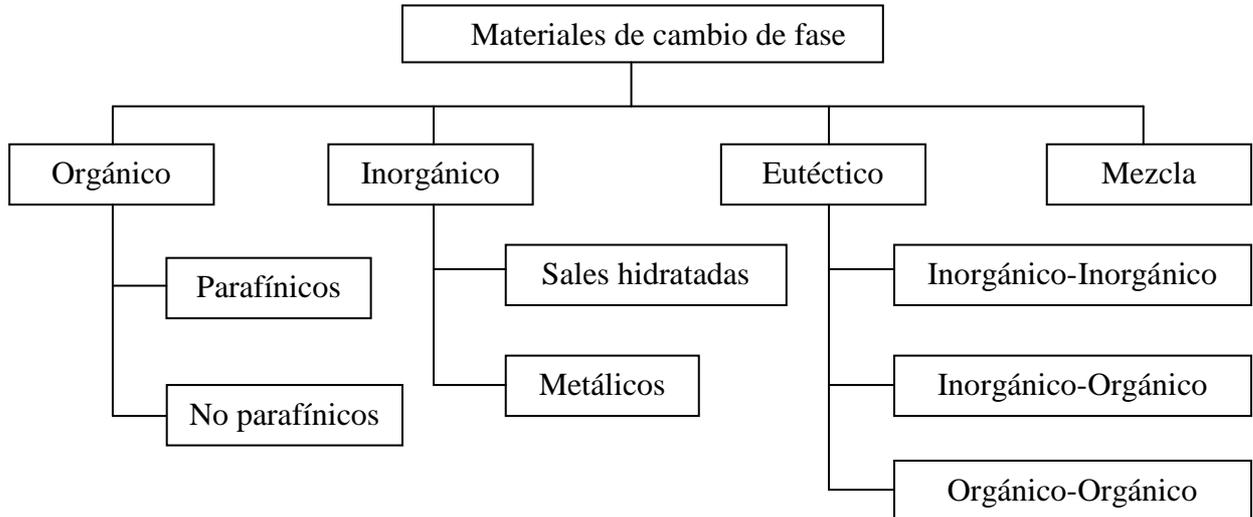


Figura 4. Clasificación de los materiales de cambio de fase [10].

- **Orgánicos:** Estos a su vez son clasificados como parafínicos y no parafínicos. Las principales características son: fusión congruente (cuando un sólido funde dando un líquido de igual composición), autonucleación y por lo general no corroen los materiales que lo contienen. La cera de parafina es altamente estable a los ciclos de congelación y fusión, tiene baja reactividad, baja histéresis y está clasificada como no tóxica. Además, puede ajustarse un amplio rango de temperaturas de cambio de fase. El principal inconveniente es su inflamabilidad.
- **Inorgánicos:** Se clasifican en sales hidratadas y metálicos. Tienen un elevado calor latente por unidad de masa, son más baratos que los orgánicos y no son inflamables. Mantienen la temperatura constante durante todo el proceso de cambio de fase, pero tienen desventajas como el subenfriamiento y la segregación que pueden hacer cambiar sus propiedades y una elevada histéresis.

1.4.2. Propiedades termo-físicas de los PCM

Zalba et al.; Sharma y Sagara; y Kenisarin y Mahkamov; presentaron una extensa revisión de los materiales de cambio de fase para distintas aplicaciones. ([7], [10], [22]-[24]). La Figura presenta sus propiedades generales en términos de punto de fusión y su rango y calor específico y entalpía. Una comparación de las ventajas y desventajas de los materiales orgánicos e inorgánicos se muestra en la Tabla 1.

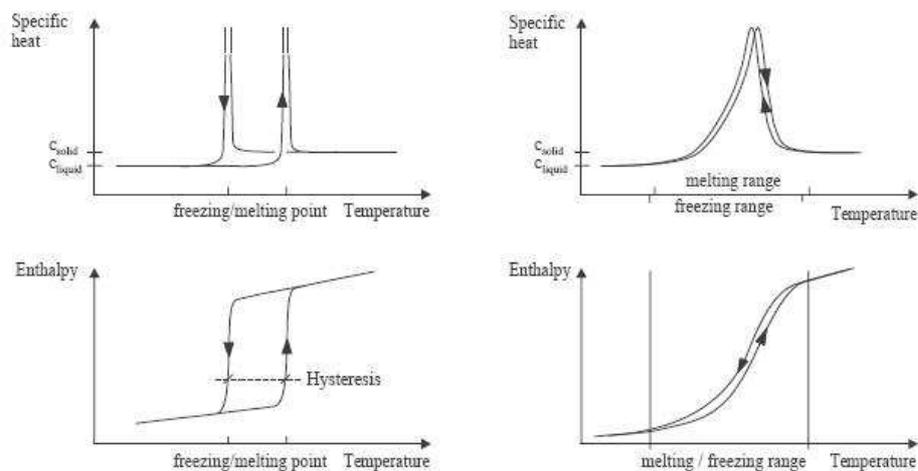


Figura 5. Comportamiento general de los PCMs en términos del calor específico y entalpía. En la izquierda los inorgánicos y en la derecha los orgánicos. [25].

Tabla 1. Comparación de materiales orgánicos e inorgánicos

Orgánicos	Inorgánicos
<i>Ventajas</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - No corrosivos - Bajo o inexistente subenfriamiento - Estabilidad térmica y química 	<ul style="list-style-type: none"> - Superior entalpía de cambio de fase
<i>Desventajas</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Menor entalpía de cambio de fase - Baja conductividad térmica - Inflamable 	<ul style="list-style-type: none"> - Subenfriamiento - Corrosivos - Separación de fases - Segregación de fases y carece de estabilidad térmica

1.4.2.1. Estabilidad

Múltiples estudios han demostrado la estabilidad de los PCM a base de parafina frente a múltiples ciclos de fusión y solidificación, sin que se presenten cambios en sus propiedades. [36]-[38], [40], [41].

Por otra parte, las sales hidratadas presentan problemas de segregación y subenfriamiento [12] ante el sometimiento a un número elevado de ciclos. Se investiga en la inclusión de agentes espesantes [35], para disminuir la segregación, y nucleantes para reducir el subenfriamiento [47].

Se ha estudiado también ([42]-[46]) la utilización de las sales hidratadas en contacto directo con un fluido de transferencia de calor inmiscible. La agitación causada por el fluido de transferencia de calor minimiza el subenfriamiento e impide la formación de la fase de segregación [19].

1.4.2.2. Corrosión e inflamabilidad

La tabla 2 presenta diferentes combinaciones de PCM en contacto con metales y plásticos señalando los problemas de corrosión. ([26]-[34]).

Tabla 2. Posibles problemas de corrosión entre diferentes PCM y otros materiales

PCM	Metales	Plásticos
Sales eutécticas	Posible corrosión	Compatible
Sales hidratadas	Posible corrosión	Compatible
Ácidos grasos	Posible corrosión	Compatible
Orgánicos	Compatible	Posible corrosión

Los estudios de inflamabilidad se centran en la utilización de aditivos retardantes, generalmente compuestos orgánicos halogenados [48], [49]. Otros enfoques son:

1. Estado del arte

- Colocación de una superficie no inflamable sobre el PCM.
- Tratamiento secuencial del yeso: primero se aplica una impregnación de PCM y luego un líquido insoluble ignífugo. Este último desplaza parte del PCM y otra parte permanece en la superficie resultando yeso autoextinguible.
- El uso del hexadecano bromado y octadecano como PCM. Cuando estos compuestos halogenados se combinan con el óxido de antimonio del yeso, el producto se convierte en autoextinguible.

Koschenz y Lehmann y [25] desarrollaron un panel de techo que incorpora parafina microencapsulada en una cama de yeso cubierta por una bandeja de chapa de acero que garantiza un cierto nivel de resistencia al fuego.

1.4.2.3. PCM comerciales y usados en la edificación

Tabla 3. Propiedades térmicas de los PCM candidatos para aplicación en la edificación.

PCM	Punto de fusión (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Referencia
PCM Inorgánico			
KF·4H ₂ O Potassium fluoride tetrahydrate	18.5-19	231	[1], [11], [23], [51]
CaCl ₂ ·6H ₂ O Calcium chloride hexahydrate	29.7	171	[11], [3], [23], [52]
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25.8	125.9	[14], [23]
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	296	[23]
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32	251	[1], [2], [23], [51]
66.6% CaCl ₂ ·6H ₂ O 33.3% MgCl ₂ ·6H ₂ O	25	127	[23]
48% CaCl ₂ 4.3% NaCl 0.4% KCl 47.3% H ₂ O	26.8	188	[1], [23]

47% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 53% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	136	[1], [23]
60% $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 40% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	30	200.5	[23], [53]
PCM Orgánico			
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COO}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$ Butyl stearate	18-23	140	[11], [2], [23]
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OH}$ Dodecanol	17.5-23.3	188.8	[11]
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_3$ Tech. Grade octadecane	22.5-26.2	205.1	[11]
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOC}_3\text{H}_7$ Propyl palmitate	16-19	186	[11]
45% $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$ 55% $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$ 45/55 Capric-lauric acid	17-21	143	[11], [2], [23]
Paraffin $\text{C}_{16}\text{-C}_{18}$	20-22	152	[23], [54]
Dimethyl sabacate	21	120	[23], [55]
Polyglycol E 600	22	127.2	[3], [23],[52]
Paraffin $\text{C}_{13}\text{-C}_{24}$	22-24	189	[1], [23]
34% Miristic acid 66% Capric acid	24	147.7	[23], [52]
1-Dodecanol	26	200	[2], [23]
Paraffin C_{18} (45-55%)	28	244	[1], [23]
Vinyl stearate	27-29	122	[23], [55]
Capric acid	32	152.7	[3], [23], [52]

Tabla 4. PCM comerciales utilizados en la edificación.

PCM	Producto	Punto de transición (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Source	Referencia
Latest™20T	Inorganic salt	19-20	175	TEAP	[56]
ES21	-	21	150	EPS	[57]
A22	-	22	172	EPS	[57]
RT 20	Paraffin	22	130	Rubitherm GmBH	[58]
SP 22 A4	Salt hydrate	22	165	Rubitherm GmBH	[58]
Climsel C22	Salt hydrate	22	216	Climator	[59]
A23	-	23	170	EPS	[57]
E23	-	23	155	EPS	[57]

Climsel C24	Salt hydrate	24	108	Climator	[59]
DC-24	Salt hydrate	24	158	Dörkern	[60]
A25	-	25	172	EPS	[57]
E25	-	25	167	EPS	[57]
SP 25 A8	Salt hydrate	25	180	Rubitherm GmBH	[58]
Latest™25T	Inorganic salt	24-26	175	TEAP	[56]
E27	-	27	180	EPS	[57]
STL 27	Salt hydrate	27	213	Mitsubishi chemical	[23], [61]
S27	SALT hydrate	27	207	Cristopia	[23], [62]
A28	-	28	245	EPS	[57]
PX 27	Paraffin	28	112	Rubitherm GmBH	[58]
RT 27	Paraffin	28	179	Rubitherm GmBH	[23], [58]
GR 27	Paraffin	28	72	Rubitherm GmBH	[58]
Climsel C28	Salt hydrate	28	126	Climator	[59]
TH 29	Salt hydrate	29	188	TEAP	[23], [56]
Latest™29T	Inorganic salt	28-30	175	TEAP	[56]
E30	-	30	201	EPS	[57]
RT 31	Paraffin	31	168	Rubitherm GmBH	[23], [58]
Climsel C32	Salt hydrate	32	194.4	Climator	[23], [59]
Latest™32S	Inorganic salt	31-32	200	TEAP	[56]

1.5. APLICACIONES DE LOS PCM EN LA EDIFICACIÓN

1.5.1. Modificación de la carga punta

La inercia térmica puede modificar la carga punta de la refrigeración reduciendo su valor y desplazando su aparición a horas que corresponden a un consumo eléctrico valle ([92], [93], [94]) pudiendo ejercer un efecto de aumento de la eficiencia energética.

Nagano et al. [95] estudió un sistema de aire acondicionado utilizando PCM (fusión a 20°C). Los resultados simulando un edificio de oficinas mostraron que el 89% de la carga diaria de enfriamiento podría ser almacenada durante la noche con un sistema “packed bed of granular PCM” (PCM granular embebido). Sin embargo, se presentó un deterioro en el control de la temperatura de la habitación que se podría haber solucionado mediante la variación del caudal de aire.

Halford y Boehm [96] estudiaron la modificación de la carga punta de refrigeración mediante el uso de PCM encapsulado en el falso techo o en el aislamiento de los muros en una configuración en la que el PCM se encuentra entre dos capas de aislamiento llamada RCR (resistencia, capacidad, resistencia). Dependiendo del rango de temperatura de la pared interna, la reducción máxima de la carga máxima es de aproximadamente 11-25% en comparación con el mismo sistema pero sin cambio de fase, y alrededor de 19-57% en comparación con un sistema convencional. La eficacia del material está limitada por la solidificación.

Zhang et al. [97] desarrolló un muro prefabricado térmicamente mejorado utilizando PCM para reducir la demanda punta de aire acondicionado en edificios residenciales. El método de macroencapsulación redujo la inflamabilidad de la pared y eliminó el problema de transferencia de humedad a través de la envuelta. Los resultados experimentales mostraron que los flujos de calor máximo se redujeron hasta un 38%, y la carga de refrigeración del 8,6% al 10,8%. La curva de carga se suavizó y la humedad relativa del aire en el interior no aumentó.

1.5.2. Enlucidos impregnados en PCM

Feldman et al. [98] probaron un muro con PCM a tamaño real en dos habitaciones idénticas; una con un muro con enlucido de yeso normal y otra con una pared de yeso impregnado con PCM (50% butil estearato y 48% palmitato de butilo). Resultó que la habitación con PCM presentaba un mejor comportamiento térmico tanto para calefacción como para refrigeración. La calidad del aire en relación con los compuestos orgánicos volátiles era similar en las dos habitaciones.

En 1997 Athienitis et al. [99] estudió experimentalmente y numéricamente el comportamiento del PCM embebido en yeso (25% en peso de estearato de butilo) en una celda de ensayo exterior. Ellos demostraron que así se puede reducir la temperatura máxima del aire interior unos 4°C durante el día y aumentar la temperatura de la superficie de la pared en la noche 1.5°C durante el proceso de fusión (7-11 horas). Estos efectos pueden reducir significativamente la carga de la calefacción por la noche.

Fang y Zhang [100] desarrollaron un nuevo material compuesto por una mezcla de un PCM orgánico con una montmorillonita modificada orgánicamente. Ellos fabricaron y probaron varias placas de yeso con PCM en 4 celdas de 70x70x70 mm, cinco caras estaban compuestas por yeso convencional y una, la de la parte superior, de yeso impregnado con PCM, en concentraciones de 0%, 20% y 50%. Los resultados mostraron una reducción de la temperatura interior máxima con el uso de los PCM de 40°C en la celda sin PCM, 35°C en la celda con 20% de PCM y 31°C en la de 50%.

Schossig et al. [101] desarrollaron un microencapsulado de PCM, que permite una fácil aplicación, buena transferencia de calor y no requiere un sistema que lo proteja de daños en su superficie (Figura 6). Realizaron un montaje experimental para probar dos PCM diferentes. En los resultados se encontró un retraso de una hora en la ocurrencia de la temperatura punta (Figura 7), y un aumento del confort térmico. La principal limitación del sistema es la descarga del calor del PCM en la noche.

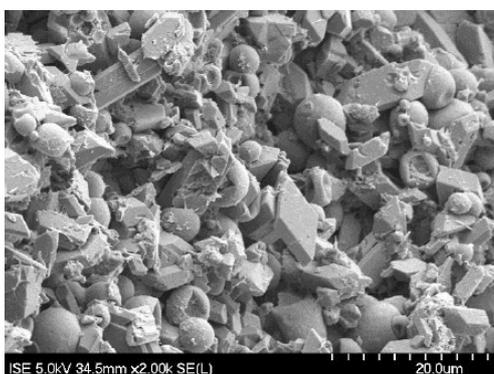


Figura 6. SEM-picture of microencapsulated PCM in gypsum [101].

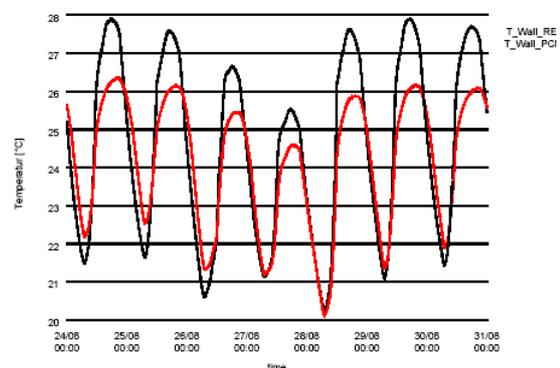


Figura 7. Wall-temperatures with night ventilation and shading [101].

Ahmad et al. [102] estudiaron experimentalmente el comportamiento de muros con tres tipos de enlucidos que contienen PCM: Un panel de policarbonato relleno con parafina granulada, un panel de policarbonato relleno con polietilenglicol PEG 600 y un panel de PVC relleno con PEG 600 acoplado a un panel de aislamiento vacío (VIP vacuum insulation panel) (Figura). En el primer caso, la baja conductividad térmica redujo el calor almacenado durante la operación. Este problema se resolvió para el segundo caso, pero aparecieron grietas en el panel. Por último, la estabilidad estructural se logró mediante el uso de PEG y paneles VIP.

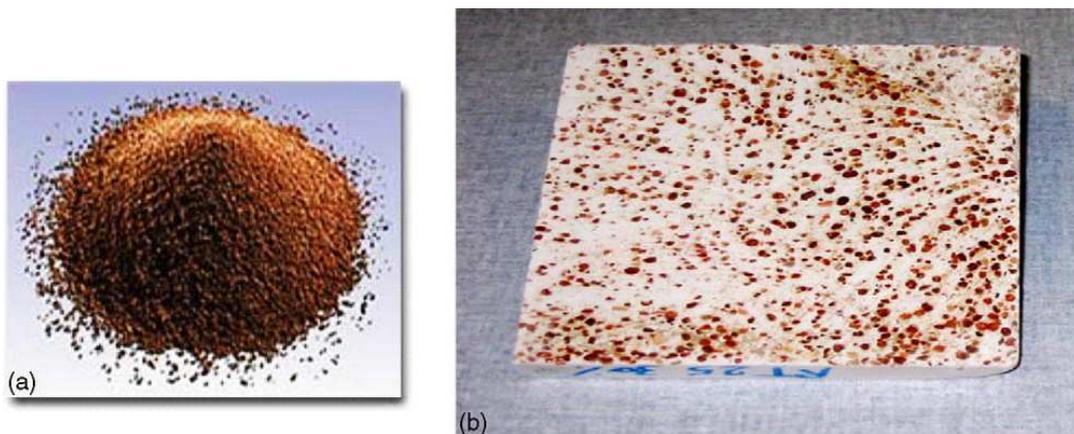


Figura 8. (a) Granulates filled with paraffin and (b) gypsum-granulate sample [102].

1.5.3. Bloques de hormigón térmicamente activos

La impregnación de PCM en hormigón se propone como una solución al cambio de fase incongruente (aparición de fases de composición diferente a la del PCM original) [104]. Los beneficios de la utilización de PCM en hormigón dependen de la cantidad de PCM absorbido. Es muy importante la estabilidad del PCM en el hormigón a lo largo de su vida útil. Por ello, se han probado varios materiales ([105]-[107]).

Khudair [109].impregnó con parafina RT20 yeso, hormigón y agregados de piedra pómez logrando suavizar la fluctuación diaria de temperatura del aire interior manteniendo las condiciones de confort. Los materiales PCM pueden ser instalados con las mismas técnicas y equipos utilizados para los materiales de construcción convencionales.

Otra técnica consiste en introducir directamente el PCM en los huecos de los bloques de construcción. Salyer et al. [110] desarrolló algunos métodos para contener el PCM y los aplicó a bloques de construcción huecos. También desarrolló una nueva composición (K-18/HDPE/EVA/ABS mezcla-fundida) [111], que puede ser mezclada mecánicamente para formar pellets secos que contienen PCM. En los huecos de los bloques de hormigón se pueden introducir una gran cantidad de pellets PCM/HDPE, PCM/sílice en polvo, o PCM-fundida.

Lamberg et al. [112] estudió numéricamente el efecto de la inclusión de PCM en el hormigón de la estructura y sobre elementos de hormigón para Helsinki y Lisboa. Los resultados mostraron que es necesaria la ventilación nocturna para mejorar la débil transferencia de calor entre la estructura y el aire. El efecto del PCM fue más acentuado para el caso de Lisboa que para el de Helsinki.

Castellón [113] determinó experimentalmente los beneficios de un nuevo composite, la mezcla Micronal® de BASF, con hormigón. El estudio, demostró que se pueden reducir la temperatura hasta 4°C. Ibáñez et al. [114] estudió numéricamente su comportamiento y sus resultados fueron validados experimentalmente.

1.5.4. Hormigón aligerado con madera

“Wood-lightweight-concrete”(hormigón aligerado con madera) es una mezcla de cemento, serrín, agua y aditivos. Tiene ventajas, como buen aislamiento térmico (entre 0,15 y 0,75 W/m·K), aislamiento acústico, buenas propiedades mecánicas (densidad entre 600 y 1700 kg/m³), pero un calor específico entre 0,39 y 0,48 kJ/kg·K. Se utiliza en la construcción de paredes interiores y exteriores de edificios de viviendas.

Mehling et al. [116] estudiaron la inclusión de PCM en “Wood-lightweight-concrete” (Figura 10), con la idea de aumentar la capacidad de almacenamiento térmico y obtener elementos de pared más ligeros y delgados con un mejor rendimiento térmico. El PCM elegido fue el Rubitherm granulado GR 40, 1 - 3 mm, y GR 50, 0,2 - 0,6 mm (Figura). Llegaron a que es viable la inclusión de PCM sin que las propiedades mecánicas varíen significativamente.



Figura 9. Rubitherm granulate GR 41, 1 – 3 mm [58].

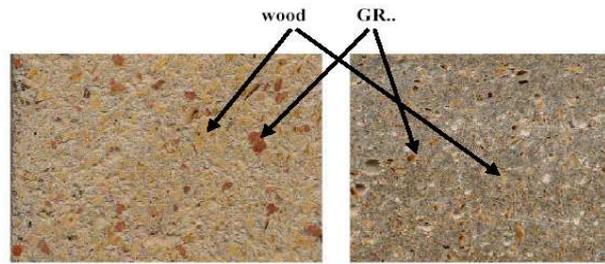


Figura 10. PCM in wood-lightweight-concrete [116].

1.5.5. Panel sandwich

El uso de PCM en panel sándwich puede constituir una solución a problemas de sobrecalentamiento en edificios ligeros. Los paneles sándwich se caracterizan por una baja inercia térmica, la adición de PCM la aumentará y permitirá que absorba el calor cuando está sometida a radiación solar.

Diferentes prototipos de paneles sándwich con PCM han sido probados y simulados. Los resultados demostraron un buen comportamiento y una gran mejora cuando se añade una capa de aire entre el PCM y el exterior ([113], [117]).

1.5.6. Ladrillos

Alawadhi [118] estudió numéricamente el comportamiento de un ladrillo con PCM para climas cálidos (Kuwait). Para la investigación, el PCM se introdujo en los orificios cilíndricos de los ladrillos, en diferentes cantidades, materiales y posiciones. Para evaluar la eficacia se comparó el flujo de calor interno en el ladrillo-PCM con el ladrillo convencional. Los resultados mostraron una reducción del flujo de calor de hasta el 24,2% cuando se utiliza la mejor configuración. Un aumento en la cantidad PCM mejoró el resultado, siendo la mejor ubicación, el centro del ladrillo.

1.5.7. Ventilación nocturna

La alta demanda de energía debida a las cargas de enfriamiento se puede reducir mediante el frío de la noche. El sistema de refrigeración gratuita (Figura) consiste en almacenar el frío durante la noche, cuando las temperaturas son más bajas, y que lo utilice durante el día para enfriar el aire de entrada al edificio ([54], [65]-[68]).

Zalba et al. ([54], [65]) diseñó y construyó una instalación para verificar el funcionamiento del PCM en un sistema con refrigeración gratuita. Diseñó un sistema real de enfriamiento y lo evaluó (Figura).

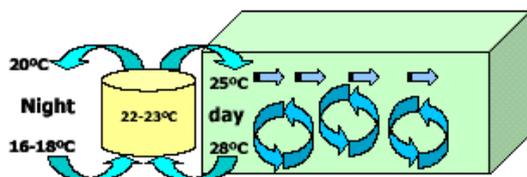


Figura 11. Concept of free-cooling [54].

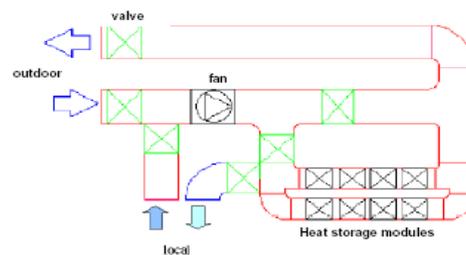


Figura 12. General outline of the free-cooling installation [54].

Para simular el comportamiento de un sistema de refrigeración gratuita se desarrolló un modelo numérico utilizando el método de los volúmenes de control y de la entalpía, así como el método diferencial normalizado [119].

Arkar et al. ([120], [121]), investigaron la eficacia de la refrigeración gratuita en un edificio pesado y otro ligero. Para ello se utilizó un sistema de ventilación mecánica con dos sistemas de almacenamiento de calor latente, uno para enfriar el suministro de aire fresco y el otro para el aire de recirculación. El sistema de almacenamiento consistía en PCM encapsulado en esferas. Se desarrolló un modelo numérico que fue validado con los experimentos realizados. Los resultados mostraron el potencial de la refrigeración gratuita con PCM para reducir el tamaño de los sistemas de ventilación mecánica, permitiendo un mayor confort además de mejorar las condiciones del aire fresco.

1.5.8. Calefacción/Refrigeración por suelo radiante

Una nueva propuesta es el uso del suelo para el suministro de aire acondicionado con sistema de almacenamiento de calor latente. La idea principal es similar a la de la refrigeración gratuita pero utilizando diferentes partes del edificio ([122]-[124]).

Esta idea fue desarrollada por Takeda et al. [122]. El frío se almacena en la estructura y el PCM granulado (Figura 13) durante la noche, el cual se incorporó a pocos centímetros bajo la superficie (Figura 14). El PCM empaquetado es poroso y puede intercambiar calor con el aire directamente.



Figura 13. Granulated PCM [122].

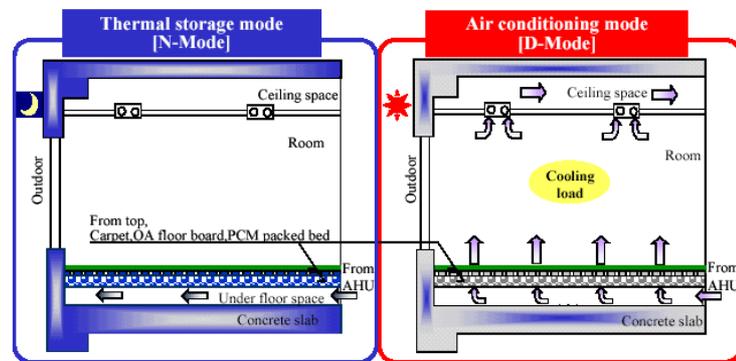


Figura 14. PCM floor supply air conditioning system [122].

Zhang et al. ([125], [126]) estudió un sistema de calefacción eléctrica de suelo radiante con PCM en placas de forma estabilizada. Simularon su comportamiento para absorber el calor de la radiación solar durante el día y liberarlo durante la noche [127]. Concluyeron:

- i) La temperatura de fusión para el PCM es aproximadamente igual a la temperatura media del aire en el interior para los días soleados de invierno.
- ii) El calor latente de fusión y la conductividad térmica del PCM debe ser mayor a 120 kJ y 0,5 W/m·K.
- iii) El espesor de la placa de PCM de forma estabilizada no debe ser superior a 20 mm.
- iv) El espesor de la capa de aire entre las placas de PCM y el suelo debe ser lo más pequeño posible.

1.5.9. Ventanas

Con el fin de reducir la ganancia solar en los edificios, y/o reducir las pérdidas y ganancias por transmisión de calor, Ismail et al. ([128]-[131]) estudiaron la posibilidad de utilizar PCM en la cámara de los vidrio dobles (la capa de aire puede ser llenada con PCM). Los resultados muestran reducciones en las ganancias solares y la transmisión de calor sin afectar de manera importante la radiación visible. Con una idea similar, Merker et al. [132] desarrolló un sistema de sombra con PCM para evitar los sobrecalentamientos alrededor de la ventana.

Buddhi y Sharma [134] midieron la transmitancia a la radiación solar de un PCM (Ácido esteárico) a diferentes temperaturas y espesores. Encontraron que la transmisividad a la radiación solar del material de cambio de fase es superior a la del vidrio y propusieron una nueva aplicación para los materiales de cambio de fase en muros/ventana a manera de aislamiento transparente.

1.5.10. Cubiertas

Koschenz y Lehmann [25] estudiaron el desarrollo de un panel de falso techo térmicamente activado para su incorporación en edificios rehabilitados. El sistema consiste en PCM microencapsulado en enlucido de yeso que se encierra entre dos chapas de acero y un sistema de tubos capilares de agua se utiliza para un control activo de la masa térmica. Desarrollaron un modelo numérico, validado experimentalmente, que predice algunos de los requisitos para el límite máximo: 5 cm de espesor del panel, una concentración de 25% en peso de PCM en el yeso y una conductividad térmica de 1,2 W/m·K (conseguido mediante el uso de aletas de aluminio).

Un sistema similar fue estudiado por Pasupathy et al. [135]. Ellos estudiaron experimental y numéricamente el comportamiento de un PCM inorgánico eutéctico incorporado en el techo en diferentes casos:

- i) Con PCM de espesor de 2,5 cm, que consiguió una temperatura constante de diciembre a abril, pero tuvo un efecto negativo de mayo a noviembre.
- ii) Con PCM de 3 cm de espesor. La utilización de más PCM no mejoró el sistema, porque el material no se alcanzaba a enfriar durante la noche
- iii) Con PCM refrigerado con agua. El sistema funcionó correctamente, pero era necesaria una gran cantidad de agua en verano.

1.5.11. Muro Trombe

Tradicionalmente, los muros Trombe funcionan con almacenamiento de calor sensible, pero el PCM da la posibilidad de un mayor almacenamiento de calor por unidad de masa.

Un muro lleno de PCM fue construido en la fachada sur de una casa al lado de una ventana. El muro se calienta durante el día por la radiación solar fundiendo el PCM. Por la noche, se retira calor para calentar la casa. Para una determinada cantidad de almacenamiento de calor, el cambio de fase requiere menos espacio que las paredes de agua o muros Trombe convencionales siendo mucho más ligeros. Para aplicaciones en muros Trombe se ha usado sales hidratadas e hidrocarburos a modo de PCM [23].

Askew [136] utiliza un panel colector hecho de una placa delgada de parafina montada detrás de un doble acristalamiento en un edificio habiendo encontrado que la eficiencia térmica es comparable a la de un muro convencional. Farouk y Guceri [137] estudiaron la utilidad del PCM instalado en el elemento interior del muro Trombe en un edificio para la calefacción nocturna utilizando una mezcla de sal de Glauber y cera SUNOCO P-116. Observó que si el PCM de la pared está diseñado adecuadamente, se eliminan algunas de las características indeseables de los muros de mampostería, con resultados comparables.

Bourdeau [138] probó dos muros colectores pasivos utilizando cloruro de calcio hexahidratado (punto de fusión 29°C) como PCM. Él llegó a la conclusión de que una pared de 8,1 cm de PCM tiene un poco de mejor rendimiento térmico que un muro de 40 cm de espesor de mampostería. Realizó pruebas experimentales y teóricas para investigar la fiabilidad del PCM para un muro Trombe ([139]-[141]) con sulfato de sodio decahidrato (punto de fusión 32°C) en la cara soleada del muro Trombe. Encontró que un muro Trombe con PCM, de menor grosor es más conveniente en comparación con un muro de mampostería ordinaria en relación con el almacenamiento de energía térmica. Knowler [142] utilizó parafina de calidad comercial con aditivos metálicos para aumentar su conductividad y la eficiencia en el muro Trombe.

Castellón et al. [143] estudiaron un muro Trombe añadido a la fachada sur para investigar si gracias al efecto del PCM se podía utilizar durante todo el año en climas mediterráneos. Los autores recomendaron utilizar el muro Trombe de abril a junio y de octubre a noviembre o diciembre.

1.6. MÉTODOS DE INTEGRACIÓN DEL PCM

El éxito de la integración de los PCM en la envuelta de los edificios requiere un buen medio de encapsulación para evitar fugas y garantizar la estabilidad estructural. El área y el coeficiente de transferencia de calor son también factores claves para la carga y descarga del PCM.

1.6.1. Directa

Consiste en añadir PCM líquido o en polvo a los materiales de construcción durante su elaboración. Es un método de integración económica. A escala de laboratorio se ha producido yeso mediante la incorporación directa de 21-22% de butil estearato de calidad comercial [144]. Una operación similar se utilizó para integrar 5% de PCM microencapsulado en hormigón ([107], [113]).

1.6.2. Encapsulado

Las ventajas y desventajas del encapsulado en diferentes geometrías, con diferentes materiales y su compatibilidad, fue estudiado por Lane [12], presentando interesantes ventajas según la aplicación.

Los procesos de cambio de fase del agua contenida en esferas ha sido estudiado experimentalmente por Eames [145], quien ha propuesto ecuaciones semi-empíricas que permiten predecir el porcentaje másico de fase sólida dentro de una esfera en cualquier momento. Bedecarrats et al. ([146], [147]) y Alloncle [148], estudiaron el proceso de cristalización de un PCM orgánico eutéctico encapsulado en esferas.

Algunos autores han presentado extensas revisiones de las técnicas de encapsulado para los PCM. ([11], [87], [149], [150]).

1.6.2.1. Microencapsulado

El microencapsulado es un proceso donde pequeñas partículas esféricas o en forma de rodillo, son encerradas en una fina película de polímeros de alto peso molecular (Figura). Las partículas revestidas pueden ser incorporadas en cualquier matriz compatible con la película de polímeros.



Figura 15 Microencapsulated PCM commercialised by BASF [17].

El microencapsulado de PCM ha sido estudiado por varios investigadores ([152], [153], [154]), Sin embargo, su aplicación está limitada por su alto costo y la alta proporción de medio encapsulante.

1.6.2.2. Macroencapsulado

El macroencapsulado es la inclusión de PCM, en algún tipo de contenedor: tubos, bolsas, bolas, paneles u otros recipientes (Figura y Figura). Estos pueden servir directamente como intercambiadores de calor o pueden ser incorporados en los elementos del edificio [157]. Su principal problema es que la relación superficie volumen tiene que ser elevada para satisfacer el flujo de calor demandado para que el cambio de fase se efectúe.

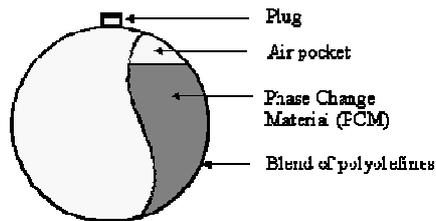


Figura 16. Spherical nodule filled of PCM developed by Cristopia [62].

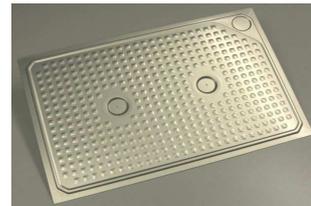


Figura 17. CSM panel developed by Rubitherm [58].

1.6.2.3. Inmersión

Consiste en sumergir el material poroso de construcción en PCM caliente derretido, que es absorbido por la acción capilar [159]. Se presentó como una alternativa a la adición de "pellets" rellenos con PCM demostrando un mayor potencial de capacidad de almacenamiento ([50], [158]). Otros procesos para incorporar el PCM en el enlucido son el empapado de PCM líquido en la pared terminada y la adición del PCM en la etapa húmeda de fabricación del yeso.

Hawes y Feldman [104] examinaron los mecanismos de absorción y establecieron las constantes de absorción de PCM en hormigón, de tal manera que se puede lograr la difusión de la cantidad deseada de PCM. Sin embargo, como Schossig et al. [101] señalaron, las fugas pueden ser un problema después de un número de años.

1.6.2.4. Forma estabilizada

En los últimos años, se ha estudiado un compuesto llamado “PCM en forma estabilizada” (shape-stabilized PCM) ([160]-[164]) que evita problemas como el elevado precio. Se compone de parafina como PCM y de HDPE (polietileno de alta densidad) o de otros compuestos como material de soporte. Dado que el porcentaje en masa de parafina puede ser hasta del 80% aproximadamente, la energía almacenada es comparable con la de los PCM tradicionales.

Inaba y Tu [160] estudiaron el rendimiento térmico de un PCM en forma estabilizada, compuesto de parafina (74% en peso) y HDPE. Ye y Ge [161] investigaron varios tipos de HDPE con diferente índice de fusión para su uso. Py et al. [162] prepararon parafina expandible con grafito en un PCM en forma estabilizada con alta conductividad térmica. Xiao et al. ([163], [164]), seleccionaron el copolímero SBS como material de soporte para formar un PCM en forma estabilizada. El contenido en peso alcanzable con este material puede llegar hasta el 80% de parafina. Zhang et al. [165] realizaron un gran número de investigaciones en este campo, ([166]-[169]), produciendo diferentes formas por extrusión.