

COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS Y MATERIALES DE CAMBIO DE FASE PARA SU USO COMO MASA TÉRMICA EN UN TECHO PARA EL CLIMA DE SANTIAGO DE QUERÉTARO

Comparison of the thermal behavior of constructive materials and phase change materials for their use as thermal mass in a roof for Santiago de Querétaro climate

Dovile Kukukaite¹.
Juan Carlos Jáuregui Correa².

¹Estudiante de la Maestría en Arquitectura, Universidad Autónoma de Querétaro, kukukaite@gmail.mx

²Doctor en Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, juancarlosjauregui2007@gmail.com

RESUMEN

Se han diseñado varias técnicas constructivas como techos verdes, techos verdes activos (Roche, 2013) o techos con tina de agua (USC, 2016) con el propósito de aprovechar la energía solar en la climatización de los espacios interiores. Estos y otros tipos de masa térmica tienen ciertas propiedades que ayudan a almacenar el calor dentro de su masa. Precisamente en la ciudad de Santiago de Querétaro, un techo con masa térmica puede suavizar el golpe térmico causado por las grandes diferencias térmicas entre el día y la noche y por el alto nivel de radiación solar en la zona.

En este artículo se comparan posibles materiales para acumular el calor dentro de un sistema de techo. Hay una gran variedad de materiales de construcción que pueden realizar la función de masa térmica, sin embargo, existen además otro tipo de materiales, que no tienen mucha masa, pero que, por su alto valor de calor latente en los procesos de cambio de fase, acumulan grandes cantidades de energía calorífica.

Así mismo, se distinguen los materiales de construcción que mejor cumplen con las propiedades necesarias para acumular el calor y se calcula su espesor necesario para poder desfasar la onda térmica por 12 horas. También se eligen materiales de cambio de fase y su espesor óptimo para el clima de Querétaro. Finalmente, se comparan los materiales seleccionados térmicamente con el objetivo de mantener su temperatura más cercana, pero por encima, de los 27°C.

Palabras clave: energía térmica, masa térmica, materiales de cambio de fase.

ABSTRACT

There are several constructive techniques such as green roofs, active green roofs (Roche, 2013) or roofs with water tank (USC, 2016), which benefit from the solar energy to climatize interiors. These and other types of thermal mass own certain properties that facilitate the storage of heat inside of their masses. Precisely in Santiago de Querétaro is where the thermal mass can soften the hits of the heat caused by its great thermal difference between the day and the night and by high level of solar radiation in the zone.

This article contains the comparison of possible materials to accumulate the heat as a part of a roof's system. There is a great variety of constructive materials that are able to perform the function of a thermal mass. Besides, there are some materials that do not have much mass but still can store large quantities of heat inside its masses because of the latent heat during the processes of their fusion.

Some constructive materials are chosen because of their properties to store the heat and some calculations are made to define their thickness based on the necessity to offset the thermal heat wave for 12 hours. As well, some phase change materials are chosen and some calculations are made to define their thickness according to the climate's conditions of the zone. In the end, the comparison of the selected materials is made according to their possibilities to maintain their temperature close but above 27°C.

Key words: thermal energy, thermal mass, phase change materials.

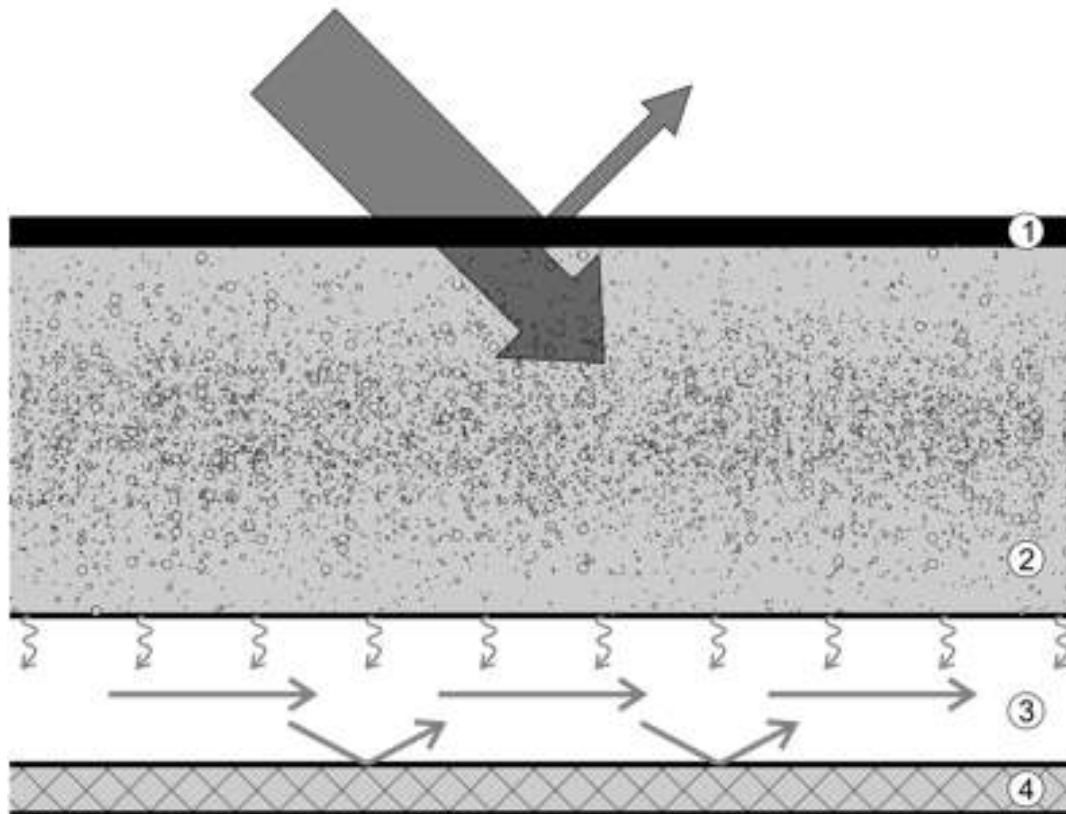
INTRODUCCIÓN

En México la mayor fuente de energía es el sol. El Promedio Global Horizontal de Irradiación (GHI) es de aproximadamente 5 kW/h•m² por día.

Para el clima de Querétaro, que recibe grandes cantidades de radiación solar y tiene mucha variación térmica entre la noche y el día, se necesita de un techo que suavice los golpes del calor emitido por el sol, y acumule esta energía para los momentos fríos del día. Con este propósito Kukukaite (2017) propuso un sistema de techo con masa térmica. La masa térmica permite repartir

adecuadamente la energía a lo largo de los periodos de consumo y puede evitar el golpe térmico que se produce en los momentos de captación (Neila, 2004).

Si se considera que una capa de masa térmica está dentro de un sistema de techo que absorbe y acumula la radiación solar, se puede comparar el comportamiento térmico de diferentes materiales dentro del mismo contexto. El sistema de techo, diseñado por Kukukaite (2017) se compone de varias capas:



1. Absorción de la radiación solar
2. Acumulación de calor
3. Circulación de flujo de aire
4. Aislamiento térmico

Figura 1. Capas del sistema de techo de Kukukaite.

Fuente: Kukukaite (2017).

Con base en este diseño, la capa de masa térmica obtiene energía calorífica de la capa de absorción térmica. Esta, expuesta al ambiente, es de una lámina de aluminio de 1 mm de espesor y funciona como una persiana con el propósito de cambiar sus superficies dependiendo de la necesidad de absorción.

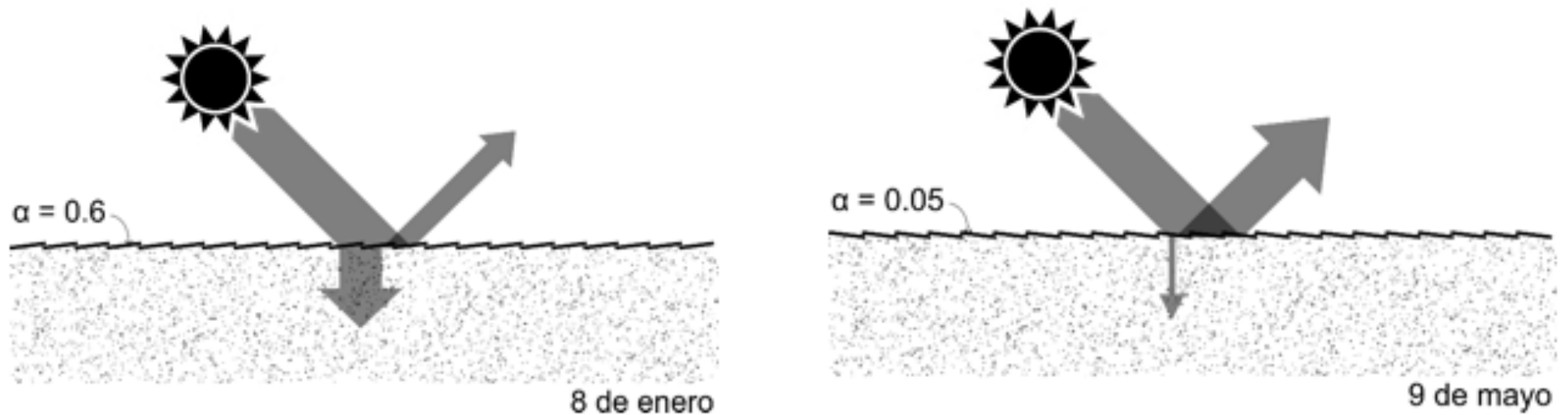
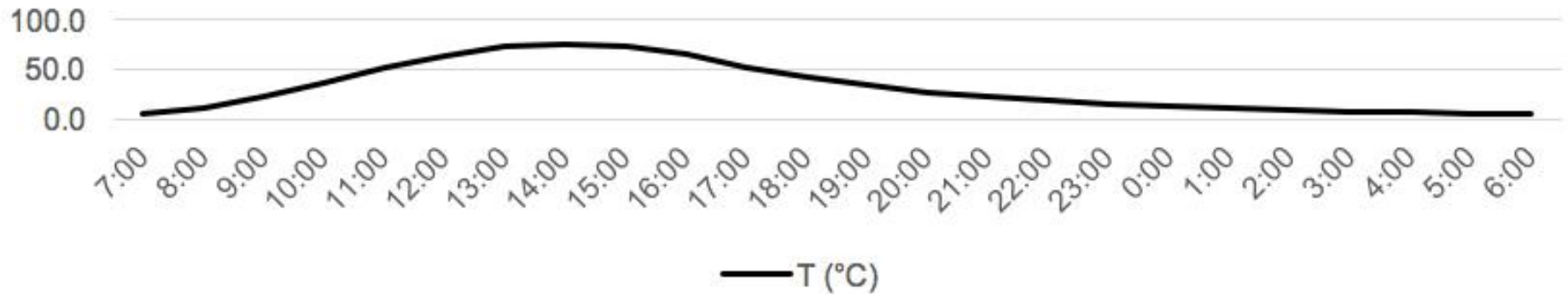


Figura 2. Capa exterior reversible para absorber diferentes cantidades de la radiación solar durante diferentes periodos de clima. Fuente: Kukukaite (2017).

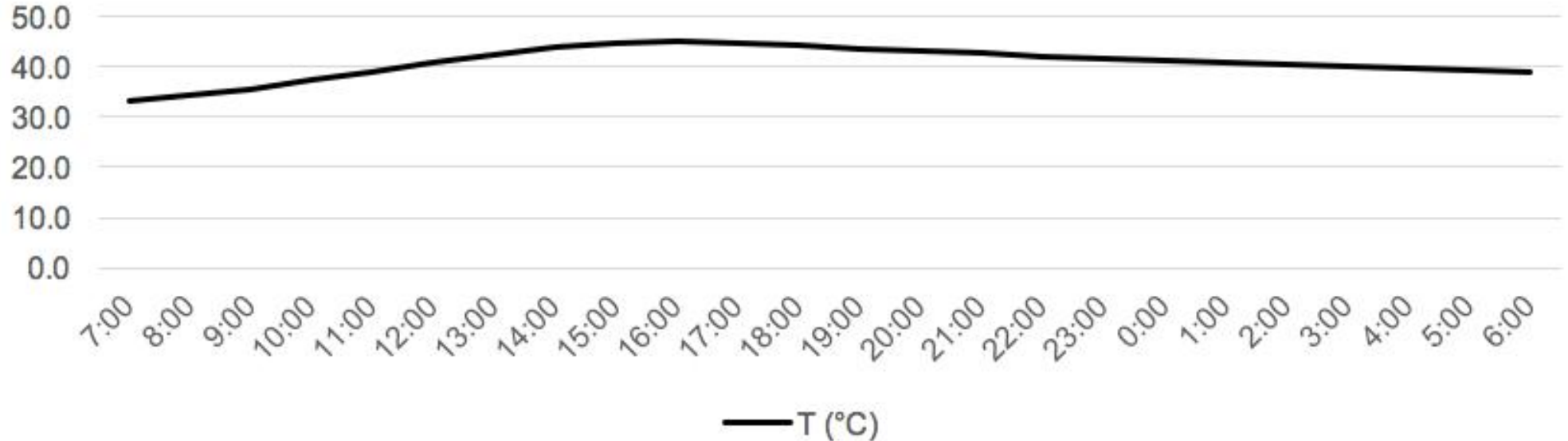
Durante el periodo de frío, la superficie expuesta al exterior es de color claro y absorbe 60% de la radiación solar (Figura 2). De esta manera, la temperatura de la capa exterior durante el 8 de enero, lo que es el día más frío de año en Santiago de Querétaro (CONAGUA, 2016), alcanza una temperatura de 75.5° C a las 14:00 horas (Gráfica 1).



Gráfica 1. Temperatura de una lámina de aluminio, expuesta a la radiación solar durante 8 de enero en Santiago de Querétaro. Fuente: Kukukaite (2017).

Y para los periodos de calor, la capa exterior se voltea con la finalidad de absorber menos de la radiación solar y evitar el sobrecalentamiento. Durante el 9 de mayo, lo que es el día más caliente de año en Santiago de Querétaro (CONAGUA, 2016), se absorbe 5% de la radiación solar con un acabado de metal pulido y la lámina de aluminio se calienta hasta 44.9°C a las 16:00 horas (Gráfica 2).

Esta energía térmica absorbida se acumula en la capa de masa térmica. El material más adecuado para esta capa es aquel que se caliente y mantenga su temperatura a los 27°C . Esta temperatura, según el diseño del sistema de techo, es necesaria con el propósito de calentar el aire dentro del sistema tanto, que después de llegar a los espacios habitados, por circulación de flujo de aire automatizada, se reciba la energía térmica suficiente para calentar los espacios hasta la temperatura de confort.



Gráfica 2. Temperatura de una lámina de aluminio, expuesta a la radiación solar durante 9 de mayo en Santiago de Querétaro. Fuente: Kukukaite (2017).

METODOLOGÍA

En este artículo se analizan posibles materiales para la capa de acumulación de calor en el sistema de techo y se comparan sus posibilidades para mantener la temperatura interna. A continuación se analizan dos tipos de materiales que acumulan el calor: el primer análisis es de materiales constructivos comunes de mucha masa, y el segundo, de materiales de cambio de fase que acumulan el calor dentro de su masa en los procesos de fusión.

En primer lugar, se eligen los materiales con mejores capacidades de desfasear la onda térmica, para que el calor llegue al interior en los momentos más fríos del día, y se definen sus espesores. Posteriormente, se eligen materiales de cambio de fase adecuados para la zona de Santiago de Querétaro y se definen sus espesores con base a la radiación solar que se recibe. Finalmente, se calculan las temperaturas horarias de los materiales seleccionados durante los días extremos térmicamente y se comparan con el objetivo de mantener la temperatura cercana, pero por encima de los 27° C.

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN COMO MASA TÉRMICA

En el sistema de techo se necesita que las mayores ganancias de calor traspasen al interior de la vivienda en los momentos más fríos del día, y la energía se aproveche para calentar los espacios habitados durante la noche. Cuando la temperatura exterior es máxima, se debe filtrar la mínima cantidad de calor con la finalidad de no sobrecalentar los interiores de los edificios. Esto significa que, la energía térmica tiene que traspasar el cerramiento en 12 horas. "El tiempo en que el calor tarda en atravesar el cerramiento se denomina desfase de la onda térmica" (Neila, 2004) y depende de los siguientes parámetros:

$$d = 0.0167 \cdot \frac{t}{2} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot C_e}{\pi \cdot \lambda \cdot t}} \cdot e$$

Desfase de la onda térmica

d – desfase de la onda térmica (h);
 t – periodo de la onda térmica (h);
 ρ – densidad del material (kg/m^3);
 C_e – calor específico del material ($\text{J}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);
 λ – conductividad térmica del material ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);
 e – espesor del material.

Sabiendo que el periodo es de un día (24 horas) y el desfase requerido es de 12 horas, las variables de un material adecuado tienen que cumplir con la siguiente ecuación:

$$\sqrt{\frac{\rho \cdot C_e}{\pi \cdot \lambda \cdot 24}} \cdot e = 60$$

Variables de material para un desfase de la onda térmica por 12 horas

Al elegir el material adecuado para la capa de masa térmica es importante optimizar su espesor con el propósito de reducir los costos de fabricación, simplificar la estructura constructiva y reducir el impacto a la estética del edificio. Para lograrlo, $\sqrt{(\rho \cdot C_e) / (\pi \cdot \lambda \cdot 24)}$ tiene que tener el mayor valor posible, lo que significa materiales con altos valores de densidad y calor específico, y baja conductividad térmica. Los materiales constructivos de mayor coincidencia según el catálogo CTE (Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción, 2006) son:

| Material | ρ (kg/m ³) | λ (W/m· °C) | C_e (J/kg· °C) | $\frac{\rho \cdot C_e}{\pi \cdot \lambda \cdot 24}$ |
|----------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------|---|
| Madera conífera | 520 | 0.15 | 1600 | 73602 |
| Corcho comprimido | 500 | 0.10 | 1560 | 103503 |
| Linóleo natural | 1200 | 0.17 | 1400 | 131135 |
| Caucho natural | 1200 | 0.17 | 1400 | 131135 |
| Neopreno | 1240 | 0.23 | 2140 | 153097 |

Fuente: Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción (2006)

Tabla 1. Materiales constructivos adecuados para un desfase de la onda térmica por 12 horas.

El catálogo CTE (2006) no provee algunos parámetros de los aislantes térmicos, los cuales también podrían ser adecuados para obtener el desfase de 12 horas, ya que su conductividad térmica es baja. Los aislantes térmicos que tienen altos valores de densidad térmica y calor específico obtenidos son (Willems y Wolfgang, 2011):

| Material | ρ (kg/m ³) | λ (W/m· °C) | Ce (J/kg· °C) | $\frac{\rho \cdot C_e}{\pi \cdot \lambda \cdot 24}$ |
|-----------------|--------------------------------|------------------------|------------------|---|
| Arlita | 550 | 0.08 | 1100 | 100351 |
| Cáñamo raspado | 150 | 0.06 | 1500 | 49761 |
| Fibra de madera | 250 | 0.05 | 1850 | 122744 |
| Lana de madera | 300 | 0.10 | 2100 | 83599 |
| Cocos | 90 | 0.05 | 1500 | 35828 |
| Algas | 75 | 0.05 | 2000 | 39809 |

Fuente: Willems y Wolfgang (2011).

Tabla 2. Aislantes térmicos adecuados para un desfase de la onda térmica por 12 horas.

De todos los materiales analizados, el neopreno es el que ofrece los mejores resultados. Lamentablemente, este material no puede ser considerado como parte del sistema porque está en la lista roja de los materiales constructivos. “Los materiales constructivos de la lista roja son nocivos para las creaturas vivas incluyendo el humano o el ambiente” (Kesavan, 2016)

Tomando en cuenta los materiales que no son nocivos con el ambiente, las mejores opciones de masa térmica son el linóleo natural, el caucho natural, la fibra de madera y el corcho comprimido. Después de escoger los materiales, se puede calcular el espesor necesario de cada uno. Usando los parámetros de los materiales de la Tabla 1 y la Tabla 2, y aplicando la ecuación de desfase de la onda térmica por 12 horas [2], se encuentran los espesores óptimos de los materiales seleccionados.

| Material | ρ (kg/m ³) | λ (W/m· °C) | Ce (J/kg· °C) | e (m) |
|-------------------|--------------------------------|------------------------|------------------|-------|
| Linóleo o caucho | 1200 | 0.17 | 1400 | 0.17 |
| Fibra de madera | 250 | 0.05 | 1850 | 0.17 |
| Corcho comprimido | 500 | 0.10 | 1560 | 0.19 |

Fuente: Kukukaite (2017)

Tabla 3. Espesor necesario de los materiales de construcción seleccionados para un desfase de la onda térmica por 12 horas.

Se puede observar que una capa de linóleo, caucho o de fibra de madera necesita tener 17 cm de grosor y una capa de corcho 19 cm para poder desfasar la onda térmica por 12 horas (Tabla 3).

MATERIALES DE CAMBIO DE FASE COMO MASA TÉRMICA

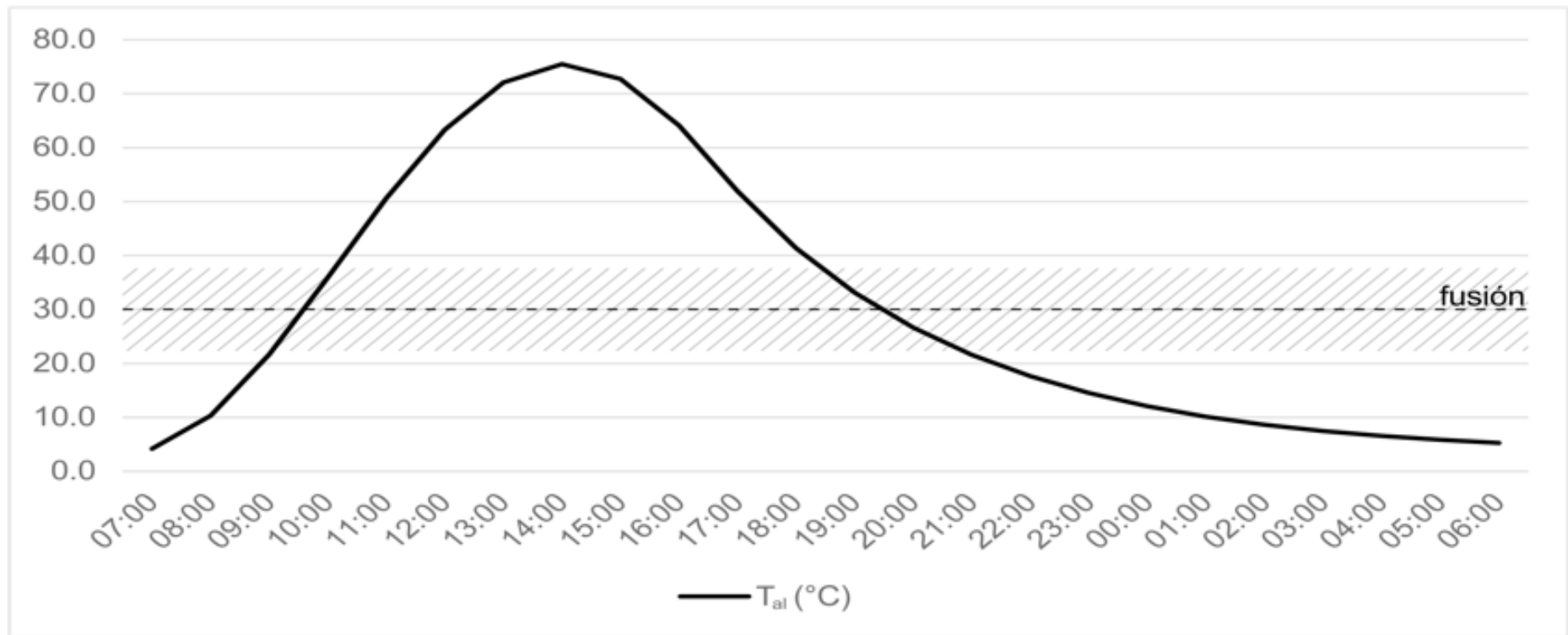
Anteriormente se comprobó que los materiales de alta inercia térmica acumulan el calor de la radiación solar en su masa por un día completo. Existe otro método para acumular la energía calorífica aplicando materiales de cambio de fase.

Estos materiales, a diferencia de los materiales comunes de construcción, no necesitan tener mucha masa para almacenar el calor. Los materiales de cambio de fase son los que cambian su estado a ciertas temperaturas ambientales. Cuando alcanzan temperatura de su punto de fusión, se derriten y absorben la energía térmica en su masa. Después, cuando la temperatura baja al mismo punto, los PCM regresan a su estado previo soltando la energía térmica acumulada. El calor, necesario para el cambio de fase de un material, se denomina calor latente. Durante este proceso, la temperatura del material no se cambia. Por esta razón, los PCM no necesitan tener mucha masa para acumular la energía calorífica.

La elección del material de cambio de fase adecuado para el contexto analizado depende de la cantidad de calor que se recibe durante el día más frío de año. El 8 de enero es un día crítico para el proceso de fusión ya que la cantidad de calor que se recibe es mínima. La temperatura promedio de este día es óptima para la fusión de un material.

La Gráfica 3 representa la curva y el promedio de la temperatura horaria de la capa de aluminio durante el 8 de enero. Esta temperatura de alrededor de 30° C es óptima para que el material de cambio de fase alcance a derretirse y solidificarse de nuevo, aún en el día más frío de año. Los materiales de la Tabla 4 son los que tienen temperatura de fusión alrededor de los 30° C y tienen

definidas las propiedades necesarias para evaluar su efectividad. El $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, o mejor conocido como cloruro de calcio hexahidratado, es una sal hidratada, y el octadecano es una parafina, el ácido cáprico pertenece al grupo de ácidos grasos y el galio es un metal que también se funde a una temperatura cercana.



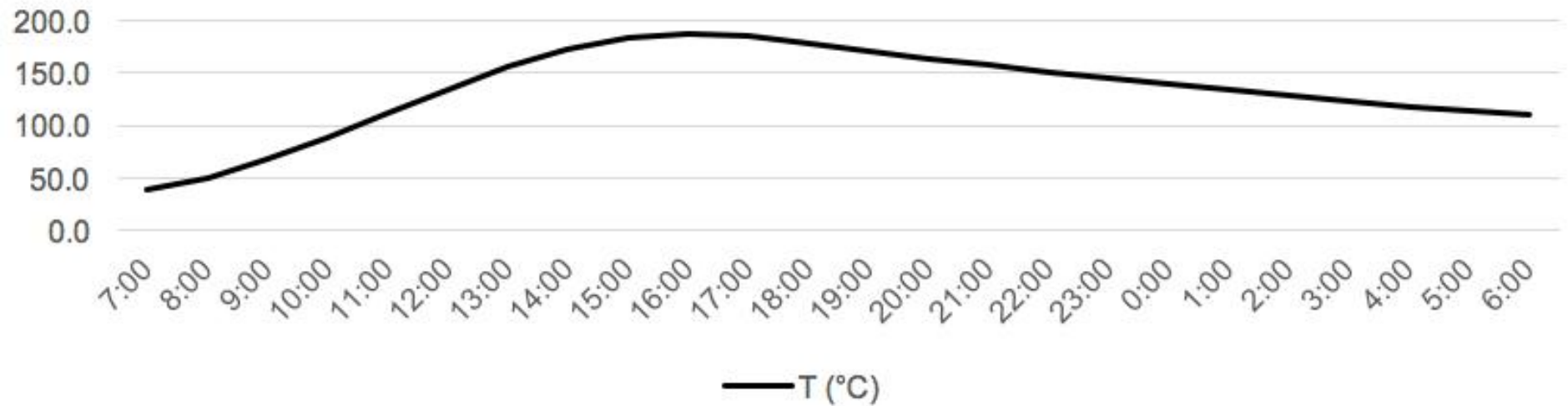
Gráfica 3. Promedio térmico de la capa de aluminio del día 8 de enero y la temperatura de fusión óptima para los PCM. Fuente: Kukukaite (2017).

| Material | $T_{\text{fusión}}$ (° C) | C_L (kJ/kg) | C_e (kJ/kg· °C) | ρ (kg/m ³) | λ (W/m· °C) |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------|
| CaCl ₂ ·6H ₂ O | 29 | 125 | 1.4-2.1 | 1470 | 1.9-0.54 |
| Octadecano | 29 | 243 | 1.9-2.25 | 775 | 0.28 |
| Ácido cáprico | 31.5 | 153 | 2.09 | 1004-886 | 0.152 |
| Galio | 30 | 80 | 0.34-0.38 | 6094 | 33 |

Fuente: Datos basados en investigación de Hale y col. (1971), Griggs y Humphries (1977), Kaushik y cols. (2011), Chuah y cols. (2006), García-Santos y cols. (2012) y Vélez y cols. (2015).

Tabla 4. PCM con puntos de fusión alrededor de los 30° C y sus propiedades.

En el caso de los materiales de cambio de fase, el espesor de la capa depende de la cantidad de calor latente. Idealmente el material absorbe toda la energía solar para derretirse y se mantiene a la temperatura constante. Como un PCM a veces está en estado líquido, debe de estar contenido dentro de un depósito sellado. Por esta razón no se puede aplicar la capa exterior de aluminio reversible y la absorción de la radiación solar es de 60% durante todo el año. Esto resulta en una temperatura elevada de la capa de aluminio durante el 9 de mayo:



Gráfica 4. Temperatura de una lámina de aluminio que absorbe 60% de la radiación solar durante 9 de mayo en Santiago de Querétaro. Fuente: Kukukaite (2017).

Durante los días calientes, toda la energía recibida debería ser utilizada en el proceso de fusión. De otra manera, una vez derretido el material, se calienta relativamente rápido. En el proceso de fusión se calculan solo las ganancias de calor por conducción por el tiempo que esto sucede (Kukukaite, 2017):

$$Q = U \cdot (T_{al} - T_{PCM}) \cdot t$$

Energía que obtiene un PCM de aluminio en proceso de conducción

Donde:

Q – energía obtenida en un periodo de tiempo (J);

U – transmitancia térmica del material (W/m²•°C);

T_{al} – temperatura de aluminio promedio cuando está superior a la temperatura del PCM (°C);

T_{PCM} – temperatura inicial del material (°C);

t – tiempo (s).

Con base a la investigación en el sistema de techo de Kukukaite (2017), se asume que la temperatura inicial de la masa térmica es de 27° C. Esta obtiene la energía calorífica de la lámina de aluminio, que durante el día más caliente del año su temperatura es mayor a los 27° C con promedio de 133.8° C (Gráfica 4). La energía calorífica que recibe un PCM durante el 9 de mayo:

$$Q=U \cdot (133.8-27) \cdot 86400$$

$$Q=U \cdot 9227520$$

Esta cantidad de energía calorífica recibida debe de ser absorbida por el material de cambio de fase para su fusión (Kukukaite, 2017):

$$C_L \cdot \rho \cdot e = U \cdot 9227520$$

Energía de fusión de un material equivalente a la energía que él recibe durante el 9 de mayo

Donde:

C_L – calor latente del material (J/kg).

Cuando (Kukukaite, 2017):

$$U = \frac{\lambda}{e}$$

El espesor de un material necesario es:

$$e = \sqrt{\frac{\lambda \cdot 1726920}{C_L \cdot \rho}}$$

Entonces, aplicando la ecuación [5] se encuentran los espesores necesarios de los PCM seleccionados para funcionar en una zona con el nivel de la radiación solar como la de Santiago de Querétaro.

| Material | C_L (kJ/kg) | ρ (kg/m ³) | λ (W/m· °C) | e (m) |
|--------------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------|-------|
| CaCl ₂ ·6H ₂ O | 125 | 1470 | 1.9 | 0.25 |
| Octadecano | 243 | 775 | 0.28 | 0.12 |
| Ácido cáprico | 153 | 1004 | 0.15 | 0.10 |
| Galio | 80 | 6094 | 33 | 0.79 |

Fuente: Kukukaite (2017).

Tabla 5. Espesor de la capa de PCM.

COMPARACIÓN

Con la finalidad de comparar todos los materiales seleccionados térmicamente, se calcula la temperatura horaria de cada uno en los días extremos de año. Los materiales de masa térmica reciben la energía calorífica desde la capa de aluminio por conducción (Kukukaite, 2017):

$$\frac{Q_{cond}}{t} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Cantidad de calor por conducción

Donde:

Q_{cond}/t – ganancias de calor conducción (W);

A – área de la superficie expuesta al sol (m^2), el área de los cálculos de comparación es $1 m^2$;

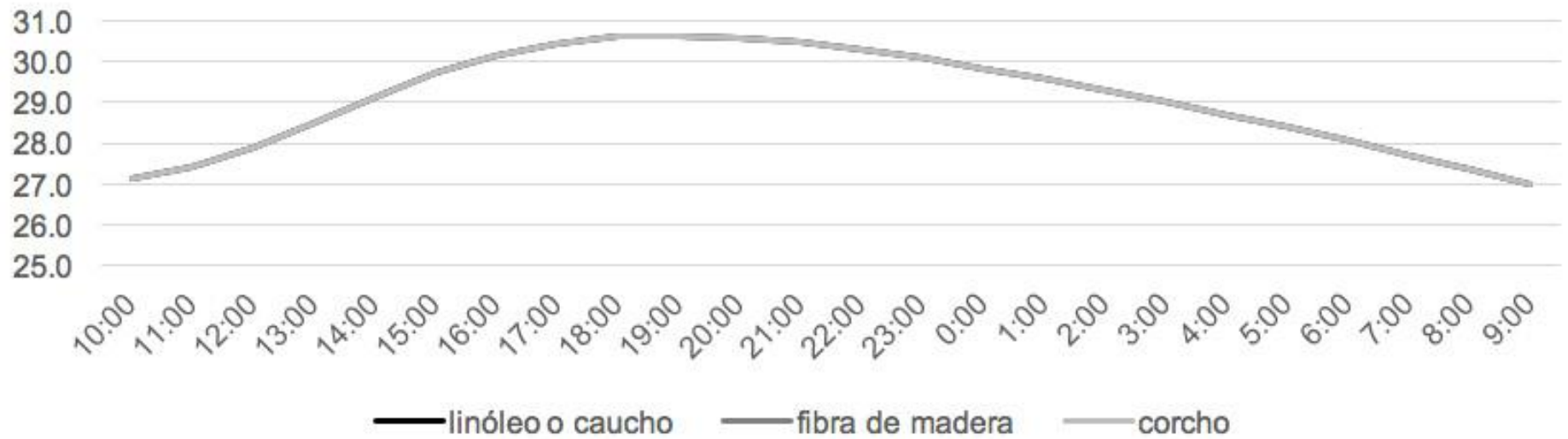
ΔT – diferencia entre temperatura de la capa de aluminio y la capa de masa térmica ($^{\circ}C$).

Entonces, la temperatura final de un material se calcula de la siguiente manera (Kukukaite, 2017):

$$T_{final} = \frac{Q}{m \cdot C_e} + T_{inicial}$$

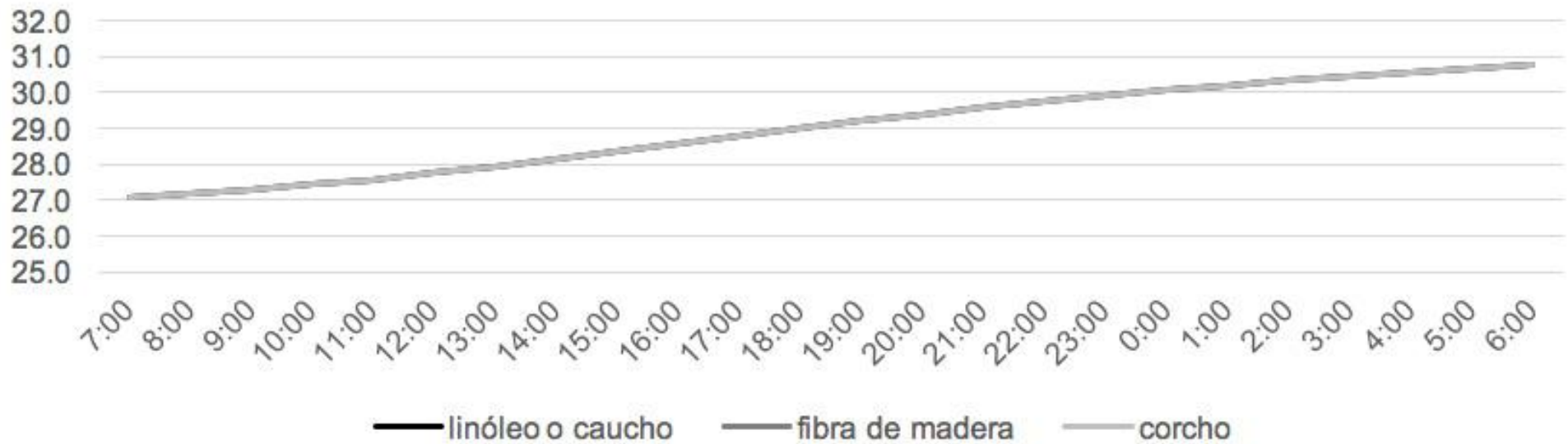
Temperatura final de un material

Utilizando los datos de las tablas 1, 2 y 3, y aplicando las ecuaciones [6] y [8] se calculan las temperaturas horarias de los materiales constructivos seleccionados durante el 8 de enero y el 9 de mayo:



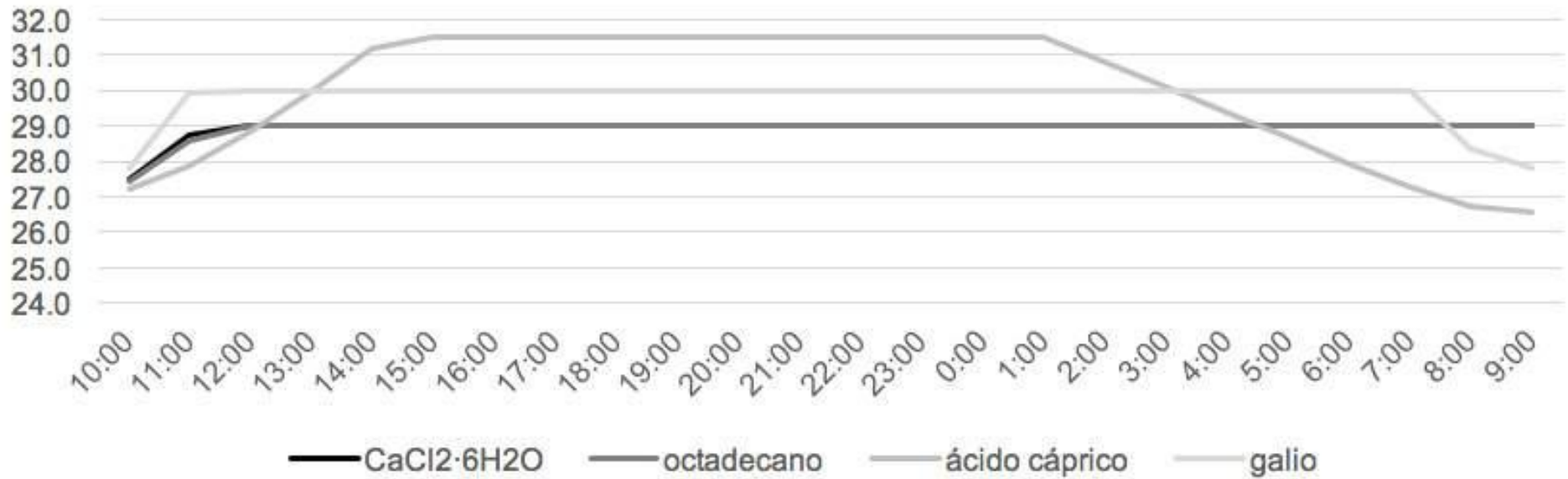
Gráfica 5. Temperatura horaria de los materiales de construcción seleccionados durante el 8 de enero. Fuente: Kukukaite (2017).

La Gráfica 5 y la Gráfica 6 muestran que una capa de linóleo, caucho o fibra de madera de 17 cm, o corcho comprimido de 19 cm, mantiene la temperatura interior por arriba de los 27° C durante los días extremos térmicamente. En el día más frío del año, la capa alcanza temperaturas de 30.6° C a las 19:00 horas. Y el 9 de mayo la máxima temperatura, de 30.8° C, es a las 6:00 horas.



Gráfica 6. Temperatura horaria de los materiales de construcción seleccionados durante el 9 de mayo. Fuente: Kukukaite (2017).

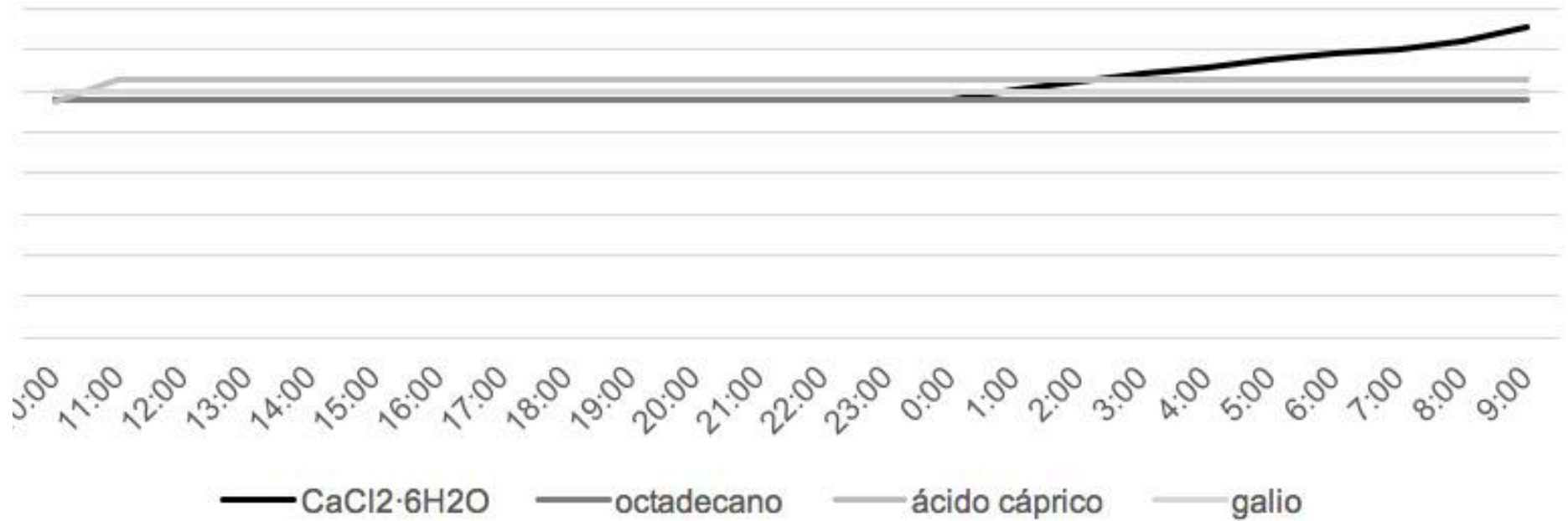
De la misma manera, utilizando los datos de las tablas 4 y 5, se encuentran las temperaturas horarias de los materiales de cambio de fase seleccionados durante el 8 de enero y el 9 de mayo:



Gráfica 7. Temperatura horaria de los materiales de cambio de fase seleccionados durante el 8 de enero. Fuente: Kukukaite (2017).

La gráfica 7 muestra que todos los materiales de cambio de fase seleccionados alcanzan la temperatura de su fusión y se mantienen a esta temperatura durante casi todo el día el 8 de enero. El único material que baja del límite de la temperatura mínima requerida del sistema es el ácido cáprico. Su temperatura al final del periodo es de 26.6° C.

Por otra parte, el 9 de mayo, el material que proporciona peores resultados es la sal hidratada. Esta alcanza a derretirse completamente a las 0:00 horas y continua calentándose hasta que a las 9:00 horas alcanza una temperatura de 37.7° C. Los demás materiales se mantienen a la temperatura de su fusión.



Gráfica 8. Temperatura horaria de los materiales de cambio de fase seleccionados durante el 9 de mayo. Fuente: Kukukaite (2017).

CONCLUSIONES

Después de que se calculan las temperaturas horarias de los materiales seleccionados durante los días extremos, se puede apreciar la estabilidad térmica de ellos. Como se ha observado anteriormente, todos los materiales de construcción, ya sea linóleo, caucho, corcho o fibra de madera tienen la misma estabilidad térmica durante los días extremos y todos pueden ser la capa de acumulación de calor dentro del sistema de techo en Santiago de Querétaro ya que su temperatura nunca baja los 27° C.

Por otra parte, los materiales de cambio de fase tienen diferentes variaciones térmicas bajo las mismas condiciones. El ácido cáprico resulta no ser aplicable dentro del sistema, ya que su temperatura desciende por debajo de los 27° C al final del día más frío del año, y la sal hidratada obtiene la temperatura más elevada de todos los materiales durante el periodo de calor. Entonces, los PCM que pueden ser utilizados dentro del sistema son el octadecano y el galio.

Se concluye que los beneficios de los materiales de cambio de fase de acumular el calor sin necesidad de mucha masa no son tan evidentes, ya que la capa de octadecano que se necesita es solo 5 cm menor que la de linóleo, caucho o fibra de madera para obtener los mismos resultados. Y la capa de galio necesaria es incluso 60 cm más grande que la de corcho.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Chuah, T., y cols. (2006). Fatty acids used as phase change materials (PCMs) for thermal energy storage in building material applications. *Jurutera*, 8-15.

Conagua. (2016). *gob.mx/conagua*. Extraído el 28 de enero de 2017 desde: <http://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=gro>.

García-Santos, A., Neila, F. J., y Oliver, A. (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*, 131-140.

GeoSun Africa. (2016). *geosun*. Extraído el 15 de febrero de 2016 desde: <http://geosun.co.za/solar-maps/>

Greenspec. (2017). *greenspec.co.uk*. Extraído el 1 de marzo de 2017 desde: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/red-list-of-banned-toxic-construction-materials/>

Greenstream Publishing Limited. (2015). *solarelectricityhandbook.com*. Extraído el 15 de febrero de 2016 desde: <http://solarelectricityhandbook.com/solar-angle-calculator.html>

Griggs, E., y Humphries, W. (1977). *A Design Handbook for Phase Change Thermal Control and Energy Storage Devices*.

Hale, D., Hoovers, M., y O'Neill, M. (1971). *Phase Change Materials Handbook*.

Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción. (2006). *CATÁLOGO DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DEL CTE*.

Kaushik, S. C., y cols. (2011). Experimental study of supercooling and pH behaviour of a typical phase change material for thermal energy storage. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 117-125.

Kesavan, G. T. (2016). Lean, Green and DMADV Tool Based Approach for an Effective Execution of Residential Building Construction Improvement. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 778-783.

Kreider, J. F. (2002). *Heating and Cooling of Buildings*. En J. F. Kreider, *Heating and Cooling of Buildings (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering)* (págs. 16-17).

Kukukaite, D. (2017). *Sistema automático de control térmico para viviendas unifamiliares aprovechando techos de masa térmica*.

Matti Tukiainen. (2016). *gaisma*. Obtenido de *gaisma*: <http://www.gaisma.com/en/location/queretaro.html>

Neila, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*.

Osegura, O. (2010). *greentechmedia.com*. Extraído el 13 de febrero de 2016 desde: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/sunny-mexico-an-energy-opportunity>

Reiter, A.-T. N. (2014). A climate analysis tool for passive heating and cooling strategies in hot humid climate based on Typical Meteorological Year data sets. *Energy and Buildings*, 756-763

Valera, J. P. (2005). *Apuntes de Física General*.

Wheeland, M. (2014). *pureenergies.com*. Extraído el 13 de febrero de 2016 desde: <http://pureenergies.com/us/blog/top-10-countries-using-solar-power/>

Willems, K. S., y Wolfgang, M. (2011). *Wärmeschutz: Grundlagen, Berechnung, Bewertung*.