

Análisis de los materiales de cambio de fase, como alternativa de construcciones modernas.

Ludy Tatiana Florez Rodriguez¹
ludy.florez@santoto.edu.co

Universidad Santo Tomas Seccional Tunja, Facultad de Ingeniería Civil

Resumen

En el siguiente artículo se analizan los materiales de cambio de fase utilizados energéticamente, teniendo en cuenta que en la actualidad los materiales o los sistemas construcción van evolucionando, con un objetivo el cual es mejorar la eficiencia de las edificaciones próximas con una mejor calidad y tecnología. Este artículo de revisión muestra el estudio del potencial de estos materiales, incluyendo las características de dichos materiales, la necesidad en altas medidas térmicas, se tiene como finalidad poder realizar laboratorios de características físicas, químicas, propiedades mecánicas, térmicas, su compatibilidad con otros materiales, durabilidad, etc... En la investigación se espera conseguir resultados prácticos y favorables, los cuales pueden ser de aprovechamiento investigativo para futuras practicas; con el fin generar otra alternativa como la provisión térmica en los materiales. La cual se genera durante el cambio de fase; realizando transferencia de la energía, el almacenamiento térmico y el rendimiento que se incorpora en la vida útil de los edificios, siendo utilizado con dichos materiales. Ya que será un cambio importante y un impacto ambiental Dentro de este marco de investigación se espera diseñar diferentes ensayos en los laboratorios, para los materiales de cambio de fase y así obtener diferentes resultados e identificar con cada detalle para llegar a la mejor aplicación y provecho de sus componentes. Este nuevo modelo constructivo que se propone para ser utilizado en la actualidad; ha sido comparado con otros, lo cual tiene la gran ventaja de ser una energía renovable, la cual puede cumplir con las necesidades, amigable con el medio ambiente y ser integrado arquitectónicamente en los sistemas prefabricados. Se incluye la posibilidad de tener una investigación para futuras construcciones y formar edificaciones que tengan las características necesarias, los sistemas integrados donde se puedan implementar dichos materiales, las soluciones constructivas a medida que la tecnología.

Palabras Clave: Materiales de cambio de fase, temperatura, construcciones, agregados, eficiencia térmica.

Abstract

In the following article, the phase change materials used energetically are analyzed, taking into account that at present the materials or construction systems are evolving, with an objective which is to improve the efficiency of nearby buildings with better quality and technology. . This review article shows the study of the potential of these materials, including the characteristics of these materials, the need for high thermal measurements, the purpose of which is to be able to carry out laboratories of physical, chemical characteristics, mechanical and thermal properties, their compatibility with other materials. , durability, etc ... The research is expected to achieve practical and favorable results, which can be of investigative use for future practices; in order to generate another alternative such as the thermal supply in the materials. Which is generated during the phase change; performing energy transfer, thermal storage and performance that is incorporated into the useful life of buildings, being used with such materials. Since it will be an important change and an environmental impact. Within this research framework, it is expected to design different tests in laboratories for phase change materials and thus obtain different results and identify with each detail to reach the best application and benefit. of its components. This new construction model that is proposed to be used today; It has been compared with others, which has the great advantage of being a renewable energy, which can meet the needs, friendly with the environment and be architecturally integrated in prefabricated systems. It includes the possibility of having an investigation for future constructions and forming buildings that have the necessary characteristics, the integrated systems where such materials can be implemented, the constructive solutions according to the technology.

Keywords: Phase change materials, temperature, constructions, aggregates, thermal efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace siglos se ha aprovechado la inercia térmica de los materiales para disminuir los consumos energéticos. El control térmico natural de los espacios habitables ha sido una práctica tradicional en todas las culturas. En la actualidad se están llevando a cabo nuevos experimentos basados en el calor sensible de los materiales para acondicionamiento incluso de urbanizaciones (Oliver, A., González, F. J. N., & Santos, A. G. 2012). El uso de almacenamiento de energía térmica con materiales de cambio de fase, de alta temperatura, permite aumentar considerablemente la eficiencia energética entre la producción de energía o la disponibilidad y el consumo. Esta investigación brinda a los ingenieros civiles a seleccionar un material de cambio de fase que logre la mejor solución del almacenamiento de energía térmica entre 200–400 °C y reduzca el costo de producción. Se han implementado métodos multicriterio de decisión para resolver el problema. Se han considerado propiedades características y criterios cualitativos de los materiales para asignar importancia a cada alternativa con el fin de seleccionar la mejor. Este artículo de revisión tiene como objetivo fundamental identificar que son los materiales de cambio de fase, que se ha investigado y que aspectos permanecen desconocidos. Al comunicar los resultados de una investigación de dichos materiales, fundamentalmente en la nueva era de la construcción. Es importante tener también presente que, en las instalaciones de climatización, los máximos relativos de las curvas de demanda, corresponden a las horas de temperatura más altas del día, en las cuales los rendimientos de las instalaciones de climatización son desfavorables. Se debe tener en cuenta que, por cada grado Celsius que se baje la temperatura de condensación, se disminuye aproximadamente un 3 % la producción de frío, es decir, trabajando en horas nocturnas se tiene dos importantes beneficios, uno de eficiencia energética y otro de costo de la electricidad.

Esto se puede conseguir con la acumulación de frío (Domínguez, M., & García, C. 2009). De esta forma posee grandes ventajas los materiales de cambio de fase que serán investigados con cada transformación y maneras de aprovechamiento de estos materiales. Por ello se quiere realizar una buena investigación para que se tengan buenas bases y conclusiones para ser ejecutado.

Sin embargo, estos sistemas funcionan aprovechando el calor sensible de su calentamiento o enfriamiento, lo que limita notablemente su capacidad de acumular energía, ya que nunca podrán enfriarse por debajo de la temperatura mínima del aire nocturno, ni calentar por encima de los límites que marca la energía solar captada en un corto número de horas. Por otro lado, el calentamiento o enfriamiento por conducción de los sólidos tiende a concentrar la energía en las capas más superficiales. Si bien el uso del agua resuelve ese inconveniente, por ser un fluido y aportar un mayor calor específico, el límite de la temperatura sigue existiendo, siendo muy difícil que se superen los 20 °C de cambio de temperatura. Otro de los inconvenientes de los sistemas de acumulación de energía en forma de calor sensible es que, tanto la carga, como la descarga de esa energía, se hacen a temperatura variable, ya que esa es la esencia fundamental de los sistemas sensibles, por lo que nunca funcionarán en condiciones constantes de bienestar (González, F. J. N., Román, C. A. A., García, E. H., & Frutos, C. B. 2008). Frente a este procedimiento que existe cuando los materiales toman como aprovechamiento del calor y se tienen una característica propia de todo material, pero aquellos materiales que tienen un aprovechamiento de energía se les llama Materiales de Cambio de Fase, estos tienen un proceso que lleva hasta su terminación una temperatura constante.

En aplicaciones ingenieriles, estos compuestos pueden ser utilizados para recubrir paredes de edificios con el objetivo de disminuir los cambios de temperatura, el consumo y las emisiones. En este tipo de aplicación se maximizaría también el calor almacenado, sin importar en gran medida las propiedades mecánicas del compuesto. Los materiales de cambio de fase son conocidos por el almacenamiento de energía, la cual se utiliza cuando se encuentra disponible, en un proceso de absorción y liberación cuando se requiere, existen ciertos requisitos para que se genere un buen material de cambio de fase, se caracterizan en los requisitos o condiciones físicas, que son aquellos que promueven que la temperatura de cambio de fase sea la adecuada, en los cambios químicos generando una presión de volumen pequeño, buena estabilidad física y buena compatibilidad con los demás materiales y si es importante en el día a día que vivimos tener una buena economía estos materiales también tienen que tener unos requisitos que mejores, contribuyan con esta y sean reciclable. Estos prototipos de viviendas y construcciones tienen partes importantes como la sostenibilidad, la energía, recursos y nuevos materiales que para los ingenieros puede ser de gran beneficio ya que es son materiales de muy bajo costo y con

una variedad de aplicaciones, como se muestra en este artículo.

2. GENERALIDADES – ANTECEDENTES

La principal propiedad de los materiales de cambio de fase, es el almacenamiento de energía en forma de calor latente, siendo los materiales con un mayor almacenamiento de calor que cualquier otro material utilizado en construcción. Cuando la temperatura ambiental asciende, los enlaces químicos se rompen para cambiar su estado físico de sólido a líquido. Se trata de un proceso endotérmico y como resultado se absorbe calor (Moreno Carmona, J. 2013). Cuando la temperatura desciende los materiales vuelven a cambiar de fase líquido a sólido, haciendo el proceso inverso, uniéndose de nuevo los enlaces químicos y con ello el material libera el calor absorbido. Se trata de un proceso exotérmico. Aprovechando este ciclo térmico, los materiales de cambio de fase pueden ser muy útiles para estabilizar las temperaturas interiores y reducir los picos de frío y calor influyendo en la temperatura de la superficie de la envolvente térmica, pero sin afectar a la resistencia térmica de los materiales que la conforman (Mireia Amorós García 2011). Los siguientes estudios realizados con los Materiales de Cambio de Fase utilizaron sales hidratadas. La doctora Maria Telkes, una de las pioneras junto a otros investigadores, logró el primer resultado práctico a finales de 1948, construyendo una casa de una planta de 135 m², climatizada por ocho colectores solares en cubierta. El calor se almacenaba en cinco bidones llenos de sal de Glauber. En 1953 L. Gardenhire realizó un experimento similar en Las Cruces, Nuevo Méjico. En este caso se mezcló la sal de Glauber con bórax como agente nucleador. Se le denomina Sal de Glauber a los yacimientos de sulfato de sodio bajo los 33 °C la especie mineralógica estable es la mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$). Contiene 55,9% de agua de cristalización formando cristales tipo agujas incoloro. En un experimento posterior llevado a cabo en una casa solar en Princeton, New Jersey, por R. Huley (de Curtis Wright Corp.) se añadió bórax y derivado del cromo como agentes nucleadores de la Sal de Glauber para inhibir la corrosión. Tras estos tres primeros intentos fallidos, muchos investigadores han examinado muchos aspectos de los materiales de cambio de fase y sus aplicaciones. Posteriormente, el vehículo lunar Rover, del Apollo 15, utilizó parafina como medio de almacenamiento térmico que funcionó en tres sistemas de la misión espacial en el año 1960. (Oliver, A., González, F. J. N., & Santos, A. G. 2012).

Los materiales y las soluciones constructivas que se describen a continuación se diseñaron para ser empleados como el sistema de acumulación de la energía térmica que iba a servir para el acondicionamiento de dos viviendas (según el mismo prototipo) construidas en Madrid, Washington y Pekín, con la denominación de Magic Box. Se trata del prototipo de una vivienda unifamiliar de 70 m² diseñada para participar, con su construcción en Washington, en el evento Solar Decathlon 2005, organizado por el Departamento de Energía de los EE.UU. El objetivo de este evento era diseñar, construir y monitorizar en funcionamiento real una casa autosuficiente; la construcción se efectuó a lo largo de los meses de septiembre y octubre de 2005 en Washington. Durante el tiempo que permaneció la casa construida en EE.UU., se monitorizó, obteniéndose datos muy favorables del comportamiento de las sustancias de cambio de estado durante ese periodo de tiempo. La construcción en Pekín corresponde a la partición de este mismo edificio, representado a España, en el Future House, exhibición organizada por el Ministerio de la Construcción chino donde, representando a ocho países, se mostrará lo más significativo de la tecnología vinculada a la vivienda desarrollada en el mundo. En Madrid hay construido otro modelo del mismo prototipo, donde, hasta 2008, apoyados en el proyecto de investigación HELIODOMO, se tomarán datos de su comportamiento energético, haciendo modificaciones en las sustancias de cambio de estado que se describen en este artículo con el objeto de optimizar su integración arquitectónica y su comportamiento energético (González, F. J. N., Román, C. A. A., García, E. H., & Frutos, C. B. 2008).



Fotografía 1. Foto de la vivienda durante el periodo en el que estuvo construida en Washington.

Los sistemas de acumulación de frío empleados han sido: piscinas o tanques de agua y tanque de hielo. Teniendo en cuenta los primeros conducen a grandes volúmenes, con sobrecostos, por problemas estructurales o pérdidas de superficie. La acumulación en bancos de hielo implica pérdidas de eficiencia, al tener que evaporar a temperaturas más bajas, en donde se pierde aproximadamente un 3 % por grado de temperatura de evaporación. Aparte de la problemática de necesitar, el empleo de agua glicolada en lugar de agua, lo que aumenta mucho los consumos eléctricos en los sistemas de bombeo, por el aumento considerable de viscosidad. Se puede comprender que el empleo de materiales de cambio de fase a temperaturas más altas de las del hielo, tendrá muchas ventajas técnicas y conducirá a reducir los gastos de explotación muy considerablemente y aumentar la eficiencia en las instalaciones de climatización (Domínguez y Colubret, 2005). Existen instalaciones de climatización singulares en las cuales se requieren fuentes de calor y de frío, hay otras que producen calores residuales importantes, y también hay otras en donde se podría aprovechar los calores de las propias máquinas, para cubrir las necesidades de agua caliente sanitaria (ACS) o para precalentar el agua en calderas de vapor. En general, se tiende a los aprovechamientos de las energías renovables disponibles, entre las que se encuentran: la solar, la del propio suelo o terreno y la del aire ambiente. Todas estas fuentes se podrán usar si se resuelve su gran problema, la estacionalidad o variabilidad en el tiempo. Es aquí donde los materiales de cambio de fase, conocidos internacionalmente por sus siglas en inglés como los materiales de cambio de fase, adquieren su importancia.

El margen de temperatura de cambio de fase de solidificación en la climatización, puede extenderse desde 0 °C hasta 100 °C, siendo conveniente que presenten características, tales como: mucha energía en dicho cambio, que sean estables en el tiempo y con los ciclos, compatibles con los materiales que los contienen, sin problemas de toxicidad y de bajo costo. Teniendo en cuenta todos estos condicionantes y que la temperatura sea la adecuada, se reducen mucho los materiales de cambio de fase disponibles (Zalba et al. 2003), describen los materiales de cambio de fase que se emplean actualmente, mientras que (Faustini 2007) lista abundante literatura sobre el tema. Los materiales de cambio de fase también se pueden utilizar como barreras térmicas o de aislamiento, y son particularmente útiles para sectores de la industria tales como el transporte a temperatura controlada (Liu et al 2012). Los materiales de cambio de fase por necesitar gran cantidad de calor para cambiar de estado, son idóneos por reducir espacio y mantener temperaturas constantes (Domínguez et al 2009).

3. TIPOS DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Actualmente existe un gran número de materiales cambio fase que han sido investigados, debido a que poseen una temperatura y un alto calor latente de fusión dentro del rango operacional deseado, sin embargo, exceptuando por esta característica, la mayoría de estos materiales, no satisfacen los otros criterios necesarios para un medio de almacenamiento adecuado. (Sharma, 2009). Se encuentran disponibles en el mercado, pueden ser clasificados en dos grupos: orgánicos e inorgánicos, como se muestra en la siguiente figura.

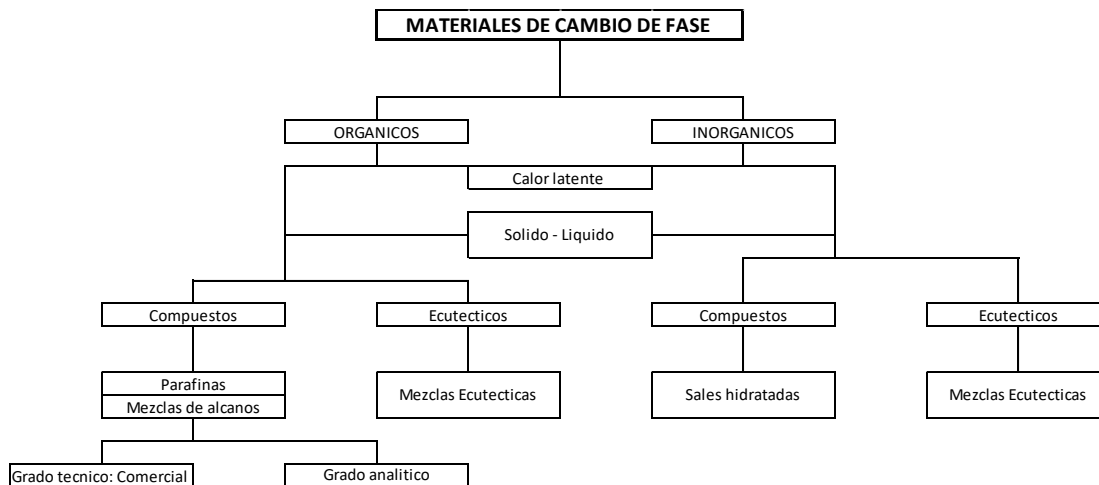


Figura 1. Clasificación de los materiales de cambio de fase. (Autor)

3.1 Materiales de Cambio de Fase Inorgánicos

3. 1. 1 sales Hidratadas

Estos materiales sales hidratadas, como la sal de Glauber fueron muy estudiados en las primeras etapas de investigación de materiales de cambio de fase, por su bajo costo y su capacidad de almacenamiento de grandes cantidades de calor por unidad de volumen, en comparación con las sustancias orgánicas, que las convierten en candidatos idóneos para sus múltiples aplicaciones en el ámbito del almacenamiento de energía solar (Oliver, A., González, F. J. N., & Santos, A. G. 2012). Los estudios ya realizados se han concentrado en la búsqueda de agentes que en la formación de los núcleos de materiales de cambio de fase y lograr eliminar así lo que se conoce como el super enfriamiento.

Dentro de esta categoría están las sales hidratadas, sales, metales y aleaciones. Materiales tales como, sulfato de sodio decahidratado ($\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), cloruro de calcio hexahidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), tiosulfato de sodio pentahidratado ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), acetato sódico trihidratado ($\text{C}_2\text{H}_9\text{NaO}_5$) e hidróxido de bario octahidratado ($\text{Ba}(\text{OH})_2$) fueron analizados ampliamente en investigaciones realizadas por (Sharma, 2009), indica las ventajas del uso de LHS como un medio efectivo de almacenar energía térmica. En la investigación realizada por (Cabeza, 2003), se analiza los sistemas TES haciendo énfasis en tres aspectos: materiales, transferencia de calor y aplicaciones. El artículo contiene una lista de alrededor de 150 materiales, presentan resultados de temperatura de fusión, entalpía de cambio de fase, conductividad térmica, densidad y calor latente (Orozco Salcedo, M. A. 2019). El análisis de los materiales se ha destacado debido a su bajo costo, también teniendo en cuenta las grandes ventajas que este posee como el alto calor al que tiene una fusión en su cambio de fase y su mejor conductividad térmica en los materiales de cambio de fase orgánicos, algunos que

son el doble que las parafinas en el caso de las sales hidratadas. En la siguiente tabla se pueden ver algunas de las ventajas y inconvenientes con los materiales de cambio de fase inorgánicos.

Ventajas	Inconvenientes
Generalmente baratos	El encapsulado y preparación para su uso ocasionan algunos problemas*
Densidad de almacenamiento térmico elevada	Su uso prolongado necesita de aditivos
Elevada conductividad térmica	Son susceptibles de subenfriamiento
Temperatura de cambio de fase claramente definida	Los aditivos utilizados para evitar una fusión incongruente reducen su capacidad de almacenamiento latente por unidad de volumen en más de un 25%
No inflamables	Potencialmente corrosivos con algunos metales
Reciclables y biodegradables	

* Las sales hidratadas absorben agua fácilmente y necesitan un encapsulado semipermeable (8).

Tabla1. Materiales de cambio de fase inorgánicos. (Oliver, A., González, F. J. N., & Santos, A. G. 2012).

Estos materiales tienen algunas propiedades atractivas como los elevados valores de calor latente, no son inflamables y su elevado contenido hídrico significa que son baratos y muy disponibles. Sin embargo, sus características de inadaptación (corrosión, inestabilidad, dificultades de resolidificación y tendencia al subenfriamiento) han conducido a la investigación de estos materiales inorgánicos, para su aplicación. Necesitan por tanto un contenedor, para utilizarlos como aditivos de otros materiales. (Oliver, A., González, F. J. N., & Santos, A. G. 2012). Existen varias publicaciones que presentan datos de la caracterización de sales; (D. Gaona, E Change 2017), caracteriza tres sales de nitrato utilizando calorimetría diferencial de barrido, encuentran resultados de temperatura de fusión, entalpía de fusión, calor específico, conductividad térmica y densidad de nitrato de sodio y nitrato de potasio; sin embargo, éstas difieren unas de otras por lo que la precisión de los resultados obtenidos depende de la realización de experimentos adicionales. A pesar de lo mencionado anteriormente, se ha establecido que la conductividad térmica aumenta con la temperatura. En la Tabla 2, se puede observar una comparación cualitativa de materiales de cambio de fase orgánicos e inorgánicos.

Elemento	Densidad kg/m ³	Calor específico kJ/kg	Calor latente kJ/kg	Masa de almacenamiento Para 106 kJ (kg)	Volumen de almacenamiento Para 106 kJ (m ³)
Roca	2240	1.0	—	67.000	30
Agua	1000	4.2	—	16.000	16
Materiales de cambio de fase - Orgánicos	800	2.0	190	5.300	6.6
Materiales de cambio de fase - Inorgánicos	1600	2.0	230	4.350	2.7

Tabla 2. Comparación de materiales de cambio de fase inorgánicos y orgánicos.

Las propiedades térmicas de algunos materiales utilizan las sales como medio de almacenamiento, en caso de las propiedades tales como la temperatura de fusión que es uno de los factores más importantes en los materiales de cambio de fase la estabilidad térmica, teniendo en cuenta lo anterior dicho en la siguiente Tabla 3. Encontramos valores ya experimentados de las sales hidratadas con temperatura de fusión a la temperatura de la cual se puede utilizar para la aplicación de construcción que ya se explicara más adelante en este artículo.

PCM	Temp. fusión (°C)	Q fusión (kJ/kg)	Referencia
KF·4H ₂ O	18,5	231	Nagano <i>et al</i>
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32,4	254	Nagano <i>et al</i>
CaCl ₂ ·6H ₂ O	24–29	192	Stritih U, <i>et al</i>
CaCl ₂ ·6H ₂ O+Nucleador+MgCl ₂ ·6H ₂ O (2:1)	23	-	Cabeza <i>et al</i>

Tabla3. Valores de sales hidratadas con temperatura de fusión, para materiales de construcción (Mayayo, J. G. 2012).

Otro tipo de materiales de cambio de fase inorgánicos son los materiales de cambio de fase metálicos, que están constituidos por los metales de bajo punto de fusión, sin embargo, el gran inconveniente de estos es su peso considerable. Presentan diferentes características tales como bajo calor de fusión por unidad de peso, alto calor de fusión por unidad de volumen, alta conductividad térmica, bajo calor específico y baja presión de vapor.

3.1.2 Eutécticos

Son materiales que están dentro de la tercera categoría de los materiales de cambio de fase, están constituidos por dos o más compuestos que se funden o congelan sin segregación, congruentemente formando una mezcla de cristales durante la cristalización. Los puntos de fusión son mínimos (A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R.Che (2009). Un sistema TES, está constituido para una aplicación específica que está determinada por la temperatura de operación del sistema. Es por esto que es importante el cambio de fase eutéctico. De esta manera, el material presenta una temperatura de fusión menor, de lo que lo hicieran los materiales por separado, adaptándose a las necesidades específicas del sistema.

Las mezclas eutécticas poseen la ventaja de tener un punto de fusión fijo, sin embargo, aunque el calor de fusión puede llegar a unos valores aceptables, su investigación en este campo es reciente, por lo que tenemos poca información sobre sus propiedades termo físicas.

3.2 Materiales de cambio de fase orgánicos:

En el grupo de los materiales de cambio de fase se encuentran las parafinas, los ácidos grasos y mezclas de ácidos grasos, estos materiales contienen ciertas características que son de resaltar y que son de importancia como químicamente inertes, confiables, estables bajo los 500°C, predecibles, presentan baja presión de vapor y no son corrosivos. Teniendo en cuenta, existen materiales que no son base parafina, están en otra categoría, que son los ácidos grasos, son materiales que presentan un alto nivel de calor, no subenfriamiento, son inflamables, inestables a altas temperaturas, presentan un riesgo de corrosión.

En los materiales de cambio de fase orgánicos tienen unas características muy útiles para los elementos constructivos ya que tienen una gran capacidad de almacenamiento de calor, Son más estables químicamente que las sustancias inorgánicas, funden y solidifican convenientemente, sin necesidad de agentes nucleadores (sustancia química para crear núcleos y formar cristales dentro del polímero) y no sufren subenfriamiento o histéresis (cuando el material de cambio de fase líquido se enfría por debajo del punto de solidificación. Esto ocurre por la formación de estructuras cristalinas durante un estado termodinámicamente metaestable). No obstante, se ha demostrado que son más compatibles y más adecuados para la adsorción en varios materiales constructivos. Aunque el su costo inicial de un material de cambio de fase orgánico es superior al de un inorgánico, su precio es competitivo siendo los ácidos grasos cuestan el doble que las parafinas (Schroeder, J. and Gawron, K. 1981). Estos materiales tienen unas desventajas ya que son inflamables y que emiten gases nocivos durante su proceso de combustión. Otra problemática que se presenta son las reacciones de los productos de hidratación en hormigón, envejecimiento por oxidación, cambios de olor y volumen que son notables.

Muchos de estos inconvenientes se han eliminado. Se ha visto que el envejecimiento por oxidación de los materiales de cambio de fase puede inhibirse utilizando un oxidante adecuado. Se está investigando también en la emisión de gases y

la inflamabilidad de algunos de los materiales de cambio de fase más efectivos, para establecer una ratio de ignición. También se está investigando sobre la compatibilidad de los materiales de cambio de fase con el hormigón. (Oliver, A., González, F. J. N., & Santos, A. G. 2012). Entre los materiales de cambio de fase orgánicos se pueden encontrar tres grupos de sustancias que son: parafinas, ácidos grasos y mezclas orgánicas, las cuales serán especificadas en este artículo.

En los materiales orgánicos también podemos destacar ciertas propiedades como:

- Tienen una buena estabilidad térmica, las parafinas no pierden las propiedades así sean sometidas a ciclos de cargas y descargas. Esto se relaciona a lo que se genera en las reacciones químicas durante el proceso de almacenamiento de calor.
- Una característica importante también es la baja corrosión de las parafinas es su poca afinidad química con los otros materiales; ya que las problemáticas que se generan en la corrosión son prácticamente inexistentes,
- Bajo impacto ambiental, las parafinas no son tóxicas para animales o plantas y no contaminan el agua, también teniendo en cuenta que son 100% reciclables.

3.2.1 Parafinas

Las parafinas por otro lado muestran dos rangos de enfriamiento: un rango más estrecho para un breve periodo de tiempo, y un rango más extenso que ocurre durante un periodo más amplio. Ambos se interpretan como una transición de líquido a amorfo-sólido y amorfo-sólido a cristalino-sólido, respectivamente. Parte del calor latente total de fusión se almacena en la sustancia durante cada una de estas transiciones. Es importante destacar la gran diferencia entre el rango de temperatura de congelación medido experimentalmente y los datos disponibles. El resultado es de gran importancia a la hora de diseñar y operar con sistemas LTES (Latent Thermal Energy Storage, sistemas de almacenamiento de calor latente), que exige un conocimiento exacto de la temperatura de cambio de fase del material de almacenamiento térmico.

También desde una vista práctica nos podemos dar cuenta que, en su aplicación en sistemas de calefacción y refrigeración pasiva, son más útiles las parafinas comerciales, ya que está en su temperatura de fusión, será evaluada experimentalmente en los artículos consecutivos a este, se evidencia que estos materiales se producen a gran escala y se utilizan en diferentes campos.

3.2.2 Ácidos grasos

Los ácidos grasos, derivados de productos animales y vegetales, están constituidos por una larga cadena alifática, más de 12 carbonos. Su cadena alquílica puede ser saturada o insaturada. La mayoría de estos poseen un número de átomos de carbono, en su construcción y demás características térmicas las cuales son punto de fusión y congelamiento, tienen una gran refrigeración, sin embargo, estudiando los materiales de cambio de fase alcoholes, Kakiuchi et al (20) encontraron que el eritritol es muy prometedor como los materiales de cambio de fase.

Se trata de un elemento simple como el hielo, porque funde congruentemente. Tiene un gran calor de fusión 320 kJ/kg, casi igual que el del hielo. El problema es la elevada densidad. Hay que destacar que el eritritol cambia de volumen durante la transición de la fase sólida a la líquida. Por eso, para el intercambio de calor se necesita una estructura fuerte o un método especial para reducir el cambio de volumen. Puede observarse también subenfriamiento. Su punto de congelación es 60-100 °C, Shukla, Buddhi et al. (Shukla, A 2003) han configurado el ensayo de ciclos de aceleración térmica del eritritol, con el que han observado, que se superenfriaba por encima de los 15 °C. En la siguiente tabla se observa que sólo el ácido cáprico —presente en pequeñas cantidades en el aceite de coco y de palma— tiene su temperatura de fusión próxima a la de confort. (Oliver, A., González, F. J. N., & Santos, A. G. 2012).

Mezcla (ácidos grasos)	Temp. fusión °C	ΔH_m kJ/kg
Cáprico	31,5	158
Laurico	42,0-44,0	179
Pentadecano	52	159
Mirístico	54,0	190
Palmitico	63,0	183
Esteárico	70,0	196
Eritrol	116-118	126

Tabla 4. Características térmicas de algunos ácidos grasos. (Oliver, A., González, F. J. N., & Santos, A. G. 2012).

3.2.3 Mezclas de ácidos grasos

Las mezclas de ácidos grasos son más atractivas para fabricar y comercializar que las mezclas eutécticas. Así Feldman, Shapiro et al. (Feldman, D) han investigado muchas composiciones basadas en los compuestos de ácidos grasos producidos por Henkel Canada. Se ha investigado cientos de composiciones basadas en compuestos de ácidos, algunas de las mezclas de ácidos grasos tienen una fuente de olor, por lo cual se han destinado para que se trabajen en materiales de cambio de fase que se incorporan en paneles. Un trabajo desarrollado por Peippo K. que consistía en buscar un proceso que podría utilizarse para elegir los materiales de cambio de fase con un punto de fusión predecible para ajustarse a la temperatura óptima de aplicación. Esta investigación se hizo primero con el rango de ácidos grasos.

Las propiedades térmicas de varias mezclas binarias de ácidos grasos fueron investigadas para determinar el punto eutéctico de la mezcla. En este punto la mezcla se funde isotérmicamente. (Oliver, A., González, F. J. N., & Santos, A. G. 2012). Dentro del grupo se encuentra los materiales con cambio de fase constituidos por aleaciones moleculares, formados por relaciones a base de alcanos, que tienen la ventaja de ser termino ajustables, es decir, que permiten modular la temperatura de cambio de fase a partir de su composición. Expertos del REALM en Cristalografía, Termodinámica y otras disciplinas trabajan complementariamente en la definición de estos criterios: grado de homeomorfismo molecular, grado de isomorfismo cristalino, noción de familia, temperatura característica, correlaciones entre magnitudes cristalográficas y termodinámicas.

4 REQUISITOS PARA SER UTILIZADO COMO MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Se recogen algunas características deseables en los materiales de cambio de fase, se tiene que tener en cuenta que ningún material es de composición perfecta, habrá que adoptar una solución de compromiso a la hora de elegir el material de cambio de fase apropiado.

4.1 Propiedades térmicas

- Mantener un rango estable de temperatura de cambio de fase, el valor de la temperatura es la propiedad más importante en la hora de seleccionar un material de cambio de fase y que nos facilite su aplicación.
- Una buena conductividad térmica alta en ambas fases, sólida y líquida, en la realidad esto es bastante complicado de encontrar, por esto se trabaja con materiales compuestos que no generen una disminución en la capacidad de almacenar energía.
- La baja variación de volumen en el cambio de fase y baja presión de vapor a la temperatura de funcionamiento
- La fusión congruente del material de cambio de fase con cada ciclo de solidificación – fusión, cambio de fase continuo con termino de vida útil.

4.2 Propiedades físicas

- Una característica de las propiedades físicas es la alta densidad, ya que implica menos volumen por unidad de masa y por lo tanto aumenta la capacidad de almacenamiento para un mismo tamaño.
- Fusión del material ya que este produzca la segregación del material por la diferencia de densidad que presentan variaciones de composición del material a largo plazo.
- Densidad con variaciones entre las fases y variaciones pequeñas de volumen que se generan al pasar de un estado al otro, pero esto genera una disfunción en sus dimensiones.

4.3 Propiedades químicas

- Los materiales de cambio de fase presentan una estabilidad como propiedad química, para que en la aplicación cuando son sometidos a variaciones de carga, al trabajar un material que no sea de facilidad de degradación.
- La estabilidad química en el sistema de los materiales de cambio de fase, es de gran importancia, ya que genera dos componentes del equipo no tengan afinidad química para que no se genere una reacción al entrar en contacto con este, importante que no genere el material ninguna reacción química como la corrosión.
- Tiene un ciclo de solidificación – fusión reversible y completo
- La baja degradación después de un elevado número de ciclos de fusión – solidificación, ya que también no es corrosivo para los materiales encapsulados

4.4 Propiedades cinéticas

- Debe poseer un subenfriamiento pequeño en la fusión, es decir, que no necesite aporte de frío adicional para que se inicie la fusión. Para ello se utilizan agentes nucleantes sobre los materiales de cambio de fase.

4.5 Propiedades económicas

- Otra característica importante a la hora de seleccionar los materiales de cambio de fase es que sea de bajo costo, elevada disponibilidad y que no presente problemas ni limitaciones medioambientales.

5 FUNCIONAMIENTO DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

La mejor forma para explicar el funcionamiento de estos materiales, es estudiando el proceso de cambio de fase del agua: en estado líquido, el agua va aumentando su temperatura progresivamente hasta alcanzar los 100°C. Una vez alcanza esta temperatura, empieza su cambio de estado en el cual absorberá calor, pero mantendrá una temperatura constante de 100°C hasta que finalice su cambio de fase y todo el líquido se haya convertido en vapor (Sarabia Méndez, D. 2020).

De manera inversa ocurre cuando la temperatura del agua disminuye hasta alcanzar los 0°C. En este caso, el agua empezará a liberar calor y durante este proceso, mantendrá su temperatura constante en 0°C hasta que complete su solidificación y todo el líquido se haya convertido en hielo. (B. Zalba, J. Marin, L. Cabeza y H. Mehling, 2003) En la Figura 2.1, se observa cómo la temperatura se mantiene constante en 0°C formando una recta horizontal durante su cambio de fase y posteriormente en 100°C hasta que se convierte en vapor. Figura 2: Diagrama de proceso de cambio de fase Hielo – Vapor. Fuente: (B. Zalba, J. Marin, L. Cabeza y H. Mehling, 2003).

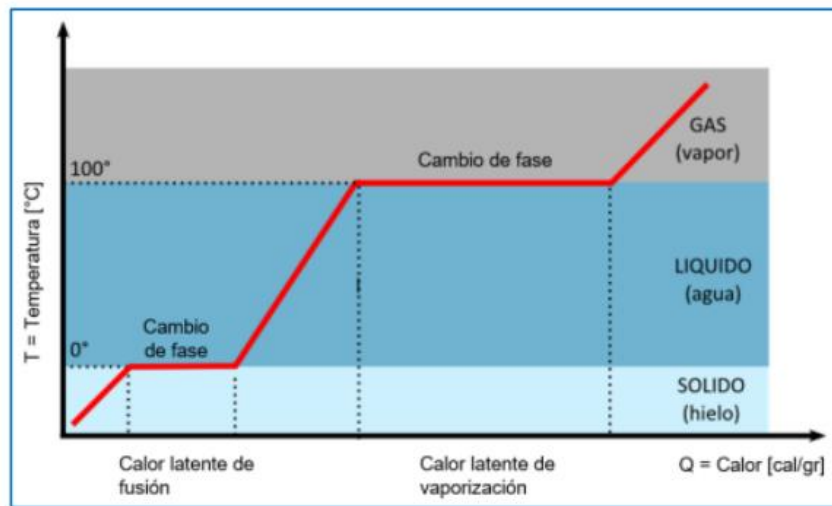


Figura 2. Diagrama de proceso de cambio de fase Hielo – Vapor. Fuente: (B. Zalba, J. Marin, L. Cabeza y H. Mehling, 2003)

Del mismo modo actúan los materiales de cambio de fase, cada uno tiene su propia temperatura de cambio de fase y, gracias a las variaciones de temperatura entre el día y la noche, ocurren los ciclos de fusión y solidificación de estos materiales, resultando en la absorción máxima de energía durante el día, cuando las temperaturas suben; y la disipación de ésta en la noche, cuando la temperatura ambiente baja. La energía utilizada para cambiar el estado del material, dado que la temperatura de cambio de fase es aproximada a la temperatura ambiente de confort deseada, dará lugar a un clima interior más estable y cómodo, así como también, reducirá las cargas de enfriamiento y calefacción en horas pico; especialmente en aquellas edificaciones con baja masa térmica. (S. E. Kalnaes and B. P. Jelle, 2015). Si estamos en condiciones de invierno y los Materiales de Cambio de Fase situados en el pavimento se encuentran congelados, es decir, a una temperatura inferior a la de cambio de estado, el calor del sol comenzará a descongelar las sustancias hasta su licuación total, si la energía en relación con la masa de sustancias de cambio de estado es suficiente, o dejando una mezcla de sólido líquido si es insuficiente. Si estamos en condiciones de invierno y las sustancias de cambio de estado situadas en el pavimento se encuentran en estado líquido, es decir, a una temperatura superior a la de cambio de estado, el frescor del aire nocturno comenzará a congelar las sustancias hasta su solidificación total, si la energía en relación con la masa de sustancias de cambio de estado es suficiente, o dejando una mezcla de sólido-líquido si es insuficiente. A lo largo del resto del día la sustancia realiza el proceso contrario cediendo la energía acumulada, siempre a la temperatura de cambio de estado, que se ha hecho coincidir con la de bienestar. Todas estas opciones, de enfriamiento, calentamiento o ventilación, se realizan mediante el accionamiento de dos conjuntos de compuertas, combinadas con rejillas, que adoptan posiciones diferentes (González, F. J. N., Román, C. A. A., García, E. H., & Frutos, C. B. 2008). En los funcionamientos de los materiales de cambio de fase existen ciertas posiciones en la aplicación y que son las que tienen un funcionamiento especial para que sea funcional el material de cambio de fase.

5.1 Características en la posición de enfriamiento

- Una de las características es cuando se encuentran en condiciones exteriores para la acumulación de energía, para que este genere la temperatura exterior inferior con los materiales de cambio de fase y las condiciones interiores sean mejores ya sea con la acción de la ventilación su funcionamiento será de compuertas en posición de captación.
- De la manera en que los materiales de cambio de fase sean favorables del aire exterior, es decir que tengan una temperatura por encima de los materiales de cambio de fase, los ventiladores serán suspendidos.

- En el momento en que las condiciones interiores no son favorables, es decir con una temperatura elevada, se analiza y se genera condiciones exteriores, si se tiene una temperatura entorno de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, se abren automáticamente las ventanas situadas en los lados de la casa para que se pueda asegurar una ventilación natural y que a su vez sea cruzada.
- Si el caso de la temperatura exterior no cumple con el requisito se accionan los ventilados y se ponen las compuertas en posición de recirculación.

5.2 Características posición de calentamiento:

- Existen condiciones exteriores adecuadas para lograr un almacenamiento de energía, que será captada por la radiación solar en la fachada, la temperatura exterior superior a la de cambio de estado de los materiales de cambio de fase o a una temperatura interior superior a las cargas internas.
- El sistema se acciona con los ventiladores y ponen las compuertas en una posición que sea recirculación para que se genere el almacenamiento en ciertos materiales de cambio de fase.
- Los ventiladores siguen en funcionamiento mientras la temperatura de impulsión por las rejillas sea superior a la de succión de la rejilla de entrada.

5.2 Características de posición de ventilación

- Si existe alguna posibilidad de que con lo anterior comentado la calidad del aire interior este por debajo de lo admisible en este caso se pondrán las compuertas en estado de posición ventilación.

6 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

En los materiales de cambio de fase existen principales características a cumplir en los materiales de cambio de fase para el almacenamiento energético. Es muy importante la correcta selección del material de cambio de fase dependiendo del campo en que se desee utilizar, por lo que a continuación se presentaran algunos criterios para seleccionar un material de cambio de fase correctamente. Estos criterios son propuestos según una investigación realizada en España. (Ramírez, A., Santos, A. & González N., 2012)

6.1 Físicas:

- Uno de los criterios físicos es la densidad del líquido y el sólido lo cual deben ser similares y preferiblemente elevados, para que se pueda generar una mayor calidad de almacenamiento de calor por unidad de volumen.
- Obtener una variación de volumen en el cambio de fase sea baja.

6.2 Químicas

- Se debe tener en cuenta el criterio en el proceso de cambio de fase el cual debe ser totalmente reversible y solo que sea dependiente de la temperatura
- Tener en cuenta la compatibilidad de los materiales encapsulados y los demás que se encuentren en contacto, como son la estabilidad química, evitar al máximo la oxidación, la descomposición térmica, la corrosión y otras reacciones que se pueden generar.
- Estos materiales de cambio de fase también tienen un criterio importante el cual es mantenerse químicamente estable en el tiempo evitando que se genere una descomposición o contaminación de este.

- Entre otros aspectos importantes en el momento de elegir los materiales este tiene que no presentar segregación en los cambios de fase, como también no inflamables y que sean resistentes al fuego.

6.3 Cinéticas

- Se tiene que tener en cuenta muy importante el evitar problemas en la histéresis, subenfriamiento o retardo al inicio de la solidificación, como es habitual en los materiales de cambio de fase inorgánicos, la cual se produce al no ceder el calor de un material de cambio de fase siendo que su temperatura es menor al punto de congelación.
- Los materiales de cambio de fase tienen un criterio cinético el cual posee suficiente tasa de cristalización, como en los materiales de cambio de fase inorgánicos que tienen un agentes nucleares los cuales hacen que comience a solidificar la sustancia.

6.4 Térmicas

- Uno de los criterios términos tiene que ver con la temperatura de cambio de fase debe ser adecuada a cada aplicación
- Los materiales de cambio de fase presentan una temperatura de fusión definida o al menos en la fase debe producirse en un valor discreto que quiere decir con una sustancia pura o en un pequeño intervalo de temperaturas.
- Tener una gran capacidad de almacenamiento de calor sensible el cual es un calor específico en estado sólido y líquido.
- Estores materiales también tienen un criterio importante que es poseer una alta conductividad térmica que facilita en gran manera la transferencia de calor.

7 CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

En el transcurso del tiempo lo materiales de cambio de fase han mejorado significativamente, los cuales se han experimentado más estudios; en los que se han identificado características muy marcadas de estos, como el almacenamiento de energía térmica y el cambio de fase (sólido – líquido). Los resultados demostraban que la combinación de un sistema prototipo y enfriamiento nocturno proporciona un índice de almacenamiento térmico apropiado para evitar el sobrecalentamiento en condiciones habituales de verano, y que el sistema ofrece beneficios sustanciosos respecto a sistemas alternativos como las “chilled beams” y el aire acondicionado (González, F. J. N., Román, C. A. A., García, E. H., & Frutos, C. B. 2008).

En las mezclas de las sales hidratadas inorgánicas y los estabilizadores son los materiales de cambio de fase eutécticos son usados con más frecuencia en la aplicación para el almacenamiento de frío, las mezclas eutéctico son más complejas en su preparación y en el modo en el que se maneja. En general, los materiales de cambio de fase tienen múltiples y variados usos, desde la electrónica (para mantener los dispositivos a una temperatura adecuada para su buen funcionamiento como en los trabajos presentados. También se tiene en cuenta la manera de transporte de mercancías sensibles a los cambios de temperaturas, industriales y de construcción con los que se tiene que tener mayor cuidado.

8. MECANISMOS DE APLICACIÓN DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Los materiales de cambio de fase que son utilizados en la construcción; como lo es en los edificios, su aplicación es en las paredes internas contendoras las cuales tienen los materiales de cambio de fase encapsulado, lo cual genera el cambio de temperatura. Desarrollando en un ahorro de energía, este se constituye de la siguiente manera siendo de noche y con una temperatura baja de la temperatura normal del ambiente promedio, estos materiales empiezan a solidificarse generando calos que se elimina ventilando el edificio, después cuando llega el día y sube la temperatura los materiales de cambio de fase absorbe el calor que se encuentra en el interior y al fundirse, reduce un gasto de energía de climatización para mantener más frio el edificio en horas que sube el nivel de calor al máximo. La problemática que se presenta en estos materiales son los costos que son realmente altos, para ello se tiene que optimizarse el uso o tener un moderado empleo.

Para ello se tenemos que tener presente dos aspectos importantes, uno que es la capacidad de almacenamiento y por otro lado la potencia térmica disponible y la facilidad de la carga que genera. La capacidad de almacenamiento está relacionada con la masa y el calor que se genera, la facilidad de la carga tiene participación en el área, la conductividad térmica de los materiales de cambio de fase. Se ha visto al analizar el comportamiento térmico de edificaciones en barro, que la evaporación del agua (el aprovechamiento de su calor latente evaporación) puede ser muy importante para reducir las entradas de calor en los meses cálidos en las edificaciones (Dominguez, GarciaC 2007). Los materiales de cambio de fase resultan muy interesantes en la construcción, ya que al presentarse micro encapsulados pueden ser agregados como áridos al cemento o al yeso (Faustini C. 2007), para su transporte en el agua (Dominguez M, Garcia C 2008), como transporte de calor. Esta línea de desarrollo y evolución de los materiales de cambio de fase en la construcción está siendo investigada actualmente, sin embargo, se sigue esperando que sea más desarrollado en los próximos años. 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 siguiente figura el cual no considera un sistema activo en su análisis.

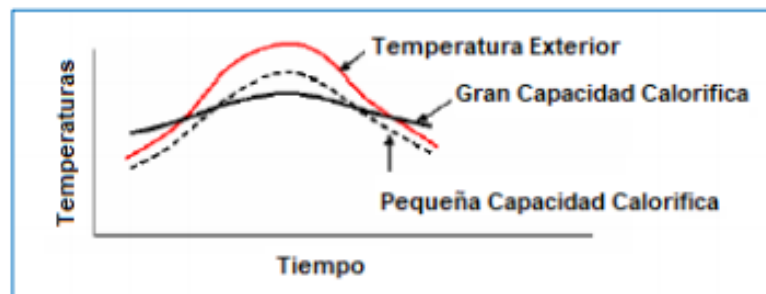


Figura 3: Estabilización de la temperatura interior por el efecto inercia térmica Fuente: (M. Kenisarin & K. Mahkamov, 2007)

En la actualidad se manejan materiales de construcción más ligeros los cuales tienen poca capacidad de almacenamiento de temperatura, lo que los materiales de cambio de fase pueden ayudar y generar es que aumenten la inercia térmica de un edificio sin aumentar su peso, para ello es necesario tener un área de transferencia de calor en el cual se pueda liberar esa energía ya almacenada, teniendo en cuenta que es imprescindible que este almacenamiento se pueda descargar el material por medio de la ventilación que se hace durante la noche para prevenir que se haga una sobrecarga de calentamiento en los materiales de cambio de fase, existen ciertas características que se tienen en cuenta en los espesores de los materiales de construcción que serán interpretados en la siguiente imagen.

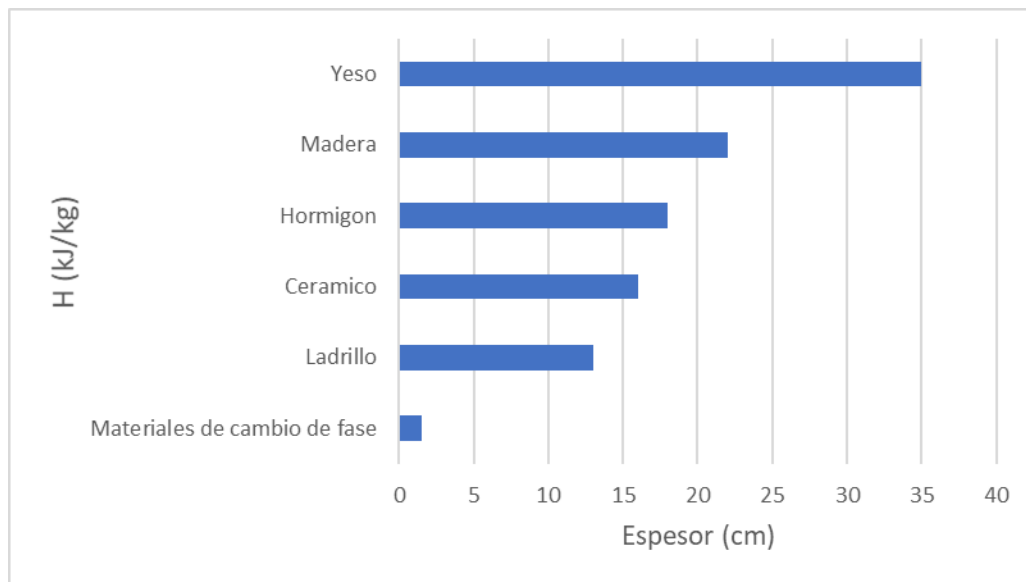


Figura 4: Espesor requerido de distintos materiales Vs Energía térmica Fuente: (M. Kenisarin & K. Mahkamov, 2007).

Para que estos materiales de cambio de fase sean aplicados en la construcción tienen ciertas características que se deben tener en cuenta como los criterios para su manejo, entre ellos son:

- Se tiene que tener un cambio de fase en la temperatura de 12 y 25 °C, también una alta estabilidad de los ciclos de cambio de fase debido a la vida útil de los edificios.
- Reducir el riesgo de fuga con no tener una corrosión y evitar daños en la estructura del edificio.
- Tener en cuenta la inflamabilidad del fuego y encontrar soluciones constructivas de acuerdo a la normativa,

Una limitación de los materiales de cambio de fase para su aplicación en la construcción es la estacionalidad, pues el material de cambio de fase debe ser seleccionado para aplicaciones en calefacción pasiva. Esta limitación reduce los beneficios térmicos, el ahorro energético y su viabilidad económica. Investigadores estudiaron un concepto de doble capa de estos materiales para que funcionara durante todo el año. (A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj & R.V. Seeniraj, 2008).

Uno de los grandes inconvenientes de emplear sustancias de cambio de estado en las edificaciones es su integración constructiva y arquitectónica. En este prototipo se integró en un falso suelo, a modo de suelo técnico, en dos capas de cápsulas de plástico de 3 kg y unas dimensiones de 28x46x3 cm cada una, con un separador de 2 cm entre ellas y entre ellas y el suelo. La baldosa de pavimento recoge la última capa de materiales de cambio de fase. Se trata de una baldosa de gres sobre una base metálica para permitir su apoyo en las cuatro esquinas para formar el suelo técnico. Esa base metálica es un recipiente cerrado al que se puede acceder por unos orificios de llenado; en cada una se introdujeron 5 kg de parafina. El total de materiales de cambio de fase instalados es de 1326 kg. Con esa cantidad, y teniendo en cuenta los flujos de energía que se establecen no cambia de estado completamente en ningún momento, lo que asegurará que las descargas sean siempre a 23 °C (± 1 °C). Para las condiciones climáticas concretas del periodo de exhibición y monitorización en Washington, durante las horas de calor pueden realizarse 8,5 renovaciones de aire a la hora sin que se licue o congele por completo la parafina. (González, F. J. N., Román, C. A. A., García, E. H., & Frutos, C. B. 2008).

El tiempo de vida útil de un material de cambio de fase viene determinado por la cantidad de ciclos térmicos que es capaz de soportar un material manteniendo su estabilidad térmica. El material de cambio de fase es sometido a repetidos ciclos de calentamiento y enfriamiento en los que el material cambia de fase de sólido a líquido y posteriormente vuelve a cambiar de fase de líquido a sólido. Se miden sus propiedades térmicas en temperaturas fusión y entalpías, obteniendo el

número de ciclos en los que las propiedades térmicas del material no varían de forma considerable. Tras realizar una exhaustiva búsqueda, existe muy poca bibliografía acerca de la degradación térmica de los materiales de cambio de fase y la determinación de su tiempo de uso, especialmente en aplicaciones para edificación donde la vida útil del material debe ser elevada. Aunque es complicado conocer la vida útil real de estos materiales y en qué momento dejan de conservar sus propiedades adecuadas para las aplicaciones a las que se destina, existen algunos artículos basados en experimentos realizados en laboratorios de materiales sometidos a ciclos térmicos acelerados, para determinar si en un número de ciclos, el material mantiene sus propiedades térmicas intactas (temperaturas fusión y entalpías). (Sarabia Méndez, D. (2020).

9. CLASIFICACION DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE, CON BASE AL TAMAÑO DE LAS CAPSULAS

Los materiales de cambio de fase al ser empleados en la construcción tienen unos criterios que han sido limitados en el uso general, ya que se han presentado incompatibilidad entre los demás materiales afectando la estabilidad a largo plazo, pese a estos inconvenientes, han surgido diferentes investigaciones las cuales han surgido diferentes técnicas de encapsulados en los materiales de cambio de fase los cuales tienen unos ventajas significantes como son:

- Aumento en el área de transferencia de calor utilizado.
- Control de los cambios de volumen, los cuales ocurren dentro de los encapsulados.
- No se presenta absorción de humedad.
- Reducción de la reactividad hacia el ambiente externo presente.

Los métodos de encapsulación, clasificados de acuerdo a su tamaño, pueden ser de dos tipos: micro y macro encapsulados. (Lane, 1986)

9.1 Microcápsulas

Una investigación menciona que la micro encapsulación podría definirse como el proceso de rodear o envolver una sustancia en otra sustancia a escala muy reducida, produciendo cápsulas que van desde $1\ \mu\text{m}$ a $1000\ \mu\text{m}$ de diámetro. Los tres estados de la materia (sólidos, líquidos y gases) pueden ser micro encapsulado. (Sarabia Méndez, D. (2020). Esto permite que los materiales en fase líquida y de gas puedan ser manipulados con más facilidad que los de estado sólido, y pueden permitirse un cierto grado de protección a las personas que manipulan materiales peligrosos. (Juárez, D. (2012). El aportar una solución en el aumento y mejoramiento de edificaciones energéticas, la sustancia más común en los materiales de cambio de fase son las parafinas y ácidos grasos ya que absorben el calor y mantienen una temperatura definida.

El material de la membrana exterior debe ser compatible con el material de cambio de fase y, a su vez, ser capaz de hacer frente a la tensión mecánica sobre las paredes del recipiente, provocada por las variaciones de volumen durante el cambio de fase. (S. E. Kalnæs & B. P. Jelle, 2015) Por lo general, los materiales de cambio de fase micro encapsulados se encuentran comercialmente disponibles en dos formatos: dispersión fluida, donde las cápsulas son dispersadas en agua o en polvo en mezclas en seco. La siguiente imagen muestra en términos práctico la conformación de la envoltura de polímero en una cera de materiales de cambio de fase, dimensionando el tamaño en ellas.



Figura 5: Microcápsulas Fuente: (S. E. Kalnaes and B. P. Jelle, 2015)

La micro encapsulación puede lograrse a través de gran cantidad de técnicas, en base al propósito que se plantee. Las sustancias pueden ser micro encapsuladas con la intención de que el material base esté confinado dentro de paredes de la cápsula durante un período específico de tiempo. Por otra parte, los materiales del núcleo se pueden encapsular para que se liberen poco a poco a través de las paredes de la cápsula, conocida como de liberación controlada o difusión, o cuando las condiciones externas desencadenen que paredes de la cápsula rompan, fundan o se disuelvan como se muestra en la siguiente figura. (Juárez, D. (2012)

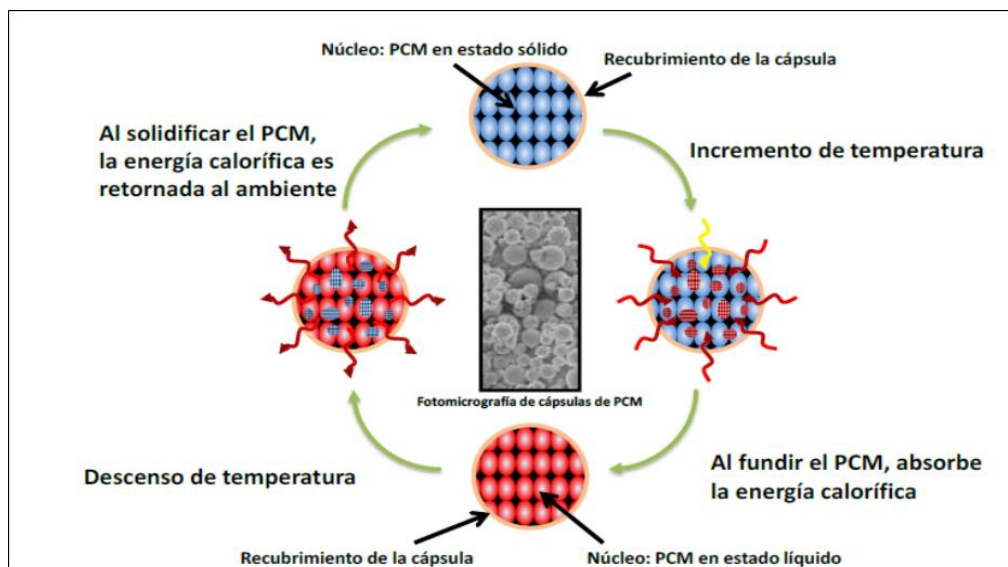


Figura 6. Esquema de funcionamiento de los materiales con cambio de fase micro encapsulados. Fuente: (Juárez, D. (2012)

La sustancia encapsulada puede ser denominada material del núcleo, ingrediente activo, agente, relleno, carga útil, núcleo o fase interna. El material empleado para el encapsulado del núcleo se conoce como revestimiento, membrana, depósito o material de la pared. Las micro cápsulas pueden tener una pared o en depósitos de varios dispuestos en capas de diferentes espesores en torno a la base. (Juárez, D.2012). Sus características típicas son:

- Cualquier color.
- Temperaturas disponibles: rangos regulables según demanda.
- Forma: Polvo seco o pasta de filtración húmeda. El producto de filtración se puede diluir más para adaptarse a su aplicación.
- Tamaño medio de partícula: micras.

9.2 Macrocápsulas

Estos materiales tienen un origen que se desarrolló para ser empleados en prendas ya que regulan la temperatura corporal de individuos, ahora en los materiales de cambio de fase absorbe el exceso de calor que permite que las personas que se encuentran en las viviendas tengan una mayor conformidad en la temperatura. En el sector de la construcción, los micro materiales de cambio de fase que se han incorporado en los materiales de construcción, para aumentar la eficiencia energética de los edificios residenciales y comerciales. Estos materiales se utilizan en combinación con el calor radiante y la energía solar para ampliar la eficiencia de la calefacción y la refrigeración de estos sistemas.

El tamaño de estos contenedores es por lo general más de 1 cm³, almacenando desde varios mililitros hasta varios litros. La tecnología de macro encapsulación emplea un proceso de encapsulación de doble capa, creando una cápsula con una configuración en forma de matriz. La principal ventaja de los envases plásticos es la disponibilidad en el mercado y la facilidad de producirlos en una gran variedad de formas y con pocas restricciones geométricas. Además, son compatibles con la mayoría de los materiales de cambio de fase, incluyendo las sales hidratadas, por lo general no presentan degradación, aunque algunos materiales orgánicos pueden llegar a suavizarlos. (S. E. Kalnaes and B. P. Jelle, 2015).



Figura 7: Cápsulas de macro de los materiales de cambio de fase (Contenedor plano, Esfera, Placas de barra doble y placas de aluminio). Fuente: (S. E. Kalnæs & B. P. Jelle, 2015)

El material de cambio de fase se encuentra confinado por la encapsulación evitará cambios volumétricos importantes, lo que evita varios riesgos y garantiza la integridad del componente en el que se insertan las cápsulas. La barrera polimérica puede ser de otros materiales, por ejemplo, como aluminio ya que, mejora la compatibilidad con otros materiales de construcción y evita la corrosión. Este tipo de aplicación es de fácil manejo, una clara ventaja de este proceso en relación a los métodos de impregnación e inmersión del ítem anterior.

10 MATERIALES DE CAMBIO DE FASE EN ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

En este artículo de revisión se tomo un objetivo de investigar los materiales de cambio de fase lo cual pueden ser utilizados en la construcción como métodos de almacenamiento de energía, ya antes expuesto los macroencapsulados a continuación se muestra como se utilizan en el uso de cementos como matriz retenedora de los materiales de cambio de fase. Existen ya numerosos estudios y construcciones de vanguardia en las que se consigue una eficiencia térmica razonable debido al uso de estos materiales en los materiales de construcción.

Un ejemplo de esta aplicación en la construcción es aquellas que utilizan materiales como el que se puede observar en la figura 8, en la que se observa un ladrillo de construcción el cual retiene una macrocápsula con materiales de cambio de fase en su interior.

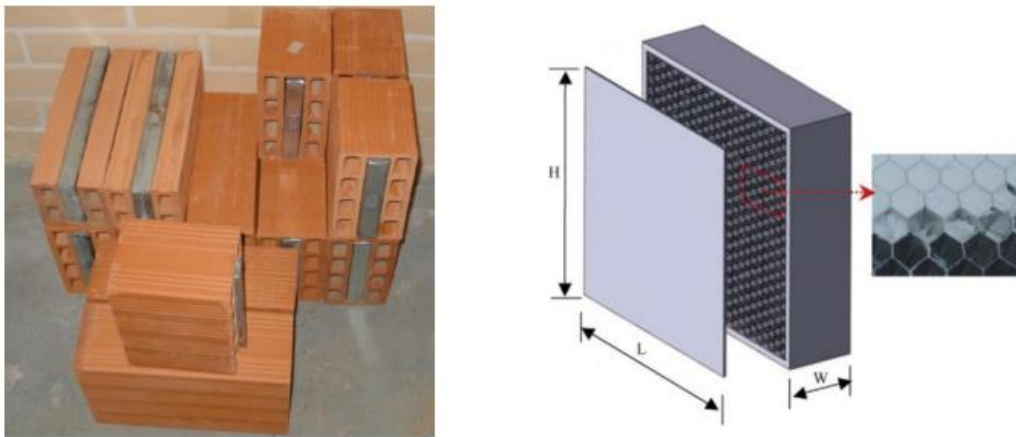


Figura 8. Ladrillos con materiales de cambio de fase macroencapsulados.

11 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

11.1 Elección de materiales:

En la recopilación de información se expone una metodología en la cual fue incorporada la temática. Para este desarrollo se plantea la necesidad de elegir una resina y un material de cambio de fase, la resina seleccionada se llama epoxi la cual es un material polimérico termoestable que son el producto de mezclar una base epóxica con un endurecedor. La base epóxica se compone de dos o más grupos epoxi, también conocidos como oxiranos, que se obtienen comúnmente mediante la reacción de compuestos con hidrogeno y epiclorhidrina y sometándolo posteriormente a una deshidrohalogenación. Estos dos materiales se tratan de las dos claves para este trabajo, es por ello por lo que se determinan primero unos objetivos que debe cumplir nuestro compuesto: se debe tratar de una resina epoxi que sea capaz de almacenar cierta cantidad de material de cambio de fase y poder ser utilizada tanto para impregnar tejidos como para recubrimiento de construcciones y objetos.

Teniendo en cuenta la elección de la resina epoxi, debido a la gran cantidad de aplicación que esta tiene, se ofrece una variedad de resinas, para el desarrollo se eligieron las siguientes que se encuentran en la tabla 5.

Resina epoxi Resoltech 1070	Resina epoxi Resoltech 1600
Uso en recubrimientos y como top coat	Impregnable en tejidos
Resistencia a radiacion ultravioleta	Alta flexivilidad
Buenas propiedades mecanicas	Alta resistencia a impacto
Componentes Bio 37 %	Excelente adherencia en substratos
	Resistencia a disolvente, detergentes y soluciones

Tabla 5. Características de las resinas epoxi utilizadas.

Otro material seleccionado que debe cumplir los criterios de un material de cambio de fase como anteriormente nombrados. Por esa razón, la elección de los materiales de cambio de fase se ha hecho en función de las necesidades del trabajo. Se busca un material de cambio de fase que se encuentre dentro del rango de entre 20°C y 90°C para facilitar el estudio del almacenamiento de energía, que sea estable químicamente, que sea reversible y que el precio no sea muy elevado. De entre los tipos de materiales de cambio de fase que existen se escogieron las parafinas, que son las que más se ajustan a las necesidades del proyecto. Mas concretamente se han escogido

la cera de candelilla proporcionada por Ceras Martí. En la tabla 6 se describen las características de la cera de candelilla.

Material de cambio de fase	Características
Cera de candelilla	Temperatura de fusión entre 69°C y 74°C
	Color naranja
	Economico

Tabla 6. Características del material de cambio de fase utilizado.

11.2 Elaboración de probetas:

En este apartado se explica la metodología para la elaboración de las probetas de material de cambio de fase y resina epoxi. En todas las probetas se sigue el mismo patrón con el fin de evitar variables en el momento de mezclar y orden de introducción de aditivos no influyan en los resultados. Los siguientes pasos durante la elaboración:

1. Se pesa el material de cambio de fase y el polvo de aluminio en la balanza y se introduce en una bolsa hermética zip.
2. Se pesa el espesante y se aparta junto al material de cambio de fase y el Al.
3. Se pesa en un vaso de plástico la base epoxi y se aparta.
4. Se pesa el endurecedor en un vaso, se introduce en el vaso con la base epoxi y se mezcla.
5. Se introduce el espesante en la mezcla de base con endurecedor y se mezcla durante 30 segundos.
6. Se introducen los aditivos y se mezcla durante 90 segundos, comprobando que la mezcla es homogénea.

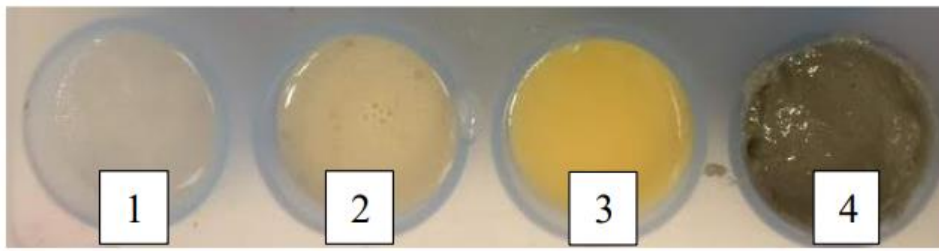
11.2.1 Laboratorios:

1. Una vez se tiene la mezcla homogénea en el vaso, se vierte en el molde de probetas, donde se deberá comprobar que no quedan burbujas de aire que puedan comprometer las propiedades mecánicas de la mezcla. Todas las probetas se preparan en el laboratorio de química de docencia a una temperatura ambiente media de 21°C. Esta temperatura se encuentra dentro del rango óptimo que sugiere el proveedor para que la resina epoxi se cure (19°C-25°C).

Componente	1	2	3	4
Base epoxi	74%	72.5%	61.5%	40.5%
Endurecedor	26%	25.5%	21.5%	32.5%
Espesante	—	2%	2%	2%
Material de cambio de fase	—	—	15%	15%
Aluminio	—	—	—	10%

Tabla 7. Porcentaje de componentes en la matriz epoxi.

A mayores se preparan 4 probetas más, dos de ellas sin espesante para ver cómo afecta a la homogeneización de la mezcla y otras dos que serán una copia de la n°3 y n°4 por si fuera necesario utilizarlas para para otro experimento.



Fotografía 2. Probetas para análisis termográfico

2. En el siguiente laboratorio se determina que efectos tiene añadir los aditivos a la matriz de resina epoxi y ver como cambian sus propiedades térmicas . Para ello se propone hacer un experimento en el que se somete a las 4 probetas a un calentamiento progresivo desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente 90°C.

Se rellena el vaso de precipitado con arena de playa e introducir a su vez las probetas de resina antes hechas, con el fin de que la rampa de calentamiento se homogeneice alrededor de las 4 probetas como se muestra en la fotografía 3.



Fotografía 3. Vaso de precipitado con arena y probetas

Una vez de tener las probetas en la calefactora , cada 30 segundos se realiza una medida de las 4 probetas y se procesa la información, este proceso se repite debido a la imprecisión en la toma de datos y a su vez se toman un registro fotográfico con el mismo tiempo (30s).

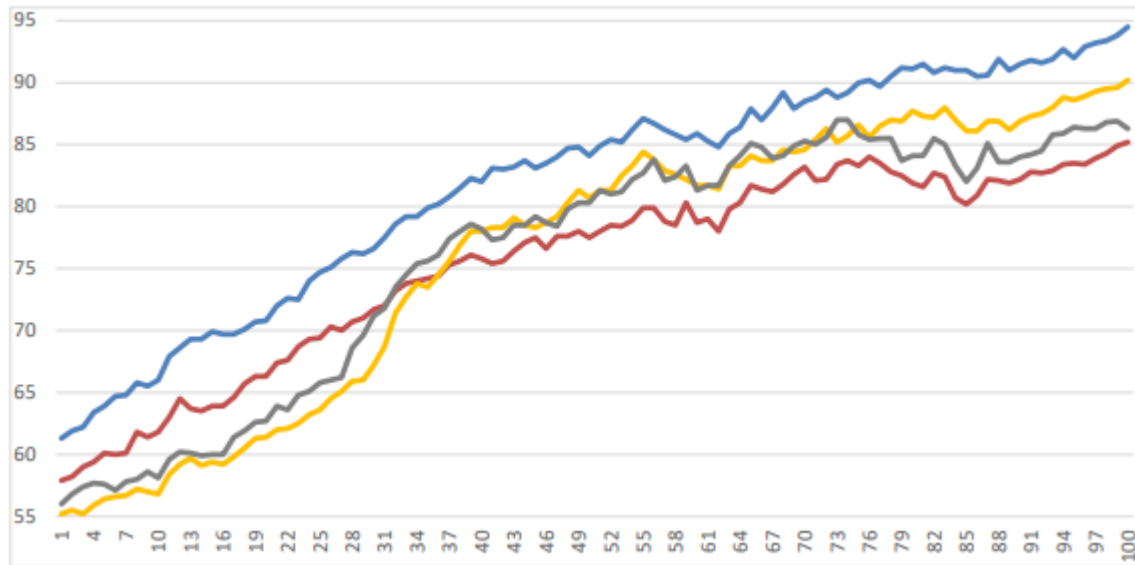
12 ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Teniendo en cuenta los estudios realizados en este proyecto, exponen unos análisis de resultados de los cuales fueron productos de las anteriores mezclas realizadas:

12.1 Análisis termográfico:

El objetivo realizado en el análisis termográfico que realizaron era observar si los componentes que se iban a añadir afectaban en la conductividad térmica.

Por ello, se realiza un experimento en el que se toman fotos cada 30 segundos con la cámara Flir y se analizan posteriormente en el equipo. La temperatura de partida es la temperatura a la que se encuentra el laboratorio de química del Isaac Peral (21°C aproximadamente), y se pretende llegar a una temperatura de entre 85°C y 90°C. Una vez tomados y analizados los datos, se procesan en Excel con el objetivo de dibujar una gráfica que muestre la rampa de calentamiento de las cuatro probetas.

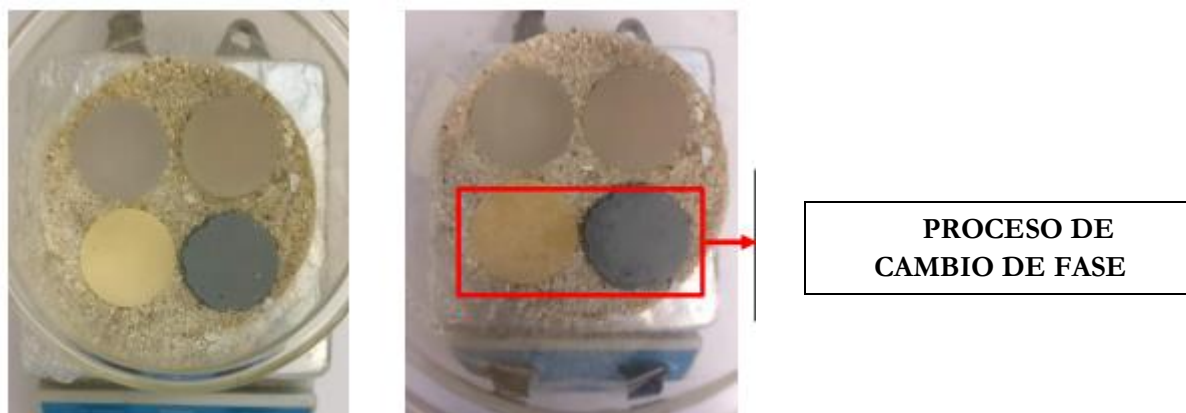


Gráfica 1. Rampa de calentamiento de probetas de compuestos

Esta grafica corresponde con las ramas del calentamiento de las 4 probetas diferentes realizadas con los siguientes compuestos.

- Azul: base epoxi con endurecedor.
- Roja: base epoxi con endurecedor y espesante.
- Gris: base epoxi con endurecedor, espesante, MATERIAL DE CAMBIO DE FASE y aluminio en polvo.
- Amarillo: base epoxi con endurecedor, espesante y MATERIAL DE CAMBIO DE FASE.

En esta grafica no se puede apreciar el cambio de fase de la candelilla, pero es lógico que no se note la estabilización de la temperatura ya que apenas hay material de cambio de fase en la probeta y parece que prácticamente aumenta de manera lineal. A pesar de no notarse en las temperaturas el cambio de fase, durante el experimento se pudo visualizar el cambio de fase en las superficies superiores que asomaban en la arena, tal y como se ve en la siguiente fotografía.



Fotografía 4. Estudio termográfico.

Con esta fotografía se puede inferir conclusiones. La probeta que no lleva ningún aditivo (azul), es la que más rápido se calienta. Por ello, tal y como se puede observar, cualquier aditivo que no sea buen conductor y se añada a una matriz de base epoxica y endurecedor, empeorará su conductividad térmica.

Por otro lado, se puede deducir que a pesar de que el espesante empeore su conductividad, no es tan notable como cuando se le añade material de cambio de fase. En las probetas que poseen este material, se visualiza una ralentización de la conductividad térmica considerable. Aun así, también se puede inferir que las partículas metálicas de aluminio contrarrestan en medida esa disminución de la conductividad, ya que llega antes a la temperatura de cambio de fase la probeta que posee polvo de aluminio frente a la que no lleva. Como resultado se puede deducir que los aditivos afectan negativamente a la conductividad térmica (Navarrete Pardo, I. 2019).

12.2 Análisis de térmicos y mecánicos:

Tal y como se ha mencionado al inicio del presente documento, la pregunta que se debía responder a la finalización de este trabajo es si es viable o no la encapsulación de un material de cambio de fase en una matriz de resina epoxi flexible. Habiendo realizado análisis termográficos, de dureza, termogravimétricos y de resistencia a compresión, la respuesta a esta pregunta es afirmativa. La resina epoxi se trata de un material óptimo para albergar materiales de cambio de fase en su seno, con las siguientes puntualizaciones:

- La conductividad térmica de las resinas epoxi estudiadas disminuye cuando se le introducen aditivos.

En el estudio termográfico se puede comprobar como las probetas que poseen algún material adicional se observa un retardo para alcanzar la temperatura a la que se quiere llegar.

- La densidad de los aditivos puede afectar a la homogeneidad del compuesto generado.

Así, materiales con una alta densidad muy probablemente acaben decantando y aquellos con baja densidad, floculando. Se comprobó de manera experimental, a través de ensayos de dureza, que el espesante amortiguaba este problema. Esto se debe a que el espesante crea redes tridimensionales dentro de la matriz, fijando la posición de los aditivos, durante el tiempo de curado de la resina.

- La dureza del compuesto depende tanto de la resina, como del material de cambio de fase que se utilice.

En este trabajo se ha estudiado una resina flexible, que no se caracteriza por tener una alta dureza Shore D. Por ello, se observó que, cuanto mayor es el porcentaje en masa del material de cambio de fase, la dureza de la probeta aumenta. Con la carga metálica ocurre algo parecido. Así, en la superficie de respuesta de la dureza Shore D, se observó cómo al incrementar la cantidad de aluminio aumenta la dureza, para valores +1 en el material de cambio de fase. Por tanto, se deduce que el aluminio no solo ayuda a contrarrestar la disminución de propiedades térmicas en la resina, sino que también mejora su dureza.

Sin embargo, conviene destacar que algunas probetas con cantidades pequeñas de material de cambio de fase consiguen aguantar toda la carga a las que se sometieron durante el ensayo a compresión, logrando volver a su forma inicial tras retirar la fuerza aplicada.

Es decir, en la gráfica tensión-deformación se han encontrado casos en los que no se llegó a alcanzar zona plástica. Estas probetas al finalizar los ensayos no presentaron, en su superficie exterior, partículas de material de cambio de fase desprendido, mientras que en otras sí que se pudo visualizar. Esto nos da una perspectiva en cuanto menos cantidad de material de cambio de fase, más heterogénea y compacta es la mezcla internamente, resistiendo más los esfuerzos a compresión que las probetas que poseen grandes porcentajes de éste y se agrietan a lo largo del ensayo (prueba mecánica). (Navarrete Pardo, I. 2019).

13 CONCLUSIONES

- En los últimos años se han utilizado e investigado los materiales de cambio de fase en el mercado, en diferentes áreas se han demostrado la viabilidad de estos productos, con características mejoradas y con las mejores propiedades físicas que serán adecuadas para la aplicación en los cuales se desarrollan procedimientos estandarizados en los materiales de cambio de fase.
- Es importante que en la aplicación de los materiales de cambio de fase sea optimizado y considerado un enfoque en las variables de la climatización, las temperaturas de fusión.
- Se deberá tener en cuenta que las curvas de entalpia y temperatura de los materiales de cambio de fase, tanto para refrigeración y calefacción deben ser lo más cercana posible, de lo contrario se produciría una histéresis o subenfriamiento y afectaría considerablemente el rendimiento de los materiales de cambio de fase en su aplicación.
- El control de temperatura utilizando en los materiales de cambio de fase para transporte de productos farmacéuticos u otros bienes sensibles a la temperatura ya son una tecnología habitual.
- La utilización de los materiales de cambio de fase para calefacción y refrigeración del cuerpo humano se ha demostrado tanto para confort personal como para aplicaciones terapéuticas. Diversas aplicaciones en diferentes campos están presentes hoy día en el mercado.
- Por otra parte, se hace necesario mejorar el proceso experimental que se desarrolló a nivel de laboratorio con el fin que se garantice que las condiciones de los materiales de cambio de fase son estables en todos los puntos para su aplicación.
- De la realización de este estudio, se puede extraer que las propiedades de almacenamiento térmico de la resina epoxi flexible analizada se ven ampliamente mejoradas al combinarla con materiales de cambio de fase y carga metálica.
- Tenemos que ver que la resina epoxi es una solución óptima para actuar de contenedor de los materiales de cambio de fase reduciendo los costos.

- También concluimos que los porcentajes adecuados de los compuestos varían en función de la aplicación que se le quiera dar.
- Finalmente, se concluye con que los materiales de cambio de fase tienen cavidad en innumerables aplicaciones, y que hoy en día solo se han desarrollado algunas de ellas. Por ello, forman parte de una gran cantidad de líneas de investigación que tienen como objeto final la maximización del ahorro, la minimización del gasto y de las emisiones nocivas para el medio ambiente y ayudando a nuevas edificaciones.

14. GLOSARIO

- Aditivos: Son componentes de naturaleza orgánica que modifican las propiedades de las mezclas de concreto o mortero, estos últimos son los materiales más comunes en una construcción. ... Repelente para fachadas de piedra/cantera o materiales porosos. (blog.paqsa)
- Alifática: El adjetivo alifático se emplea en el terreno de la química para calificar a aquellos compuestos orgánicos que disponen de una cadena abierta como estructura de sus moléculas. De este modo, es posible hablar de diferentes compuestos de tipo alifático.(definición.de).
- Bidones: Recipiente para líquidos, grande, generalmente de metal, de forma cilíndrica y cierre hermético, que suele usarse para transportar líquidos.
- Cámara flir: Una cámara termográfica (o cámara térmica) es un dispositivo que mide la temperatura y ofrece una imagen térmica de los objetos, sin necesidad de contacto, a partir de las emisiones de radiación infrarroja de estos. Los objetos emiten una cantidad de radiación infrarroja en función de su temperatura (mesurex).
- Cera candelilla: La candelilla es un arbusto perene que cuenta con tallos cilíndricos y recubiertos de cera, este producto sirve como elemento de protección y sello para retención de la humedad.
- Endotérmico: Una Reacción Endotérmica es una reacción química que absorbe energía en forma de luz o calor. En ella, la energía o entalpía de los reactivos es menor que la de los productos
- Entalpia: La entalpía es una magnitud termodinámica que equivale a la suma de la energía interna del cuerpo más la multiplicación del volumen del mismo por la presión exterior. Esta magnitud se simboliza con una H mayúscula.
Lo que hace la entalpía es reflejar la cantidad de energía que un cuerpo intercambia con el entorno. Sus fluctuaciones, de este modo, revelan el nivel energético que el cuerpo libera o absorbe.
- Epiclorhidrina: Un epóxido C tóxico líquido volátil $\text{C}_3\text{H}_5\text{ClO}$ que tiene olor a cloroformo y se usa especialmente para fabricar resinas epoxi y cauchos
- Epoxica: Las resinas epoxídicas son un tipo de adhesivos llamados estructurales o de ingeniería; el grupo incluye el poliuretano, acrílico y cianoacrilato. Estos adhesivos se utilizan en la construcción de aviones, automóviles, bicicletas, esquís
- Estores: Se denomina estor a un tipo de cortina fina que se despliega verticalmente. Al igual que los visillos, los estores sirven más para tamizar la luz que para impedir su entrada. ... Estor a varillas. Con varillas horizontales que permiten plegarlo en la parte superior.
- Eutécticas: . Es la mínima temperatura a la que puede producirse la mayor cristalización del solvente y soluto, o también se define como la temperatura más baja a la cual puede fundir una mezcla de sólidos y con una composición fija.

- Exotérmico: En termodinámica, el término proceso exotérmico (exo- : "afuera") describe un proceso o reacción que libera energía del sistema a su entorno, generalmente en forma de calor, pero también en forma de luz (por ejemplo, una chispa, llama o destello), electricidad (por ejemplo, una batería), o sonido (p. ej., explosión escuchada al quemar hidrógeno). Lo opuesto a un proceso exotérmico es un proceso endotérmico, que absorbe energía en forma de calor.
El concepto se aplica con frecuencia en las ciencias físicas a las reacciones químicas, mientras que en la energía química de enlace se convertirá en energía térmica (calor)
- Agua glicolada: Mezcla de agua con glicol empleada en equipos de refrigeración para prevenir la formación de hielo en los refrigeradores de los circuitos hidráulicos.
- Histéresis: Es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado. Podemos encontrar diferentes manifestaciones de este fenómeno. Por extensión se aplica a fenómenos que no dependen solo de las circunstancias actuales, sino también de cómo se ha llegado a esas circunstancias.
- Homogeneice: Transformar en homogénea una cosa compuesta de elementos diversos o hacer que cosas diversas tengan características homogéneas.
- Oxirano: El óxido de etileno es un gas incoloro e inflamable a temperaturas y presiones normales, pero se condensa cuando es enfriado. Los vapores de óxido de etileno forman mezclas explosivas con el aire. Es miscible con el agua en cualquier proporción, con alcohol, éter y la mayoría de disolventes orgánicos. Es muy reactivo tanto en fase líquida como vapor.
- Recirculación: Es un concepto que proviene de circulación, un término que se refiere al proceso de circular. ... El concepto de recirculación está vinculado a volver a impulsar la circulación de algo dentro de un mismo circuito o sistema.
- Solidificación: Es un proceso similar en el que un líquido (agua) se convierte en un sólido (hielo), no al disminuir su temperatura, sino al aumentar la presión a la que se encuentra sometido.
- Térmica: Parte de la física que se ocupa de la producción, transmisión y utilización del calor.
- Termoestable: Hacen referencia al conjunto de materiales formados por polímeros unidos mediante enlaces químicos adquiriendo una estructura final altamente reticulada.

La estructura altamente reticulada que poseen los materiales termoestables es la responsable directa de las altas resistencias mecánicas y físicas (esfuerzos o cargas, temperatura...) que presentan dichos materiales comparados con los materiales termoplásticos y elastómeros. Por contra es dicha estructura altamente reticulada la que aporta una baja elasticidad, proporcionando a dichos materiales su característica fragilidad.

15. REFERENCIAS

- [1] Oliver, A., González, F. J. N., & Santos, A. G. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de construcción*, (305), 131-140.
- [2] González, F. J. N., Román, C. A. A., García, E. H., & Frutos, C. B. (2008). Los Materiales de Cambio de Fase

- (MCF) empleados para la acumulación de energía en la arquitectura: su aplicación en el prototipo Magic Box. *Materiales de construcción*, (291), 119-126.
- [3] Domínguez, M., & García, C. (2009). Aprovechamiento de los Materiales de Cambio de Fase (PCM) en la Climatización. *Información tecnológica*, 20(4), 107-115.
- [4] Moreno Carmona, J. (2013). Caracterización de materiales de cambio de fase para su aplicación en revestimientos y acabados (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [5] Mireia Amorós García, "Análisis de la viabilidad de usar materiales con PCM en edificación", (2011).
- [6] Domínguez M., J. Colubret y A. Soto; Nuevo sistema de climatización evaporativo y acumuladores con cambio de fase para nodos de comunicación, *Montajes e Instalaciones*: (358), 64-68 (2002).
- [7] Zalba B., J.M. Marín, L.F. Cabeza y H. Mehling; Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*: 23(3), 251-283 (2003).
- [8] Faustini C.; Análisis del aprovechamiento energético de los acumuladores de cambio de fase en algunas propuestas constructivas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Arquitectura (2007).
- [9] Abhat, A.: "Latent Heat Thermal Energy Storage in the Temperature range 20-80°C". (1978) (Bericht IKE 5-209).
- [10] Sarabia Méndez, D. (2020). Análisis del uso de materiales con cambio de fase en la envolvente térmica de una vivienda.
- [11] B. Zalba, J. Marín, L. Cabeza y H. Mehling. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 251–283. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
- [12] B. Zalba, J. Marín, L. Cabeza y H. Mehling. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 251–283.
- [13] Silva, M. L. S. (2009). Microencapsulación de materiales de cambio de fase para su aplicación textil (Doctoral dissertation, Universidad de Castilla-La Mancha).
- [14] Rebelo, F., Corredera, A., Andrés, M., Vicente, R., Morentín, F., Ferreira, V. M., ... & Bujedo, L. A. (2020). Análisis del efecto de materiales de cambio de fase sobre la demanda de calefacción en una casa fotovoltaica. In *CIES2020-XVII Congresso Ibérico e XIII Congresso Ibero-americano de Energia Solar* (pp. 761-768). LNEG-Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- [15] Terán, A. E. R., Ramírez, V. B., & Reivich, C. R. APLICACIÓN DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE EN UN REFRIGERADOR DOMÉSTICO.
- [16] Rodríguez, Y. E. M. (2018). ENCAPSULAMIENTO DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE INORGÁNICOS. INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS.
- [17] GONZÁLEZ-CERVANTES, N., SALAZAR-HERNÁNDEZ, M., MENDOZAMIRANDA, J. M., CANO-LARA, M., & SALAZAR-HERNÁNDEZ, C. (2019). Sílice Mesoporosa como encapsulador de materiales de cambio de fase (PCM) Mesoporous silica as a phase change material encapsulator (PCM). *Revista de Ingeniería*, 3(9), 14-19.
- [18] Maselli, P. (2011). Las aplicaciones arquitectónicas de los materiales con cambio de fase en los cerramientos exteriores (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [19] Mayayo, J. G. (2012). Materiales de cambio de fase. Diseño de una instalación para la caracterización de PCM a altas temperaturas. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- [20] Urresti González, A. (2017). Método de cálculo de comportamiento térmico de cerramientos de edificios con materiales de cambio de fase.

- [21] Navarrete Pardo, I. (2019). Desarrollo de compuestos con resina epoxi y materiales de cambio de fase.
- [22] Macías, J. Incremento de la capacidad de una instalación de energía solar térmica mediante materiales de cambio de fase.
- [23] Soto Socolí, J. A. (2017). Estudio sobre la incorporación de materiales de cambio de fase en elementos constructivos.
- [24] Cabrera Villalba, M. A. (2020). Selección y simulación de materiales de cambio de fase para automoción.
- [25] Escobar Ochoa, M. A. Implementación de un sistema de acumulación de energía con materiales de cambio de fase (PCM) en un secador solar tipo Hohenheim. Sede Bogotá.
- [26] Farías Sanabria, A. (2019). Estudio de cementos sulfoaluminosos parcialmente remplazados en presencia de materiales de cambio de fase (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- [27] Orozco Salcedo, M. A. (2019). Procesado y caracterización de nitratos como materiales de cambio de fase para evaluar su capacidad de almacenamiento energético (Master's thesis, Quito, 2019.).
- [28] Martínez-Gómez, J., Narváez, R. A., & Guerrón, G. (2020). Análisis de selección de materiales de cambio de fase (PCM) para almacenamiento de calor latente por métodos de decisión de multi-criterio (MCDM). *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E32), 176-189.
- [29] Dellicompagni, P., Castro, N., Franco, J., Helm, D., Wieprzkowicz, A., Vera, S., & Uribe, D. (2020). Caracterización energética de materiales de cambio de fase para uso en acondicionamiento edilicio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 21, 23-35.
- [30] Ramírez, C. A. C., Muñiz, E. M. M., & Altamirano, C. F. A. (2020). Modelación de un acumulador de energía con material con cambio de fase en tubos excéntricos y aletados//Modeling of an energy storage with phase change material in eccentric and finned tubes. *Ingeniería Mecánica*, 23(3), 611.
- [31] Sanz Sánchez, G. Diseño, construcción y puesta en marcha de un banco de ensayos de intercambiadores de calor de suspensiones de PCM-agua.
- [32] Kamal Salah, M. (2020). Modelado de suelo radiante con material de cambio de fase usando una herramienta de simulación de edificios: Análisis del sistema de calefacción del suelo.
- [33] Sanz Sánchez, G. Diseño, construcción y puesta en marcha de un banco de ensayos de intercambiadores de calor de suspensiones de PCM-agua.
- [34] Garg H., Pandey B., Saha S.K., Singh S., Banerjee R.(2018). “Design and analysis of PCM based radiant heat exchanger for thermal management of Buildings”, *Energy and Buildings*, 169, 84-9.
- [35] Liu, M., Saman, W., Bruno, F., 2012. Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material. *Applied energy*, 92 (2012), p. 336-342.
- [36] Domínguez, M., Arias, J., García, C., 2009. Algunas posibilidades de aplicación de los acumuladores de cambio de fase en las energías renovables. [Online]. Madrid, España: Instituto del frío. Disponible en: <http://digital.csic.es/handle/10261/13451> [Fecha de acceso: abril de 2012]
- [37] D. Gaona, E Change (2017) Materials Thermal Characterization by the T-History Method and Exp. Heat Transf., vol. 6152, no. January.
- [38] A. Sharma, V.V.Tyagi,C.R.Che. (2009). *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318 345.
- [39] Schroeder, J. and Gawron, K: “Latent heat storage”. *International Journal of Energy Research*, 5 (1981), pp. 103-109.
- [40]) Shukla, A. et al.: “Accelerated thermal cycle test of erythritol for the latent heat storage application”.

Proceedings of the EM4 Indore Workshop IEA ECES IA Annex (2003), 17, pp 21-24.

[41] Feldman, D., et al.: "Fatty acids and their mixtures as phase-change materials for thermal energy storage". Solar energy materials, 18(3-4) (1989), pp. 201-216.

[42] DOMÍNGUEZ M., GARCÍA C. Transmisión de calor y de masa en régimen variable en los muros. XXXI Biental de la R.S.E.F. Granada, 2007.

[43] FAUSTINI C. Análisis del aprovechamiento energético de los acumuladores de cambio de fase en algunas propuestas constructivas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Arquitectura, 2007.

[44] DOMÍNGUEZ M., GARCÍA C., VITI A. Los microencapsulados en las instalaciones de climatización. El Instalador, 2008.

[45] Sarabia Méndez, D. (2020). Análisis del uso de materiales con cambio de fase en la envolvente térmica de una vivienda.

[46] Juárez, D. (2012). Estudio de materiales con cambio de fase (PCM) y análisis SEM de micro (PCM). NORMATIVA DE PUBLICACIÓN, 54.

[47] Navarrete Pardo, I. (2019). Desarrollo de compuestos con resina epoxi y materiales de cambio de fase.

[48] S. Ferreira, R. Bruns, H. Ferreira, G. Matos, J. Davida, G. Brandao, E. d. Silva, L. Portugal, P. d. Reisc, A. Souza y W. d. Santos, Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods, ELSEVIER, 2007.

Tunja, 15 de junio 2021

Universidad Santo Tomas – Seccional Tunja

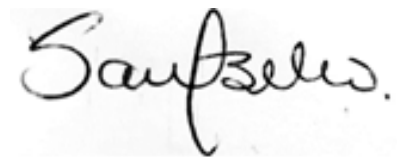
Aprobación del director del proyecto

Ludy Tatiana Florez Rodriguez

LUDY TATIANA FLOREZ RODRIGUEZ

CC. 1057605017, Sogamoso

Estudiante

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Sandra Consuelo Diaz Bello". The signature is written in a cursive, flowing style.

SANDRA CONSUELO DIAZ BELLO

CC. 35261639, Villavicencio

Director de proyecto