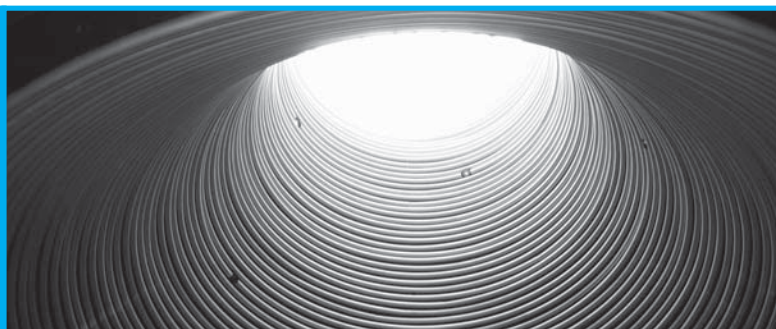


*Portland cement mortar*  
*with microencapsulated*  
*paraffin*

# Mortero de cemento Portland con parafinas microencapsuladas



## **Autores**

ZETOLA VARGAS, V. Universidad Católica del Norte  
vzetola@ucn.cl  
Antofagasta, Chile

GARCÍA SANTOS, A. Universidad Politécnica de Madrid  
Madrid, España

NEILA GONZÁLEZ, F. J. Universidad Politécnica de Madrid  
Madrid, España

**Fecha de recepción** 27/12/2012

**Fecha de aceptación** 05/04/2013

## Resumen

El almacenamiento de energía, utilizando calor latente con materiales de cambio de fase (PCM), en la construcción, puede producir mejoras en el acondicionamiento térmico de los edificios y reducir el consumo de energía. Por su posibilidad de uso en los materiales de construcción, las parafinas microencapsuladas aparecen como una buena alternativa tecnológica. En el presente trabajo se expone su aplicación a morteros de cemento en cantidades de 10,

15 y 20 %, con dos tipos de cemento Portland y relaciones agua/cemento de 0,5, 0,7 y 1,0. También se verifica el efecto de las fibras de polipropileno en las mezclas de mortero con parafina microencapsulada. Los resultados permiten ver los efectos en las propiedades del mortero, observándose disminución de resistencia y densidad. Se exponen, igualmente, antecedentes que aportan al diseño de este tipo de mezclas.

**Palabras clave:** Material de cambio de fase (PCM), morteros, cemento.

## Abstract

*Energy storage by using latent heat with phase change materials (PCM), in construction, can produce improvements in the thermal conditioning of buildings and reduce energy consumption. For its possibility of use in building materials, the microencapsulated paraffin appears as a technological good alternative. This paper expose its application to cement mortars in quantities of 10, 15*

*and 20%, with two types of Portland cement and water / cement ratios of 0.5, 0,7 and 1,0. It also verifies the effect of polypropylene fibers in mortar mixes with microencapsulated paraffin. The results allow to see the effects on the properties of the mortar, showing strength and density reduction. Backgrounds that bring to the design of such mixtures are provided.*

**Keywords:** Phase change materials (PCM), mortar, cement.

## 1. Introducción

El almacenamiento de energía en las paredes, el techo y el piso de los edificios se puede mejorar mediante la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM), los que pueden aumentar la inercia térmica, disminuir los cambios de temperatura del aire en interiores y mejorar el rendimiento térmico de las habitaciones (Xin, YinPing, Wei, RuoLang, & Qunli, 2009). El almacenamiento por calor latente se utiliza menos en aplicaciones arquitectónicas que el calor sensible, pero su capacidad de acumulación es mucho mayor (Neila, 2004).

Existe una gran variedad de PCM, de composición y características diversas (Castell, Martorell, Medrano, Pérez, & Cabeza, 2010; Farid, Khudhair, Razack, & Al Hallaj, 2004; Oliver, Neila, & García Santos, 2012; V. Tyagi & Buddhi, 2007; Xin, YinPing, Wei, RuoLang, & Qunli, 2009; Y. Zhang, Zhou, Lin, Zhang, & Di, 2007). Los más comunes en el rango de temperaturas 20 °C y 80 °C, adecuadas para fines arquitectónicos, son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos (Oliver, 2009). Los PCM se pueden incorporar en los materiales de construcción mediante aplicación directa, inmersión, encapsulación (macrocápsulas y microcápsulas) y de tableros laminados (Zhang *et al.*, 2007). Los PCM orgánicos presentan menor conductividad térmica y capacidad de almacenamiento de calor latente que los PCM inorgánicos y pueden resultar inflamables dependiendo de su contenedor (Kuznik, David, Johannes, & Roux, 2011).

La microencapsulación (V. V. Tyagi, Kaushik, Tyagi, & Akiyama, 2011) es una de las tecnologías conocidas y de avanzada, para una mejor utilización de los materiales de cambio de fase en la construcción. El microencapsulado tiene la ventaja de ser de fácil aplicación, mejora su transmisión térmica debido al incremento de la superficie de intercambio y no necesita protección contra la destrucción (Oliver, 2009). Se han investigado varias aplicaciones en la construcción, en diferentes materiales (Oliver Ramírez, García Santos, & Neila-González, 2011; Oliver, Neila, & García, 2011; Schossig, Henning, Gschwander, & Haussmann, 2005; V. V. Tyagi *et al.*, 2011; Xin, YinPing, Wei, RuoLang, & Qunli, 2009).

Algunas investigaciones de aplicaciones de PCM en morteros y hormigones: (D. Bentz & Turpin, 2007; D. Zhang, Zhou, Wu, & Li, 2005) investigaron impregnación de PCM en áridos ligeros. (Lee, Hawes, Banu, & Feldman, 2000) investigaron impregnación en bloques de hormigón. (D. P. Bentz, Peltz, Durán Herrera, Valdez, & Juárez, 2011) analizan el efecto de impregnación de áridos livianos en el comportamiento térmico del hormigón, durante la etapa de fraguado y también expuesto a congelamiento.

Respecto a aplicaciones de microcápsulas de parafinas en morteros y hormigones: (Cabeza *et al.*, 2007), investigan hormigón con 5 % de microencapsulados de PCM en muros. (Felix & Aguiar, 2009) concluyeron que la incorporación del 20% y 30 % de las microcápsulas de PCM disminuye la resistencia. (Hunger, Entrop, Mandilaras, & Founti, 2009) investigaron mezclas de hormigón autocompactante con PCM, detectaron la disminución de resistencias, rompimiento parcial de microcápsulas y la acumulación de microcápsulas sin dispersar en la superficie. (Sa, Azenha, de Sousa, & Samagaio, 2012) igualmente estudiaron varias muestras de mortero con diferente composición, incluyendo fibras de polipropileno en algunos morteros. (Meshgin, 2012), estudió las características de hormigones con parafina microencapsulada.

En la presente investigación se confeccionaron mezclas de mortero con diferentes contenidos parafinas microencapsuladas y diferentes tipos de cemento, con el objetivo de verificar los cambios de resistencia y densidad que se producen, obteniendo antecedentes que pueden aportar al diseño de este tipo de mezclas e información sobre los contenidos máximos de microcápsulas de parafina que pueden utilizarse. También se estudió el efecto en las mezclas de mortero con la incorporación de fibras de polipropileno.

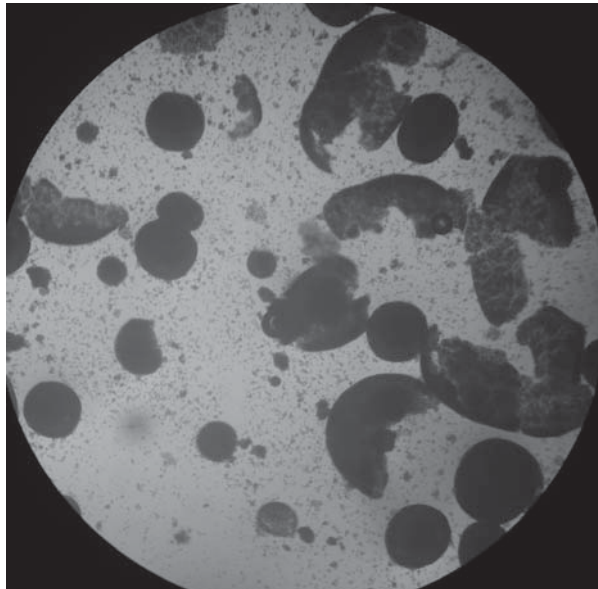
## 2. Procedimiento experimental

Con el fin de evaluar cómo afectan algunas variables en las características físicas y mecánicas de los morteros con microcápsulas de PCM se realizaron diversas mezclas aplicando diferentes tipos y cantidades de parafinas microencapsuladas, cementos, y relaciones agua/cemento (w/c). Se obtuvieron antecedentes tendientes a determinar una proporción óptima de PCM microencapsulado y que aportan al diseño de este tipo de mezclas.

### 2.1. Materiales utilizados

Para la confección de morteros se utilizó Micronal DS 5001 X. Según su ficha técnica proporcionada por el fabricante, son microcápsulas en polvo seco, conformadas por una mezcla de parafina microencapsulada con polimetilmetacrilato altamente reticulado, aglomeradas en partículas de entre 0,1 a 0,3 mm las que se dispersan durante la mezcla (Figura 1). Las microcápsulas individuales son de aproximadamente 5 µm y la temperatura de cambio de fase es de 26 °C, con calor latente de 110 kJ/kg (BASF, 2008). Su densidad es de 980 kg/m<sup>3</sup> (Oliver, 2009).

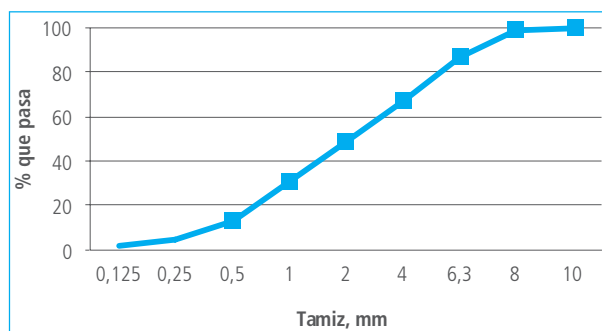
**Figura 1.** Microcápsulas individuales dispersándose en agua



Se utilizaron cementos Portland UNE EN 197-1, tipos CEM I 42,5 R y CEM I 52,5 R. Según información entregada por el fabricante cementos Portland Valderrivas, tienen superficie específica Blaine de 3750 cm<sup>2</sup>/gr y 4750 cm<sup>2</sup>/gr, y resistencias a compresión habituales a 28 días de 56 y 63 MPa, respectivamente. Su densidad es de 3050 kg/m<sup>3</sup>.

Se utilizaron áridos considerando espesores de mortero de 4 cm. La arena silíceo utilizada es de río, de canto rodado. La granulometría se muestra en Figura 2, y su densidad de partículas con superficie seca es de 2600 kg/m<sup>3</sup>.

**Figura 2.** Granulometría arena



Por los requerimientos mecánicos y de trabajabilidad del mortero, se usó superplastificante de alto rango, de nombre comercial Sika Viscocrete 5720. Para la confección de algunas mezclas de mortero se usó fibras a base de multifilamento de polipropileno de 19 mm de nombre comercial Grace Micro Fiber.

## 2.2. Ensayos

Para la determinación de la densidad aparente del mortero fresco con microcápsulas de PCM, se utilizó un recipiente de vidrio de aproximadamente 0,25 l. Se llenó con mortero en tres capas, compactadas con 15 golpes de pisón de madera de sección cuadrada de 12 mm. Se usó una placa de enlace de vidrio.

La determinación de la consistencia de morteros con parafinas microencapsuladas en la mesa de sacudidas se basó en lo indicado en la norma UNE-EN 1015-3, con excepción de la confección de la muestra de ensayo, que se realizó según lo descrito en el apartado 6.2 de la norma UNE EN 196-1, aunque primero se introdujeron en la mezcladora todos los materiales y se mezclaron a mano por 15 segundos.

La metodología de ensayo para la determinación de la resistencia a compresión y flexión de morteros con parafinas microencapsuladas fue la siguiente: (a) El amasado se realizó según lo descrito en el párrafo anterior. (b) La mezcla se vierte en los moldes prismáticos de 40 x 40 x 160 mm, y se compactan de acuerdo a norma UNE EN 1015-11. (c) El molde se envuelve con una película plástica, una vez desmoldadas las probetas se envuelven en película plástica, hasta el momento del ensayo. Para los ensayos a edades mayores a 28 días se dejan con la película plástica hasta los 28 días, luego se dejan al ambiente del laboratorio. (d) Se determinó la resistencia a flexión y a compresión, de acuerdo a UNE EN 196-1.

El % de aire atrapado se estimó utilizando la metodología indicada en norma chilena NCh 1564 Of 2009, Anexo C.

## 2.3. Diseño de mezclas y plan de ensayos

Como no se tienen antecedentes anteriores, especialmente en las cantidades de agua, se realizaron mezclas preliminares. Se definió una consistencia en mesa de sacudidas de la mezcla de tipo plástica, de alrededor de 180 mm. Se estimó una cantidad de aire de 3,5 %, esta debió ser corregida para contenidos mayores de PCM en la mezcla. El aditivo superplastificante se usó en una dosis máxima recomendada por el fabricante, 1,5 % del peso del cemento, excepto para los morteros sin adición de PCM, en las que se usó un 0,5 % del

peso del cemento. La determinación del cemento se hizo a partir de la cantidad de agua y la relación agua/cemento requerida de acuerdo al plan de ensayos. El agua considerada en la relación agua/cemento incluye la parte líquida agregada por el aditivo superplastificante. El PCM se usó en reemplazo de arena, por lo que la máxima cantidad a incorporar, es el volumen que ocupa la arena.

En la Tabla 1, se entregan las dosificaciones ocupadas, corregidas por el contenido de aire. La identificación

de cada muestra indica el tipo de cemento utilizado CEM I 42,5 R (I42,5) y CEM I 52,5 R (I52,5), la relación agua/cemento (0,50; 0,70; 0,90; 1,00) y la proporción en peso de parafina microencapsulada (00, 10, 15 y 20), referida al peso del m<sup>3</sup> de mortero obtenido.

Para hacer una comparación de curvas de endurecimiento de morteros con y sin parafinas microencapsuladas, se confeccionaron probetas para medir la resistencia a 7, 28 y 90 días, de las mezclas I42,5-0,50-00 y I42,5-0,50-10.

**Tabla 1.** Mezclas de mortero utilizadas

| Identificación | Relación w/c real | Cantidades en kg por m <sup>3</sup> |     |       |      |                            | PCM, % en peso | Densidad teórica kg/m <sup>3</sup> |
|----------------|-------------------|-------------------------------------|-----|-------|------|----------------------------|----------------|------------------------------------|
|                |                   | Cemento                             | PCM | Arena | Agua | Aditivo superplastificante |                |                                    |
| I42,5-0,50-00  | 0,49              | 454                                 | 0   | 1592  | 223  | 2,3                        | 0              | 2270                               |
| I42,5-0,50-10  | 0,50              | 606                                 | 179 | 716   | 300  | 9,1                        | 10             | 1810                               |
| I42,5-0,50-15  | 0,50              | 741                                 | 241 | 257   | 367  | 11,1                       | 15             | 1620                               |
| I42,5-0,50-18  | 0,51              | 774                                 | 256 | 0     | 386  | 11,6                       | 18             | 1430                               |
| I42,5-0,58-20  | 0,58              | 696                                 | 271 | 0     | 396  | 10,4                       | 20             | 1370                               |
| I42,5-0,70-00  | 0,70              | 312                                 | 0   | 1676  | 215  | 3,1                        | 0              | 2210                               |
| I42,5-0,70-10  | 0,70              | 413                                 | 181 | 922   | 285  | 6,2                        | 10             | 1810                               |
| I42,5-0,70-15  | 0,71              | 488                                 | 242 | 544   | 342  | 7,3                        | 15             | 1620                               |
| I42,5-0,70-20  | 0,70              | 543                                 | 281 | 209   | 375  | 8,1                        | 20             | 1420                               |
| I42,5-1,00-00  | 1,00              | 216                                 | 0   | 1764  | 215  | 1,1                        | 0              | 2190                               |
| I42,5-1,00-10  | 1,00              | 278                                 | 180 | 1071  | 275  | 4,2                        | 10             | 1810                               |
| I42,5-0,90-15  | 0,91              | 371                                 | 241 | 670   | 335  | 5,6                        | 15             | 1620                               |
| I42,5-1,00-20  | 1,00              | 367                                 | 280 | 386   | 364  | 5,5                        | 20             | 1400                               |
| I52,5-0,50-00  | 0,50              | 444                                 | 0   | 1547  | 218  | 6,7                        | 0              | 2220                               |
| I52,5-0,50-10  | 0,50              | 693                                 | 175 | 546   | 340  | 10,4                       | 10             | 1760                               |
| I52,5-0,50-15  | 0,50              | 840                                 | 222 | 0     | 412  | 12,6                       | 15             | 1490                               |
| I52,5-0,70-00  | 0,70              | 316                                 | 0   | 1662  | 218  | 4,7                        | 0              | 2200                               |
| I52,5-0,70-10  | 0,67              | 471                                 | 179 | 810   | 310  | 7,1                        | 10             | 1780                               |
| I52,5-0,70-15  | 0,71              | 520                                 | 238 | 470   | 364  | 7,8                        | 15             | 1600                               |
| I52,5-0,70-20  | 0,71              | 580                                 | 273 | 113   | 406  | 8,7                        | 20             | 1380                               |
| I52,5-0,64-20  | 0,64              | 667                                 | 270 | 0     | 419  | 10,0                       | 20             | 1370                               |
| I52,5-1,00-00  | 1,00              | 219                                 | 0   | 1753  | 218  | 1,1                        | 0              | 2190                               |
| I52,5-1,00-10  | 1,00              | 283                                 | 179 | 1054  | 280  | 4,2                        | 10             | 1800                               |
| I52,5-0,90-15  | 0,91              | 392                                 | 238 | 611   | 353  | 5,9                        | 15             | 1600                               |
| I52,5-1,00-20  | 1,00              | 400                                 | 280 | 326   | 396  | 6,0                        | 20             | 1410                               |

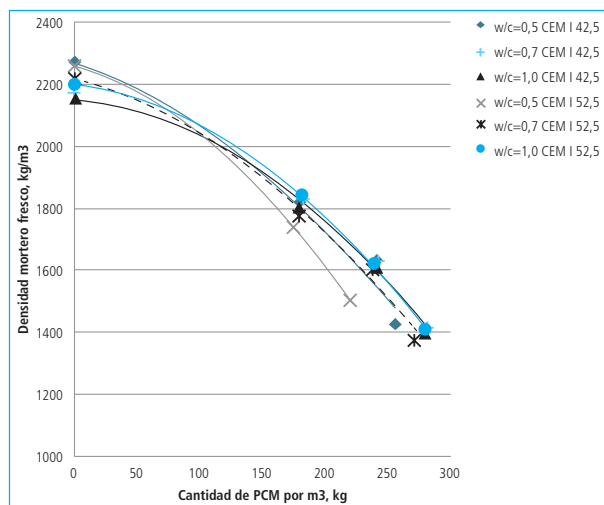
Para verificar el comportamiento de las mezclas al agregar fibras, se realizaron pruebas con las mezclas I42,5-0,70-10 y I42,5-0,70-20, agregando cantidades de fibras a la mezcla de 0,6 kg/m<sup>3</sup> (0,6F) y 1,8 kg/m<sup>3</sup> (1,8F). Las dosificaciones utilizadas se muestran en la Tabla 2.

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos de densidad de mortero fresco, consistencia en mesa de sacudida, resistencia a flexotracción y resistencia a compresión se muestran en Tabla 3.

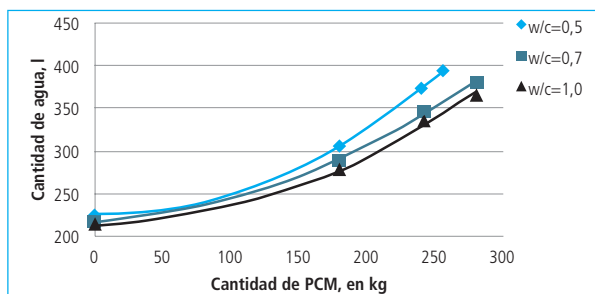
En la Figura 3, se grafican las densidades obtenidas de diferentes mezclas dependiendo de la cantidad de microcápsulas con PCM.

**Figura 3.** Densidad del mortero fresco según la cantidad de PCM incorporada en la mezcla

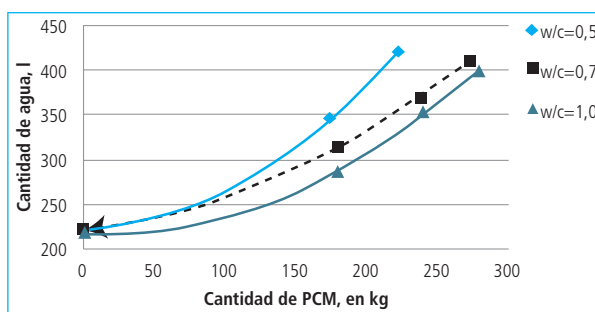


En la Figura 4, se muestra la cantidad de agua necesaria para obtener una consistencia cercana a 180 mm, dependiendo de la cantidad de PCM que contenga la mezcla, para cemento CEM I 42,5. En la Figura 5 se muestra la misma información para CEM I 52,5.

**Figura 4.** Cantidad de agua por m<sup>3</sup> de mortero, según cantidad de PCM, para cemento CEM I 42,5 y varias relaciones agua/cemento



**Figura 5.** Cantidad de agua por m<sup>3</sup> de mortero, según cantidad de PCM, para cemento CEM I 52,5 y varias relaciones agua/cemento



**Tabla 2.** Dosificación de morteros con PCM y fibras de polipropileno

| Identificación     | Cantidades en kg por m <sup>3</sup> |     |       |      |                            |                     | Densidad teórica, kg/m <sup>3</sup> |
|--------------------|-------------------------------------|-----|-------|------|----------------------------|---------------------|-------------------------------------|
|                    | Cemento                             | PCM | Arena | Agua | Aditivo superplastificante | Fibra polipropileno |                                     |
| I42,5-0,70-10-0,6F | 420                                 | 180 | 905   | 290  | 6,3                        | 0,6                 | 1800                                |
| I42,5-0,70-10-1,8F | 421                                 | 180 | 901   | 291  | 6,3                        | 1,8                 | 1790                                |
| I42,5-0,70-20-0,6F | 519                                 | 264 | 183   | 358  | 7,8                        | 0,6                 | 1330                                |
| I42,5-0,70-20-1,8F | 532                                 | 267 | 168   | 367  | 8,0                        | 1,8                 | 1340                                |

**Tabla 3. Resultados de ensayos**

| Identificación del mortero | Aire atrapado estimado, % | Densidad mortero fresco, kg/m <sup>3</sup> | Consistencia, mm | Resistencia flexotracción, MPa | Resistencia compresión, MPa |
|----------------------------|---------------------------|--|------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| I42,5-0,50-00              | 1,4                       | 2270                                       | 211              | 7,7                            | 45,8                        |
| I42,5-0,50-10              | 4,6                       | 1790                                       | 186              | 4,1                            | 20,7                        |
| I42,5-0,50-15              | 4,1                       | 1610                                       | 173              | 4,0                            | 19,1                        |
| I42,5-0,50-18              | 8,8                       | 1430                                       | 173              | -                              | 18,9                        |
| I42,5-0,58-20              | 8,9                       | 1370                                       | 170              | 2,5                            | 14,1                        |
| I42,5-0,70-00              | 5,1                       | 2170                                       | 140              | -                              | 25,2                        |
| I42,5-0,70-10              | 2,8                       | 1820                                       | 196              | -                              | 13,8                        |
| I42,5-0,70-15              | 2,8                       | 1640                                       | 178              | 3,0                            | 13,1                        |
| I42,5-0,70-20              | 7,3                       | 1420                                       | 170              | -                              | 12,3                        |
| I42,5-1,00-00              | 5,3                       | 2150                                       | 141              | 2,7                            | 11,3                        |
| I42,5-1,00-10              | 3,2                       | 1810                                       | 194              | 2,4                            | 8,9                         |
| I42,5-0,90-15              | 2,5                       | 1640                                       | 184              | 2,6                            | 9,1                         |
| I42,5-1,00-20              | 7,6                       | 1400                                       | 175              | 2,2                            | 7,6                         |
| I52,5-0,50-00              | 1,8                       | 2260                                       | 178              | 7,1                            | 50,0                        |
| I52,5-0,50-10              | 4,7                       | 1740                                       | 196              | 3,4                            | 27,7                        |
| I52,5-0,50-15              | 7,4                       | 1490                                       | 179              | 2,5                            | 27,7                        |
| I52,5-0,70-00              | 2,8                       | 2220                                       | 160              | -                              | 35,2                        |
| I52,5-0,70-10              | 3,4                       | 1780                                       | 196              | -                              | 18,9                        |
| I52,5-0,70-15              | 2,6                       | 1610                                       | 178              | 2,2                            | 15,7                        |
| I52,5-0,70-20              | 7,4                       | 1380                                       | 171              | -                              | 14,6                        |
| I52,5-0,64-20              | 7,8                       | 1370                                       | 172              | 2,2                            | 16,8                        |
| I52,5-1,00-00              | 3,0                       | 2200                                       | 153              | 3,5                            | 15,9                        |
| I52,5-1,00-10              | 1,6                       | 1840                                       | 188              | 2,7                            | 11,6                        |
| I52,5-0,90-15              | 2,3                       | 1620                                       | 178              | 2,5                            | 11,7                        |
| I52,5-1,00-20              | 5,7                       | 1410                                       | 186              | 1,5                            | 9,5                         |

En la Tabla 4, se muestran los contenidos de PCM, para los diferentes % de parafina microencapsulada agregada a la mezcla.

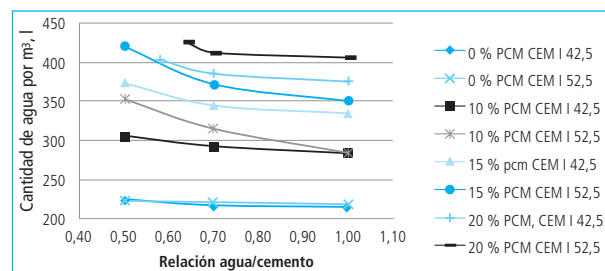
**Tabla 4.** Contenido de PCM en la mezcla, para diferentes % de PCM, tipos de cemento y relaciones agua/cemento

| % de PCM, en peso | Contenido de PCM, kg por m <sup>3</sup> |     |     |                       |     |     |
|-------------------|---|-----|-----|-----------------------|-----|-----|
|                   | Cemento CEM I 42,5                      |     |     | Cemento CEM I 52,5    |     |     |
|                   | Relación agua/cemento                   |     |     | Relación agua/cemento |     |     |
|                   | 0,5                                     | 0,7 | 1,0 | 0,5                   | 0,7 | 1,0 |
| 10                | 179                                     | 181 | 180 | 179                   | 179 | 175 |
| 15                | 241                                     | 242 | 241 | 222                   | 238 | 238 |
| 20                |   | 281 | 280 |                       | 273 | 280 |

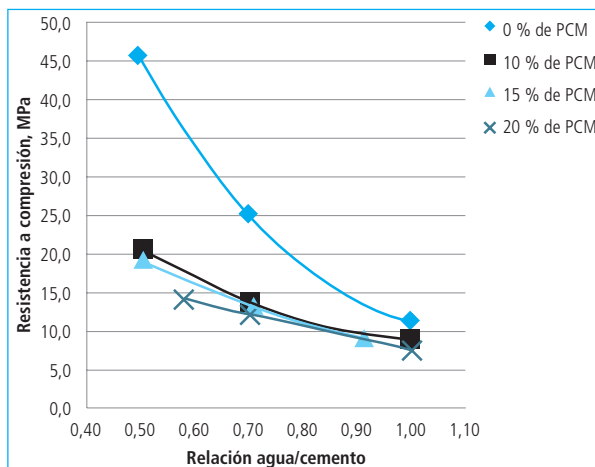
Con la Figura 4 y 5, y la Tabla 4, se pudo confeccionar la Figura 6, que entrega las diferentes cantidades de agua, según la relación agua/cemento y los % de PCM incorporado en la mezcla.

La Figura 7 entrega las curvas de relación agua/cemento según la resistencia a compresión, para varios % de PCM y para cemento CEM I 42,5. La Figura 8 entrega la misma información para CEM I 52,5.

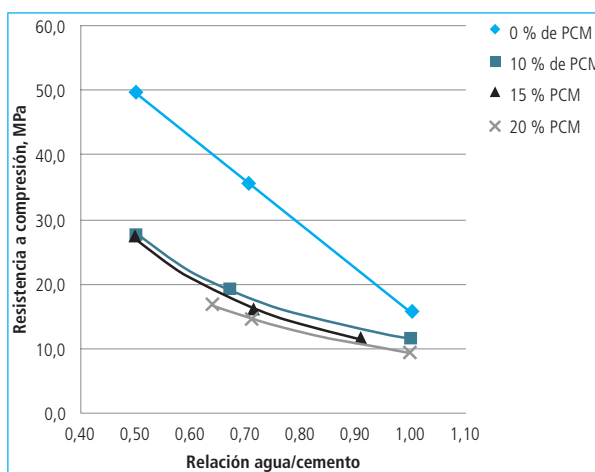
**Figura 6.** Cantidad de agua según relación agua/cemento para varios tipos de cemento y cantidades de PCM DS 5001 X



**Figura 7.** Resistencia a compresión según la relación agua/cemento para cemento CEM I 42,5 y varios % de PCM



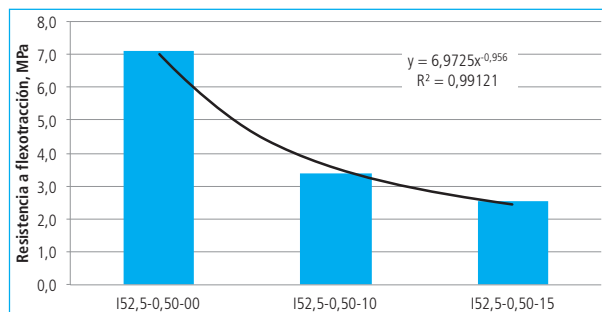
**Figura 8.** Resistencia a compresión según la relación agua/cemento para cemento CEM I 52,5 y varios % de PCM



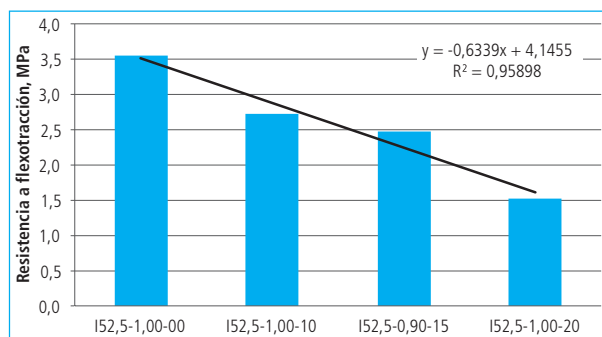
En la Figura 9 y 10 se muestran resultados a flexotración para morteros con cemento CEM I 52,5, con relaciones agua/cemento cercanas a 0,5 y 1,0, respectivamente.



**Figura 9.** Resistencia a flexotracción para mezclas con CEM I 52,5 y relación w/c =0,5



**Figura 10.** Resistencia a flexotracción para mezclas con CEM I 52,5 y relación w/c =1,0



La Tabla 5 muestra resultados de resistencia de mezclas con y sin parafinas microencapsuladas a 7, 28 y 90 días.

**Tabla 5.** Resistencia de morteros a 7, 28 y 90 días

| Edad, días | 142,5-0,50-00                    |                               | 142,5-0,50-10                    |                               |
|------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
|            | Resistencia a flexotracción, MPa | Resistencia a compresión, MPa | Resistencia a flexotracción, MPa | Resistencia a compresión, MPa |
| 7          | 6,4                              | 44,0                          | 3,2                              | 16,8                          |
| 28         | 7,4                              | 48,4                          | 4,0                              | 21,0                          |
| 90         | 10,5                             | 57,6                          | 6,2                              | 27,2                          |

En la Tabla 6, se entregan resultados obtenidos en ensayos realizados a mezclas de mortero con parafina microencapsulada, con fibras de polipropileno.

## 4. Discusión de resultados

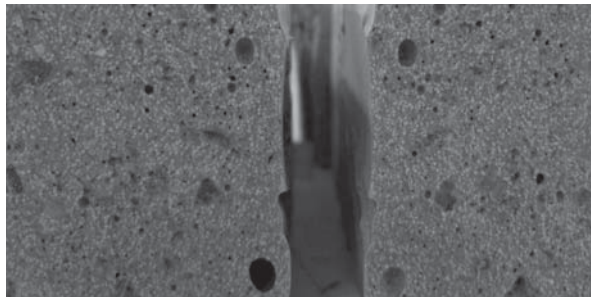
### 4.1. Contenido de aire atrapado

El contenido de aire atrapado es mayor al aumentar el contenido de PCM en la mezcla y disminuir la relación agua/cemento. Mezclas con contenidos de PCM de 20 % y la mezcla con 15 % de PCM y relación agua/cemento 0,50 presentan en promedio de 7,6 % de aire atrapado. El resto de las mezclas con menor contenido de PCM y mayor relación agua/cemento presentan un promedio de aire atrapado de 3,2 %. Las mezclas con altos contenido de PCM, presentan en su estructura partículas, que aun aglomeran un conjunto de microcápsulas individuales, esto podría contribuir a aumentar la cantidad de aire. La Figura 11 muestra una sección de un mortero con 20 % de PCM.

**Tabla 6.** Resultados obtenidos en ensayos de morteros con PCM y fibras de polipropileno

| Identificación     | Aire atrapado % | Densidad mortero fresco, kg/m <sup>3</sup> | Consistencia, mm | Resistencia flexotracción, MPa | Resistencia compresión, MPa |
|--------------------|-----------------|--|------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 142,5-0,70-10-0,6F | 3,4             | 1800                                       | 178              | 3,4                            | 15,6                        |
| 142,5-0,70-10-1,8F | 4,1             | 1790                                       | 171              | 2,8                            | 15,5                        |
| 142,5-0,70-20-0,6F | 12,4            | 1330                                       | 181              | 1,9                            | 9,6                         |
| 142,5-0,70-20-1,8F | 11,4            | 1340                                       | 179              | 2,0                            | 10,4                        |

**Figura 11.** Sección de mortero con 20 % de PCM



#### 4.2. Densidad de las mezclas

La densidad del mortero fresco disminuye al aumentar la cantidad de microcápsulas que se incorporan en la mezcla. Las mezclas con cemento CEM I 52,5 con relaciones agua/cemento 0,70 y 0,50, presentan menores densidades a igual cantidad de PCM. Esto se debe a las mayores cantidades de agua que requieren las mezclas con este tipo de cemento. La densidad con un 20% de PCM es de alrededor de  $1400 \text{ kg/m}^3$ , aunque podrían ser algo menores cuando el aire atrapado aumenta en la mezcla.

#### 4.3. Cantidad de agua en la mezcla

Las cantidades de agua son mayores al aumentar el contenido de PCM en la mezcla. Para una misma cantidad de PCM, las cantidades de agua que se requieren son mayores cuando aumentan las relaciones agua/cemento, debido al mayor contenido de cemento de la mezcla. Al comparar ambos cementos, a iguales relaciones agua/cemento, requiere mayores cantidades de agua el cemento CEM I 52,5, que el cemento CEM I 42,5, esto puede deberse a la mayor finura del cemento CEM I 52,5. Las altas cantidades de agua requeridas justifican el uso de superfluidificantes.

#### 4.4. Resistencia a compresión

La resistencia disminuye fuertemente al incorporar PCM en la mezcla. Esta diferencia de resistencias se hace menor a medida que se aumenta la relación agua/cemento. Esto podría producirse por la disminución de la cantidad de cemento que se incorpora en la mezcla, porque aumenta la cantidad de arena de las mezclas y porque los morteros sin PCM presentan problemas de trabajabilidad por la falta de finos. Con el cemento CEM I 42,5, se puede llegar a resistencia cercanas a 20 MPa, con cantidades de hasta 15 % de PCM, con 20 % de PCM se puede llegar a resistencias cercanas a 15 MPa. Con el cemento CEM I 52,5, se puede llegar

a resistencia cercanas a 28 MPa, con cantidades de hasta 15 % de PCM, con 20 % de PCM se puede llegar a resistencias cercanas a 18 MPa. A igual relación agua/cemento se obtienen resistencias mayores con el cemento CEM I 52,5.

#### 4.5. Resistencia a flexotracción

La resistencia disminuye fuertemente al incorporar PCM, en la mezcla. Esta diferencia, se hace menor a medida que se aumenta la relación agua/cemento. En los morteros con PCM, las resistencias son mayores cuando las relaciones agua/cemento son menores, aunque esta tendencia disminuye al aumentar los contenidos de PCM.

#### 4.6. Curva de endurecimiento

Al comparar mezclas I42,5-0,50-10 y I42,5-0,50-00, con y sin parafina microencapsulada, se observa que las resistencias a compresión caen en un 62 %, 57 % y 53 % a los 7, 28 y 90 días, respectivamente. Respecto a la resistencia a 28 días, el mortero con PCM tiene un mayor crecimiento que el mortero sin PCM. El crecimiento de resistencia es más lento a los 7 días en el mortero con PCM, pero aumenta a los 90 días. Lo mismo ocurre con la resistencia a flexotracción.

#### 4.7. Incorporación de fibras en los morteros

La incorporación de fibras produce algunos cambios en las mezclas. En las mezclas con 10 % de PCM, se registra una disminución en la trabajabilidad, por lo que se debe aumentar la cantidad de agua entre 5 a 10 l, además se registra un aumento de la resistencia a compresión respecto a los morteros sin fibra. Para las mezclas con 20 % de PCM, se produjo un aumento de la cantidad de aire atrapado, disminuyendo la densidad y la resistencia a compresión de los morteros.

#### 4.8. Diseño de mezclas de mortero con parafinas microencapsuladas

Cuando se busca en este tipo de mortero, altas resistencias a compresión y la incorporación de altas cantidades de parafinas microencapsuladas, se obtendrán mezclas con altas cantidades de agua y cemento, y bajas o nulas cantidades de arena. Todas estas condiciones generan mezclas con altas cantidades de finos y agua, lo que podría aumentar la contracción de las mezclas. Mientras mayor sea la cantidad de PCM incorporada en la mezcla, mayor será la acumulación de calor latente. Cantidades más altas de PCM en la mezcla, es posible obtenerlas con relaciones agua/cemento, resistencias y cantidades de agua menores y

con cemento más resistentes, pero que no demanden mayores cantidades de agua.

## 5. Conclusiones

De los resultados obtenidos se pueden obtener las siguientes conclusiones de la investigación:

La incorporación de microcápsulas en los morteros de cemento Portland: Disminuyen las resistencias a compresión y flexotracción, esta diferencia es mayor en morteros con menor relación agua/cemento; al aumentar su contenido en el mortero aumenta la cantidad de agua y cemento, baja la cantidad de arena,

baja la densidad de la mezcla y aumenta el contenido de aire atrapado. Todas estas características deben ser tomadas en cuenta en el diseño de la mezcla.

Es posible la incorporación en morteros de cemento Portland cantidades de 20 % en peso, de parafina microencapsulada, con limitaciones en la resistencia a obtener.

El cemento CEM I 52,5, aunque tiene mayor resistencia, no necesariamente resulta siempre el más conveniente, sobre todo cuando requiere de mayores dosis de agua en mezclas específicas. Sería preferible usar un cemento CEM I 52,5 que requiera dosis menores o iguales de agua que un cemento CEM I 42,5.

## Referencias

BASF. (2008). *Micronal® PCM intelligent temperature management for buildings*. Retrieved 12/26, 2012, from [http://www.micronal.de/portal/load/fid443847/BASF\\_Micronal\\_PCM\\_Brochure%202009\\_English.pdf](http://www.micronal.de/portal/load/fid443847/BASF_Micronal_PCM_Brochure%202009_English.pdf)

Bentz, D. P., Peltz, M. A., Durán Herrera, A., Valdez, P., & Juárez, C. A. (2011). Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. *Journal of Building Physics*, 34(3), 263-275.

Bentz, D., & Turpin, R. (2007). Potential applications of phase change materials in concrete technology. *Cement Concrete Composites*, 29(7), 527-532.

Cabeza, L. F., Medrano Martorell, M., Castellón, C., Castell Casol, A., Solé, C., Roca Enrich, J., et al. (2007). *Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes* Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències i Tecnologia.

Castell, A., Martorell, I., Medrano, M., Pérez, G., & Cabeza, L. F. (2010). Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*, 42(4), 534-540.

Farid, M., Khudhair, A., Razack, S., & Al Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9-10), 1597-1615.

Felix, M., & Aguiar, J. (2009). *Study of a cement mortar with incorporation of PCM microcapsules*. SHANGHAI: TONGJI UNIV PRESS.

Hunger, M., Entrop, A. G., Mandilaras, I., & Founti, M. (2009). The behavior of self-compacting concrete

containing micro-encapsulated phase change materials. *Cement Concrete Composites*, 31(10), 731-743.

Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 379-391.

Lee, T., Hawes, D., Banu, D., & Feldman, D. (2000). Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 62(3), 217-237.

Meshgin, P. (2012). Effect of phase-change materials on properties of concrete. *ACI Materials Journal*, 109(1), 71-80.

Neila, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid: Munilla-Leira.

Oliver Ramírez, A., Garcia Santos, A., & Neila-González, F. J. (2011). Physical and mechanical characterization of gypsum boards containing phase change materials for latent heat storage. *Materiales de Construcción*, 61(303), 465-484.

Oliver, A. (2009). Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibra de polipropileno. Aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios. Universidad Politécnica de Madrid.

Oliver, A., Neila, F. J., & García Santos, A. (2012). PCM choosing and classification according to their characteristics for their application for thermal energy storage systems. *Materiales de Construcción*, 62(305), 131-140.

Oliver, A., Neila, F. J., & García, A. (2011). PCM inclusion in gypsum boards for thermal energy storage through

latent heat: Thermal characterization with DSC. *Informes de la Construcción*, 63(522), 61-70.

Sa, A., Azenha, M., de Sousa, H., & Samagaio, A. (2012). Thermal enhancement of plastering mortars with phase change materials: Experimental and numerical approach. *Energy and Buildings*, 49, 16-27.

Schossig, P., Henning, H., Gschwander, S., & Haussmann, T. (2005). Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(2-3), 297-306.

Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., Tyagi, S. K., & Akiyama, T. (2011). Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1373-1391.

Tyagi, V., & Buddhi, D. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1146-1166.

Xin, W., YinPing, Z., Wei, X., RuoLang, Z., & Qunli, Z. (2009). Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope. *Chinese Science Bulletin*, 54(6), 920-928.

Zhang, D., Zhou, H., Wu, K., & Li, Z. (2005). Granular phase changing composites for thermal energy storage. *Solar Energy*, 78(3), 471-480.

Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., & Di, H. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, 42(6), 2197-2209.