



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
CHETUMAL

**“Estudio de recubrimiento base cemento
para edificaciones con adición de sales
hidratadas como Material de Cambio de
Fase (PCM)”**

Tesis que para obtener el Grado de:

Doctorado en Ciencias Ambientales

Presenta:

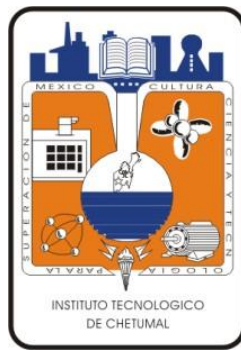
M.C. Elmer Marcial Cervantes Ramírez

Directora:

Dra. Danna Lizeth Trejo Arroyo

Chetumal, Q. Roo, a 07 de agosto de 2026





TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“Estudio de recubrimiento base cemento
para edificaciones con adición de sales
hidratadas como Material de Cambio de
Fase (PCM)”**

M.C. Elmer Marcial Cervantes Ramírez

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS
AMBIENTALES

7 de agosto, 2026



Chetumal, Quintana Roo, a 07/08/2026
Asunto: Aprobación de Tesis

DR. JULIO CÉSAR CRUZ ARGÜELLO
COORDINADOR
DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T E

Por este medio tenemos a bien comunicarle que el trabajo de tesis "Estudio de recubrimiento base cemento para edificaciones con adición de sales hidratadas como Material de Cambio de Fase (PCM)", del "M.C. Elmer Marcial Cervantes Ramírez" (No. control D10390108), ha sido revisado y aprobado por el Comité Tutorial, por lo que puede continuar con los trámites para la obtención del grado de Doctor en Ciencias Ambientales.

Sin otro particular quedamos de Usted.

A T E N T A M E N T E

COMITÉ TUTORIAL


Dra. Danna Lizeth Trejo Arroyo
DIRECTORA DE TESIS


Dr. Gerardo Manuel Rodríguez Torres
ASESOR DE TESIS


Dra. Claudia González Salvatierra
ASESORA DE TESIS


Dr. Julio César Cruz Argüello
ASESOR DE TESIS


Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres
ASESORA DE TESIS


Dra. Ana María Valenzuela Muñiz
ASESORA DE TESIS



2026
año de
Margarita
Maza



SISTEMA DE GESTIÓN
ISO 9001:2015
ISO 14001:2015
ISO 45001:2018
BICERT S.C.





DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y AUTENTICIDAD

Por medio de la presente, M.C. Elmer Marcial Cervantes Ramírez declaro que el trabajo de investigación titulado Estudio de recubrimiento base cemento para edificaciones con adición de sales hidratadas como Material de Cambio de Fase (PCM) y dirigido por Dra. Danna Lizeth Trejo Arroyo como tema de tesis para la obtención del Título de DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES, es original. El presente trabajo de investigación es el resultado de mi trabajo personal, el cual no ha sido copiado de investigaciones previas publicadas en medios digitales y/o impresos. Las ideas, definiciones y/o ilustraciones tomadas de trabajos previos han sido citadas de la manera correcta para dar crédito a los autores originales. Declaro que el presente trabajo de investigación no ha sido presentado anteriormente para obtener algún grado académico o título, y tampoco ha sido publicado en sitio alguno. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y cometer plagio es objeto de sanciones legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el presente documento, así como de los derechos sobre la obra presentada. Asimismo, me hago responsable ante el Instituto Tecnológico de Chetumal o terceros de cualquier irregularidad o daño que pudiera ocasionar por el incumplimiento de lo declarado. De identificarse falsificación, plagio, fraude, o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, responsabilizándome por todas las cargas pecuniarias o legales que se deriven de ello y sometiéndome a las normas vigentes del Instituto Tecnológico de Chetumal y del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología.

ATENTAMENTE

M.C. Elmer Marcial Cervantes Ramírez

Chetumal, Quintana Roo, a 07 de agosto de 2026.



2026
año de
**Margarita
Maza**



SISTEMA DE GESTIÓN
ISO 9001:2015
ISO 14001:2015
ISO 45001:2018
BICERT, S.C.





DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en este documento titulado "Estudio de recubrimiento base cemento para edificaciones con adición de sales hidratadas como Material de Cambio de Fase (PCM)" proviene de las actividades de investigación durante el periodo que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis dentro del programa de DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES en el Instituto Tecnológico de Chetumal del Tecnológico Nacional de México y que dicha información le pertenece en términos de la Ley de Propiedad Industrial, por lo que no me reservo ningún derecho sobre ello.

ATENTAMENTE

M.C. Elmer Marcial Cervantes Ramírez

Chetumal, Quintana Roo, a 07 de agosto de 2026.



2026
año de
**Margarita
Maza**



SISTEMA DE GESTIÓN
ISO 9001:2015
ISO 14001:2015
ISO 45001:2018
BICERT, S.C.



DEDICATORIA

Como todo contrato o proyecto que llega a su fin, esta etapa de poco más de cuatro años de estudios de doctorado culmina con la entrega de esta tesis, así como diversos productos académicos. Aún recuerdo el primer día donde me notificaron mi aceptación en el programa; fue entonces cuando dio inicio esta nueva etapa que hoy concluye.

Nada de esto habría sido posible sin el apoyo y acompañamiento de las personas que han estado presentes a lo largo de este camino. A mi madre, Minerva Ramírez Ortegón, quien siempre ha confiado en mis capacidades y en mis decisiones. A mis hermanas, Patricia y Natalia, por su constante apoyo y motivación desde mis primeros años de estudio. A mi hermano Gabriel, mi compañero de aventuras, quien, siempre está dispuesto a escucharme. A mi esposa, Andrea Ramírez Guillén, a quien conocí durante esta etapa, gracias por su amor, su apoyo constante y por motivarme a seguir adelante, incluso en los momentos en que el trabajo implicó sacrificios y distancia. A mis amigos Carlos Andrés Ramírez Pinto, Alicia Sarahi González Quiñonez y Javier Rodrigo Nahuat Sansores, por su compañía, sus risas, sus consejos y su motivación a lo largo de estos años. A mi directora de tesis, la Dra. Danna Lizeth Trejo Arroyo, por su disposición, su tiempo y su dedicación, así como por brindarme siempre un espacio por pequeño que fuera y por su valioso apoyo en la mejora de mi redacción y en el desarrollo de esta investigación. Al Dr. Julio Cruz Argüello por sus consejos y cuestionamientos. Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra forma, influyeron en mi vida y en mi desarrollo personal para alcanzar este objetivo, les agradezco de todo corazón.

“Hijo, ¿cómo que seguirás estudiando?, ¿hasta cuándo vas a trabajar?”

Minerva Ramírez Ortegón

Resumen

El crecimiento poblacional genera una mayor demanda de espacios físicos adecuados para las actividades cotidianas. Esta situación, combinada con el aumento de las temperaturas y la prolongación de los periodos de calor, ha intensificado el consumo energético derivado del uso de sistemas de climatización, los cuales guardan una relación directa con el cambio climático. En este contexto, la envolvente o recubrimiento de las edificaciones desempeña un papel crucial: al ser la primera superficie expuesta al entorno regula la transferencia de calor hacia el interior. Por ello, gran parte de las investigaciones se centran en optimizar estos materiales para controlar el flujo térmico en las edificaciones.

En esta investigación se evalúa el efecto de adición de Materiales de Cambio de Fase (PCMs por sus siglas en inglés) en agregados utilizados como medio de soporte poroso en morteros de recubrimiento base cemento en sus propiedades y desempeño térmico. Se evalúan las características físicas de agregado calizo y basáltico como medio de soporte antes y después de impregnar con PCMs en base a las normas ASTM y, propiedades físico-químicas, por medio de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), Difracción de Rayos X (XRD) y microscopia óptica (MO); igualmente, se evalúan las propiedades térmicas como conductividad, calor específico, capacidad calorífica volumétrica y difusividad mediante el uso del equipo TEMPOS (Thermal Properties Analyzer) basado en la norma ASTM D 5334. Finalmente se determina el desempeño térmico de diferentes tipos de recubrimiento modificados con PCMs mediante el uso de una Caja Térmica. Los resultados encontrados indican una reducción en la conductividad, difusividad, capacidad calorífica volumétrica y calor específico en recubrimientos con ambos tipos de agregado, generando una mejoría en el desempeño térmico realizado en los morteros.

Abstract

Population growth drives a higher demand for suitable physical spaces for daily activities. This situation, combined with rising temperatures and prolonged heat waves, has intensified energy consumption from the use of climate control systems, which are directly linked to climate change. In this context, the building envelope plays a crucial role: as the primary surface exposed to the environment, it regulates heat transfer to the interior. Consequently, much of current research focuses on optimizing these materials to control thermal flux in buildings.

In this research, the effect of adding Phase Change Materials (PCMs) to aggregates used as a porous support medium in cement-based coating mortars is evaluated in terms of their properties and thermal performance. The physical and physicochemical characteristics of limestone and basaltic aggregates as support media are evaluated before and after impregnation with PCMs through Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffraction (XRD), and Optical Microscopy (OM). Similarly, thermal properties such as conductivity, specific heat, volumetric heat capacity, and diffusivity are evaluated using the TEMPOS (Thermal Properties Analyzer) equipment based on the ASTM D 5334 standard. Finally, the thermal performance of different types of PCM-modified coatings is determined using a Thermal Box. The results indicate a reduction in conductivity, diffusivity, volumetric heat capacity, and specific heat in coatings with both types of aggregates, leading to an improvement in the thermal performance tests conducted on the mortars.



Índice

Resumen.....	5
Abstract	6
Índice	7
Lista de figuras	9
Lista de tablas.....	10
Introducción	11
CAPÍTULO 1	13
1.1. Marco teórico.....	13
<i>Sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES)</i>	13
<i>Métodos de encapsulación Core-shell</i>	20
1.2. Antecedentes	21
1.3. Planteamiento del problema	24
1.4. Justificación	25
1.5. Objetivos	26
1.5.1 Objetivo General.....	26
1.5.2 Objetivos Específicos.....	26
1.6. Hipótesis.....	26
CAPÍTULO 2	27
2.1 Diagrama experimental.....	27
2.2 Materiales y métodos	28
2.3 Diseño experimental	28
2.4 Caracterización de agregados	30
<i>Granulometría y módulo de finura</i>	30
<i>Densidad y absorción</i>	31
<i>Microscopía Óptica (MO)</i>	33
<i>Difracción de Rayos X (DRX)</i>	33
2.5 Parámetros de impregnación de PCM en agregado calizo y basáltico.	33
<i>Tipo y tiempo de filtración, tiempo dentro de cámara de vacío y tamaño de agregado.</i>	35
2.6 Proceso de Encapsulación	37
<i>Resina de poliéster (RP)</i>	38
2.7 Diseño de mezclas de morteros por fluidez.....	40
2.8 Caracterización térmica de morteros.....	40



Elaboración de muestras.....	40
2.9 Propiedades térmicas.....	41
<i>Desempeño térmico</i>	44
2.10 Caracterización mecánica de morteros.....	45
<i>Elaboración de muestras</i>	45
CAPÍTULO 3	46
3.1 Resultados y discusión	46
<i>Caracterización del agregado fino</i>	46
<i>Densidad relativa y absorción de agregados</i>	47
<i>Microscopia óptica</i>	48
<i>Microscopía Electrónica de Barrido-EDS</i>	51
<i>Difracción de Rayos X (DRX)</i>	52
<i>Parámetros de impregnación CC</i>	54
<i>Parámetros de impregnación SS</i>	55
<i>Encapsulación con resina de poliéster (RP)</i>	57
<i>Parámetros de encapsulación</i>	58
<i>Densidad de morteros modificados</i>	62
<i>Conductividad térmica de morteros modificados</i>	63
<i>Difusividad</i>	68
<i>Capacidad calorífica volumétrica</i>	70
<i>Calor específico</i>	73
<i>Desempeño térmico mediante el método de caja caliente</i>	75
<i>Propiedades mecánicas</i>	81
Resistencia a la compresión mortero de agregado calizo con y sin PCMs	81
Resistencia a la compresión del mortero con agregado basáltico con y sin PCMs.....	83
<i>Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS)</i>	85
Conclusiones	87
Trabajos a futuro	89
Referencias bibliográficas:	89

Lista de figuras

Figura 1. Proceso de cambio de fase sólido - líquido en PCMs.	15
Figura 2. Diagrama de PCMs (sólido ↔ líquido).	15
Figura 3. Mecanismos de transferencia de calor en muro de edificación.	17
Figura 4. Desempeño térmico con y sin PCM en edificaciones.	18
Figura 5. Diagrama experimental general de etapas de investigación.	27
Figura 6. Experimento factorial de tres factores que incluye el tiempo de impregnación, el tipo de arena y el tipo de sal hidratada.	29
Figura 7. Proceso de granulometría de agregados.	31
Figura 8. Prueba de densidad y absorción.	33
Figura 9. Proceso de determinación de variables.	34
Figura 10. Determinación de parámetros de calentamiento de Cloruro de Calcio Hexahidratado.	35
Figura 11. Determinación de parámetros de calentamiento de Sulfato de Sodio Decahidratado.	35
Figura 12. Proceso de impregnación al vacío.	37
Figura 13. Proceso de encapsulación con PMMA.	38
Figura 14. Proceso de encapsulación con RP.	39
Figura 15. Prueba de fluidez en morteros.	40
Figura 16. Elaboración de muestras cúbicas de morteros con adición de PCMs.	41
Figura 17. Sensor SH-3.	43
Figura 18. Captura de conductividad, difusividad y capacidad calorífica volumétrica.	43
Figura 19. Caja térmica para determinación de desempeño térmico.	44
Figura 20. Elaboración de probetas.	45
Figura 21. Granulometría de agregado calizo y basáltico.	46
Figura 22. Granulometría ajustada de agregado calizo y basáltico.	47
Figura 23. Muestras de ambos tipos de agregado con y sin cloruro de calcio Hexahidratado.	49
Figura 24. Fotografías en el microscopio óptico a 4X: a) AC-1.18-0.075, b) AC-1.18-0.6, c) T1CCAC, d) T1CCAC-#30, e) AB-1.18-0.075, f) AB-1.18-0.6, g) T1CCAB y h) T1CCAB-#30.	50
Figura 25. MEB-EDS de los agregados. a) agregado calizo, b) agregado basáltico.	52
Figura 26. Patrón de Difracción de Rayos X (DRX) de polvo calizo.	53
Figura 27. Patrón de difracción de rayos X de polvo basáltico.	54
Figura 28. Proceso de encapsulación con RP de AC y AB impregnado con sales.	58
Figura 29. Encapsulación de Agregado calizo. a) natural (AC), b) recubierto con resina (AC + PMMA) y c) recubierto con resina (AC + RP)	60
Figura 30. Cambios en la superficie del agregado impregnado con las diferentes sales.	60
Figura 31. RP sobre AC y AB con SS.	61
Figura 32. RP sobre AC y AB con CC.	61
Figura 33. Densidad de morteros.	62
Figura 34. Conductividad en morteros de agregado calizo con y sin PCMs a diferente temperatura.	64
Figura 35. Conductividad en agregado calizo a diferente temperatura.	65

Figura 36. Comparativa de conductividad de mortero de agregado basáltico con y sin PCMs a diferente temperatura.	66
Figura 37. Conductividad térmica en agregado basáltico a diferente temperatura.	67
Figura 38. Difusividad en morteros a diferente temperatura.	69
Figura 39. Difusividad de morteros a diferente temperatura.	70
Figura 40. Capacidad calorífica volumétrica a diferente temperatura.	72
Figura 41. Capacidad calorífica volumétrica a diferente temperatura.	73
Figura 42. Calor específico de MAC a diferente temperatura.	74
Figura 43. Calor específico de morteros a diferente temperatura.	75
Figura 44. Desempeño térmico de temperatura exterior en zona de calentamiento de MAB.	76
Figura 45. Desempeño térmico de AC vs CCAC en caja térmica.	77
Figura 46. Desempeño térmico de MAC vs MSSACRP en caja térmica.	79
Figura 47. Desempeño térmico de MAB vs MCCABRP en caja térmica.	80
Figura 48. Desempeño térmico de MAB vs MSSABRP en caja térmica.	81
Figura 49. Resistencia a la compresión de mortero de referencia y morteros con AC modificado.	82
Figura 50. Resistencia a la compresión de mortero de referencia y morteros con AB modificado.	84
Figura 51. Imágenes SEM de especímenes a) mortero AB (x300) b) mortero CCAB (x2300) c) mortero SSAB (x150).....	86
Figura 52. Imagen SEM-EDS de especímenes mortero a) CCAB (x1000) b) SSAB (x1000)	87

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades térmicas de sales hidratadas.	16
Tabla 2. Nomenclatura.	28
Tabla 3. Diseño experimental 1: Variables de entrada y salida.	29
Tabla 4. Diseño de muestra de 50g de agregado.	34
Tabla 5. Ensayos preliminares para encapsulación por PMMA.	38
Tabla 6. Ensayos preliminares para encapsulación por RP.	39
Tabla 7. Dosificación por fluidez	42
Tabla 8. Valores de Densidad y absorción.....	48
Tabla 9. Nomenclatura de muestras.	48
Tabla 10. Parámetros de impregnación.....	55
Tabla 11. Parámetros de impregnación.....	56
Tabla 12. Resistencia a la compresión de morteros/concretos con adición de PCM.....	85

Introducción

Existe un incremento en la demanda de espacios climatizados para el desarrollo de las actividades diarias del ser humano, lo que genera un mayor consumo energético y emisión de gases de efecto invernadero derivado de su producción [1]–[3] ; Por otro lado, los recubrimientos base cemento son los materiales más empleados para el acabado final en las edificaciones y embellecer muros y plafones. Estos recubrimientos están compuestos principalmente de cemento, agregado fino y agua, además forman el primer escudo de defensa ante las condiciones exteriores del clima. Algunos investigadores se han enfocado en modificar los recubrimientos base cemento, adicionando nuevos materiales o materiales inteligentes, materiales alternativos o sustituyendo algún elemento por materiales de desecho de diferentes industrias [4], [5], como triturados de poliestireno o poliuretano, desperdicios de plástico, por nombrar algunos, con el objetivo de mejorar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas del recubrimiento [6].

En ese sentido, la implementación de nuevos materiales inteligentes, muchos de ellos considerados así, debido a que no requieren energía de la red eléctrica para poder funcionar, están basados en mejorar la envolvente de las edificaciones proporcionando mejores propiedades térmicas, permitiendo un ahorro considerable de energía y funcionando como sistemas pasivos [7]–[9]. Entre los materiales inteligentes mencionados con anterioridad, se tienen los materiales de cambio de fase (PCMs), que pueden funcionar como un regulador térmico ya que pueden almacenar la energía al llegar a su temperatura de calor latente de fusión y liberarla posteriormente durante su proceso enfriamiento, a diferencia de las reacciones termoquímicas, posee las ventajas de mayor densidad de almacenamiento y reducción de pérdidas energéticas que derivan en la variación de temperatura [9], [10].

Debido a la gran disponibilidad de materiales de cambio de fase, se han evaluado sus propiedades físicas, cinéticas, químicas y térmicas para poder ser aplicados en diferentes sectores y en cuanto a los resultados en su comportamiento térmico, tales como su baja conductividad térmica, alta capacidad calorífica volumétrica y calor específico, estos materiales son prometedores al ser empleados como parte de los recubrimientos [7], [11], [12]. Algunas de las limitantes encontradas para el uso y aplicación de los PCMs en

recubrimientos base cemento, son la adherencia y la fuga de material, por lo que se plantea el uso de agregados porosos como material de soporte [13], [14]. Los materiales porosos son un portador ideal para la encapsulación de PCM de sal hidratada, pueden retener una gran cantidad de PCM debido principalmente a la fuerza capilar y la tensión superficial proporcionada por la estructura de sus poros [15]–[18]. Se ha reportado que, empleando este tipo de agregado poroso, se puede incrementar la cantidad de PCM retenida en el material de soporte hasta un 8% por peso del concreto, sin comprometer su resistencia a la compresión. En su caso, el agregado calizo, considerado un agregado poroso se obtiene de la trituración de piedra caliza formada de sedimentos calcáreos marinos y está compuesto principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3) y cantidades considerables de óxido de magnesio (MgO), estos agregados suelen tener alta absorción y gran cantidad de poros [19], otro sustrato poroso de alta absorción es el agregado basáltico, por su parte, es una roca ígnea volcánica abundante sobre la corteza terrestre; es resultado de enfriamiento rápido del magma, es de color oscuro y tiene altos contenidos de óxido de silicio (SiO_2), óxido de hierro (Fe_2O_3) y silicatos de magnesio (MgSiO_3), es de textura porfídica con fenocristales, su gravedad específica de 2.99 es similar a la del agregado calizo de 2.71 [20], [21].

Por otra parte, algunos autores [22], [23] sugieren que, tras el proceso de impregnación de los PCMs en una matriz, se implemente una etapa de encapsulación. Esta estrategia minimiza la interacción de los PCM con la matriz durante el proceso de hidratación, favorece una mayor retención del material de cambio de fase, incrementa su estabilidad y contribuye al control de las variaciones volumétricas y de la expansión.

Por lo que en este trabajo de investigación se plantea el uso de agregado calizo y agregado basáltico como material de soporte para los PCMs, seguido de un proceso de encapsulación al vacío para posteriormente ser introducidos como parte de un compósito cementante y evaluar su comportamiento físico, térmico, fisicoquímico, mecánico, así como su desempeño térmico.

CAPÍTULO 1

1.1. Marco teórico

Mortero de recubrimiento

El mortero es un material composito cementante que es empleado como pegamento y con fines de recubrimiento o envolvente de las edificaciones en la industria de la construcción. Se clasifica en dos grupos principalmente: morteros estructurales y morteros de recubrimiento, de acuerdo al uso se realiza su diseño y proporción para determinar sus componentes, en el caso de los morteros de recubrimiento sus componentes son cemento y/o cal, agregados finos y agua [24]. En la elaboración de morteros, la relación cemento/agregado fino, su fabricación y propiedades principales se rigen por las normas de construcción [25] que los clasifica de acuerdo a su uso y a la resistencia a la compresión mínima requerida. En base a las necesidades que se presentan en la industria de la construcción como lo son el tipo de acabado, propiedades térmicas, color, textura y durabilidad, se pueden emplear diferentes tipos de agregado fino; existen una gran variedad de estos y se pueden clasificar de acuerdo con su origen, morfología, textura y propiedades físicas. Por su parte, la selección del agregado en la elaboración de un mortero es de vital importancia, ya que constituye aproximadamente el 75% de la mezcla, disminuye el uso de cemento en la mezcla de mortero, promueve la uniformidad, mejora el acabado y mejora la trabajabilidad [21], [26]. Dentro de los diferentes tipos de agregado, los más comunes son los agregados volcánicos y agregados sedimentarios. De los agregados de origen volcánico, el agregado basáltico es el más utilizado para la elaboración de mezclas cementantes y en cuanto a los agregados sedimentarios, el agregado calizo es el más empleado.

Sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES)

Los sistemas de almacenamiento de energía (TES, por sus siglas en ingles), son diseñados para conservar la energía en las horas pico de producción y su empleo posterior en los periodos de baja producción, han demostrado tener el potencial de cambiar el consumo de energía en horas pico a las horas valle, por lo cual puede convertirse en una herramienta para la gestión de la demanda energética, eficiencia y calidad ambiental [27]. Los sistemas de almacenamiento de energía térmica pueden estar

basados principalmente en tres modos: mediante reacciones termoquímicas, capacidad de calor sensible y capacidad de calor latente de materiales, lo que brinda refrigeración o calefacción [28]. Por su parte, el método de almacenamiento de energía termoquímica se genera mediante reacciones exotérmicas o endotérmicas dentro del sistema, proporciona alta densidad de energía y baja pérdida de calor, sin embargo, tiene un alto costo, propicia la corrosividad, es complejo y puede ser tóxico. En cuanto al método de almacenamiento de calor sensible, este depende del propio material, debido a su capacidad de retención de energía, lo cual representa un inconveniente ya que necesita mayor volumen para obtener una mayor capacidad de almacenamiento debido a la baja densidad de energía, además, este método causa desperdicio de espacio. El método mediante calor latente de materiales, en este caso basado en el uso de PCM, depende del proceso físico de cambio de fase, es simple y además es estable durante el cambio de fase [28].

Materiales de Cambio de Fase (PCMs)

Los PCMs pueden emplearse en las edificaciones como reguladores térmicos del interior debido a su gran capacidad para almacenar energía en forma de calor latente [7], [8], [13]. Los PCMs tiene un rango de temperatura en la cual se genera el fenómeno de cambio de fase [29]. En la imagen de la Figura 1, se representa una gráfica correspondiente al proceso de cambio de fase (sólido $\leftrightarrow$ líquido) donde intervienen dos tipos de calor, el calor sensible y el calor latente. El calor sensible corresponde al incremento de la temperatura del material con respecto de la temperatura exterior, donde la energía que se absorbe es utilizada para incrementar la temperatura en el material antes de alcanzar el punto de fusión, cuando se alcanza esa temperatura de fusión, toda la energía que se absorbe es utilizada por el sistema para el cambio de fase del material sin incrementar la temperatura, correspondiendo al calor latente de fusión. Cuando el suministro de energía se detiene, la temperatura en el sistema comienza a disminuir y comienza la solidificación, (el cambio de fase del material del estado líquido al sólido) liberando la energía gradualmente, lo que corresponde al calor latente de solidificación. Cuando el material absorbe y libera esa energía puede ser aprovechado, ya que puede funcionar como un regulador térmico de la temperatura interior en una edificación [17].

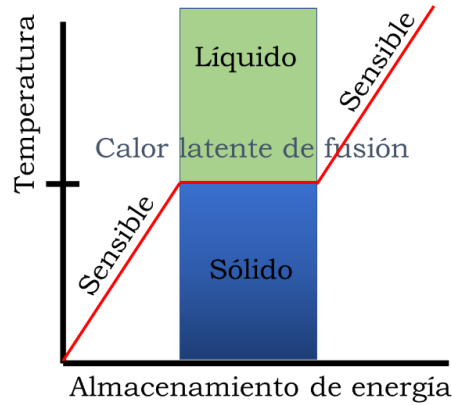


Figura 1. Proceso de cambio de fase sólido - líquido en PCMs.

Para materiales de cambio de fase en el sistema (sólido ↔ líquido), estos se clasifican en tres grandes grupos [15], Figura 2. Orgánicos, compuestos por parafinas, ácidos grasos y mezclas de alcanos; Eutécticos, compuestos de mezclas eutécticas e Inorgánicos, compuestos principalmente de sales hidratadas por ejemplo la sal de Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) y el cloruro de calcio hexahidrato ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Los primeros materiales en utilizarse fueron los PCMs orgánicos, debido a su disponibilidad, sin embargo, limitados en cuanto al uso por problemas de durabilidad y limitada trabajabilidad, posteriormente se dio paso al uso de los PCMs inorgánicos, con mejores propiedades térmicas de conductividad, difusividad y temperaturas de cambio de fase más controladas y por último los PCMs eutécticos con la posibilidad de combinarse y poder modificar la temperatura de cambio de fase o propiedades térmicas en general [30].

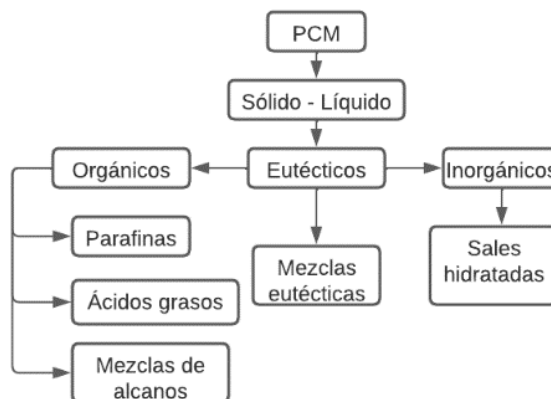


Figura 2. Diagrama de PCMs (sólido ↔ líquido).

En cuanto a los PCMs inorgánicos, dentro de las propiedades térmicas de las sales hidratadas destacan su baja conductividad térmica menor a 1.0 W/m °C, la cual actúa como un retardante en la transferencia de calor entre el exterior e interior por ejemplo en una barrera, funcionando como un aislante térmico, alto calor específico que permite estabilizar la temperatura interior debido a su capacidad de absorber o liberar más calor. La Tabla 1, indica los valores de propiedades térmicas de sales hidratadas reportadas en la literatura. Dentro de los parámetros para la selección de PCMS, es importante a considerar la temperatura de cambio de fase, esta temperatura debe estar alineada al uso propuesto para el PCM, en el caso de las sales presentes en la tabla, su temperatura de punto de fusión, se encuentra en el rango de 24 a 34 grados centígrados, lo que permite su empleo en las edificaciones en condiciones ambientales normales.

Tabla 1. Propiedades térmicas de sales hidratadas.

Autor	PCM	Punto de fusión °C	Calor específico kJ/kg °C		Calor latente de fusión kJ/kg	Densidad kg/m³	Conductividad térmica (W/m °C)		Peso molecular (g/mol)
			Sólido	Líquido			Sólido	Líquido	
[31]	CaCl ₂ ·6 H ₂ O	24	1.4	2.1	140	1470	1.09	0.54	-
[32]	CaCl ₂ ·6 H ₂ O	27	1.46	2.13	187.4	1710	1.088	0.539	219.08
[9]	Na ₂ SO ₄ * 10 H ₂ O	32	0.37	-	254	1460	0.554	-	322.19
[33]	Na ₂ SO ₄ * 10 H ₂ O	33.7	-	-	211.9	-	-	-	-

El efecto de aplicación de las sales inorgánicas, pretende mitigar la crisis energética derivada de diversos efectos, específicamente incrementando la eficiencia de los equipos de calefacción y enfriamiento, reducir los picos críticos de temperatura lo que se impacta en la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero, sin embargo, aún existen ciertas limitantes que deben ser consideradas para su integración total, como lo son las fugas o pérdidas de material y/o segregación de fases al incorporarlos en un sustrato que funcione como soporte para los PCMs [15].

Mecanismo de transferencia de calor

Por otro lado, el uso de PCMs también depende del mecanismo de transferencia de calor que se intenta mitigar, los cuales se dividen en tres: calor de radiación, convección y conducción. En cuanto a los mecanismos de transferencia de calor en las edificaciones presentes en la Figura 3, se definen como los procesos de transferencia de energía interna debidos a un gradiente de temperatura, el transporte de calor se produce a través de estos tres mecanismos fundamentales: La radiación, es emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, no requiere un medio material para propagarse, un ejemplo clásico sería las originadas por el sol que calientan las superficies de la edificación; posteriormente, por conducción, es el transporte de energía dentro de un cuerpo o entre cuerpos en contacto directo, que ocurre por interacción entre moléculas y va de la zona más caliente a la más fría, aquí la aplicación de recubrimientos térmicos cobra mayor importancia, reduciendo el calor que atraviesa el material del muro. Finalmente, ocurre la transferencia de calor por convección, es el mecanismo de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, ocurre por diferencias de densidad donde se genera calor por el movimiento de un fluido es influenciado por la temperatura interior y la ventilación [34].

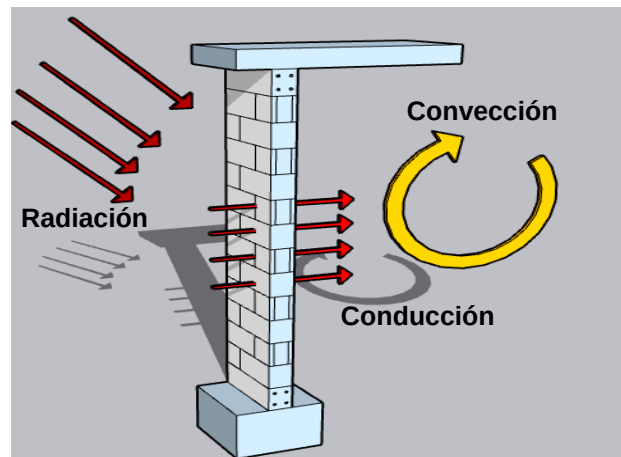


Figura 3. Mecanismos de transferencia de calor en muro de edificación.

En cuanto al análisis del desempeño térmico, se puede realizar mediante diferentes parámetros como la medición de la capacidad de almacenamiento de calor [18], [22], la

determinación de la eficiencia de carga y descarga [17], [35], el análisis de la estabilidad y durabilidad del material [15], [23]. En la gráfica de la Figura 4, se presenta la comparativa de desempeño térmico en función del comportamiento en los picos críticos de temperatura, al utilizar un mortero de recubrimiento con PCM y sin PCM. Se observa, como la diferencia entre los picos y crestas entre los morteros, representa una menor temperatura de fluctuación al interior de una edificación. Estos procesos de termorregulación de los espacios permiten suavizar los picos de temperatura que se pueden presentar durante el transcurso del día y mantener una temperatura estable, permite la eficiencia en la operación de los equipos de calefacción y enfriamiento reduciendo el tiempo de operación del equipo para alcanzar y mantener la temperatura fijada. [23], [36], [37].

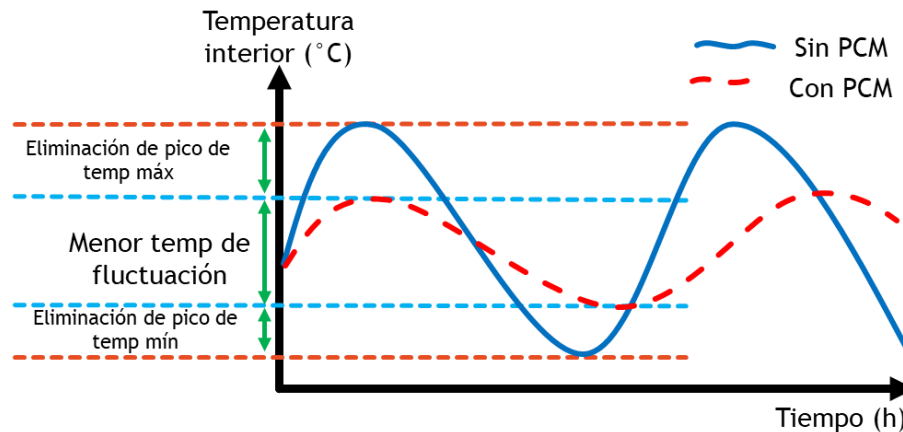


Figura 4. Desempeño térmico con y sin PCM en edificaciones.

Caracterización térmica de PCMs

Por otra parte, es de gran importancia realizar la caracterización térmica de los PCMs, algunas técnicas empleadas son la calorimetría, permite medir la capacidad de almacenamiento de calor, se divide en: calorimetría diferencial de barrido (DSC) y calorimetría de paso isotérmico o análisis termogravimétrico (TGA). Estas técnicas permiten determinar la temperatura de cambio de fase del PCM y evaluar su capacidad de almacenamiento de energía térmica [38]. Sin embargo para el diseño de sistemas de almacenamiento de calor latente, es necesario conocer con alta precisión el cambio de entalpia del PCM en función de la temperatura [39]. El método de medición estándar es la calorimetría diferencial de barrido (DSC), donde la muestra y una muestra de referencia

se someten simultáneamente a una rampa de temperatura, esta se divide en dos modos de operación diferentes: el modo dinámico y el modo paso isotérmico, algunos autores [39]. C. Barreneche et al. [40] recomiendan el uso del modo dinámico lento para caracterizar las sales hidratadas, de manera que la técnica DSC mida los cambios de calor durante las transiciones de fase [41], como:

- **Calor latente**, que es la energía que se absorbe o libera durante un cambio de fase sin cambiar la temperatura.
- **Calor específico**, la cantidad de calor necesaria para incrementar una unidad de temperatura un kg de una sustancia.
- **Temperatura de transición de fase**, temperatura a la cual se somete una sustancia y se produce el cambio de fase.

Propiedades térmicas en análisis

- **Conductividad térmica (K)**, que se refiere a la medida de la capacidad del material para conducir calor y se expresa en $W/m \cdot K$.
- **Capacidad calorífica volumétrica (Cv)**, que describe la capacidad de cierto volumen de una sustancia para almacenar energía térmica durante el proceso de incremento de temperatura sin cambiar de fase, es decir, se refiere a la cantidad de energía necesaria en forma de calor para provocar un aumento de una unidad en su temperatura y se expresa en $MJ/m^3 \cdot K$.
- **Inercia térmica**, define la dificultad de un material para cambiar su temperatura.
- **Difusividad térmica (α)**, representa qué tan rápido se difunde el calor a través de un material y tiene unidades mm^2 / s .

En el mercado actual se encuentran disponibles equipos como: Thermal conductivity tester of DRH-III, ISOMET 2114 thermal characteristics analyzer, thermal history method (THM), y el equipo TEMPOS (Thermal Properties Analyzer) basado en la norma ASTM D 5334. Este último mide los valores de conductividad térmica, capacidad calorífica volumétrica y difusividad térmica.

Métodos de encapsulación Core-shell

Durante el cambio de fase, cuando los PCMs se encuentran en estado líquido, el material se puede perder por fuga del sustrato de soporte, afectando la durabilidad del mismo, por lo que se continúa con el estudio y ensayos de diferentes métodos de aplicación (ej. microencapsulación, incorporación en diferentes sustratos porosos, métodos de encapsulación core-shell) [22], [36], [42]–[44], métodos empleados para asegurar la permanencia y durabilidad en el material de soporte. Por lo tanto, es necesario limitar la fuga o pérdida de PCMs soportados en sustratos empleando diferentes métodos de encapsulación, algunos de ellos son por la polimerización en emulsión, polimerización interfacial, el proceso sol-gel y la polimerización in situ [45]. Las investigaciones recientes involucran el método de encapsulación de los PCMs, donde se genera un recubrimiento que cubre el PCM o el agregado modificado, según sea el caso, conocido como “Core Shell”, el tamaño de la partícula recubierta resultante depende del objetivo, ya que en algunos casos se recubre únicamente el PCM sin sustrato y en otros casos el material de soporte que contiene el PCM. Sin embargo, en ambos casos el principio es semejante, donde el núcleo es representado por el PCM para el almacenamiento de energía térmica y la capa de encapsulación puede ser elaborada por diferentes métodos y con diferentes materiales [15]. Existen diferentes tipos de capa, como la melamina formaldehído (MF), la urea formaldehído (UF), el metacrilato de poli-metilo (PMMA) y el poliestireno; son los materiales más utilizados debido a su estabilidad química y resistencia mecánica [46]. Yang et al. (2003) investigó cubiertas de poliestireno (PS), polimetacrilato de etilo (PEMA) y acetato de polivinilo mediante una técnica de polimerización in situ, donde concluyó que el PEMA es la mejor capa para lograr una eficiente tasa de encapsulación de PCM [47]. En cuanto al Metacrilato de polimetilo (PMMA), el empleo de este polímero aumenta la resistencia mecánica y cambios de volumen durante los ciclos de fusión/congelación del núcleo [48].

1.2. Antecedentes

Los materiales aislantes empleados para mejorar las propiedades térmicas de los recubrimientos en las edificaciones eran implementados entre los muros y plafones y la ventaja era la reducción de la conductividad térmica del muro, sin embargo, se requerían de grandes espacios para la instalación, un problema en las dimensiones de las habitaciones en las casas de interés social, por lo que diversas investigaciones [23], [42], [49], [50] se han enfocado actualmente en modificar la matriz base del recubrimiento, adicionando materiales inteligentes. La implementación de nuevos materiales inteligentes basados en mejorar el recubrimiento o la envolvente de las edificaciones con mejores propiedades térmicas, ha permitido un ahorro considerable de energía mediante sistemas pasivos, que consisten en la regulación térmica de los espacios sin el consumo de energía eléctrica para poder funcionar [7]–[9].

Los materiales de cambio de fase (PCM), son materiales inteligentes que funcionan como un regulador térmico mediante su proceso de cambio de fase, su estado de hidratación o su estructura molecular; cuando los PCMs son sometidos a energía en forma de calor la energía almacenada en ese material es llamada calor latente, que a diferencia de los sistemas basados en reacciones termoquímicas, posee las ventajas de mayor densidad de almacenamiento y reducción de pérdidas energéticas que derivan en la variación de temperatura [9], [10]. Debido a los resultados prometedores sobre materiales de cambio de fase, al reducir la conductividad, la difusividad e incrementar el calor específico de los materiales comúnmente empleados en la construcción, se han estudiado diferentes tipos de PCM evaluando sus propiedades físicas, cinéticas, químicas y térmicas como respuesta a diferentes aplicaciones [7], [11], [12]. La literatura indica que los primeros estudios sobre los PCMs estaban orientados a los PCMs orgánicos como alternativa de mejora térmica en las edificaciones, principalmente parafinas, las cuales son de un material alcalino sólido refinado de origen orgánico, empleadas en contenedores o macroencapsulados de losas. Entre las ventajas de uso de estos PCMs orgánicos es su facilidad de uso, estabilidad química, no son corrosivos, son reciclables y entre sus desventajas son que presentan grandes cambios volumétricos durante el cambio de fase, son potencialmente combustibles, presentan calor latente y entalpía más baja que los PCMs inorgánicos, tienen un amplio rango de fusión y son más costosos [23], [51].

Posteriormente, se inició el estudio de los PCMs inorgánicos, principalmente sales hidratadas, como la sal de Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) empleada por su gran capacidad de almacenamiento de calor por unidad de volumen y bajo costo [15], [52]. Entre las ventajas del uso de PCMs inorgánicos, es que son económicos, no inflamables y presentan baja variación volumétrica durante el cambio de fase [53].

Por otra parte, los métodos de incorporación empleados de PCMs en la industria de la construcción son principalmente por la incorporación directa en el mortero de recubrimiento o concreto [23], [42], otro método de incorporación es mediante el proceso de inmersión, donde los elementos como bloques son sumergidos en el PCM en su estado líquido hasta ser absorbido por capilaridad [54]. Un tercer método empleado es mediante encapsulación, puede ser por macroencapsulación, microencapsulación y nanoencapsulación [14], [36], [38].

Para el caso de macroencapsulación, una cantidad significativa de PCM se introduce en recipientes como tubos, esferas y paneles para emplearse en la construcción. Alawadhi (2008) evaluó el desempeño térmico de un ladrillo con macrocápsulas de PCM incorporado en hoyos cilíndricos y evaluado en un clima cálido, sin embargo, el reportó que el incorporar el PCM macroencapsulado genera la necesidad de adaptar el proceso constructivo tradicional, ocasionando en la mayoría de la veces atrasos en obra lo que genera mayores costos [55]. En cuanto al método de microencapsulación, hace referente al uso de pequeñas partículas de PCM en el rango de 1 a 1000 μm revestidos con una capa sólida usualmente compuesta de polímeros, con lo que se restringe la interacción directa del PCM con la matriz cementante. Los PCMs utilizados mediante este método presentan temperaturas de cambio de fase entre los 10 a 80 °C, adicionalmente, este proceso se puede realizar mediante métodos físicos y químicos [56]. Para ambos casos de microencapsulación o macroencapsulación del PCM, después del proceso correspondiente, son incorporados en la matriz del mortero o concreto. Arce et al. (2012) y Cabeza et al. (2007) realizaron un estudio comparativo sobre el uso de PCM mediante microencapsulación y macroencapsulación para evaluar el confort térmico al interior de la edificación, ellos reportaron que el PCM microencapsulado fue más eficiente debido a que, en la macroencapsulación al tener un volumen mayor, el calor no llega

eficientemente al centro de las macrocápsulas por lo que el proceso de cambio de fase no es eficiente, a diferencia de las microcápsulas donde el volumen es menor este problema no aparece [57], [58]. Para el caso del proceso por nanoencapsulación, Alehosseini & Jafari (2020) evaluaron la posibilidad de nanoencapsular el PCM para incrementar su eficiencia térmica y evitar que el material fluya a través de los poros, por lo que se reducen las pérdidas de PCM; además mejorar la adherencia del PCM en los agregados utilizados en la mezcla cementante. Adicionalmente, se recomienda el uso de agregados porosos, ya que de acuerdo a la literatura [13], [14], se puede incrementar la cantidad del PCM adicionada a la matriz cementante a través del agregado utilizado como soporte, hasta un 8% por peso del concreto, sin comprometer sus propiedades mecánicas. Con base a lo anterior, los materiales porosos como los agregados, son un soporte ideal para la encapsulación de PCM de sal hidratada, puede retener una gran cantidad de PCM debido a la fuerza capilar y la tensión superficial proporcionada por la estructura de sus poros [15].

Los principales retos para los investigadores ante el uso de PCMs de cambio de fase sólido-líquido son principalmente dos, el primero es encontrar el PCM con las propiedades óptimas para su aplicación las cuales incluyen el tipo de PCM, temperatura de cambio de fase, precio, disponibilidad, tipo de cambio de fase, conductividad térmica y calor específico [12], [51], [59]. El segundo reto es dar respuesta a las limitantes que se generan por el uso de PCMs como son la pérdida de material en su estado líquido, durabilidad, costos y afectación al acero estructural en el caso de elementos con las sales hidratadas. Por lo tanto, las vertientes van desde limitar la aplicación del material, proponer un nuevo método de incorporación o de encapsulación [45], [46]. Por su parte, M. Muraleedharan et. al, clasifican la incorporación de PCMs en morteros, en cuatro grandes grupos: I. mediante microencapsulación, II. incorporados directamente, III. Incorporados en los poros del agregado utilizado como sustrato o soporte y IV. macroencapsulados, esto dependerá de las características de cada tipo de PCM [17]. Por otro lado, Cui et. al., impregnaron con un PCM (Alcohol lauril) una arcilla expandida utilizándola como sustrato poroso y realizó macroencapsulación con resina. Ellos determinaron que se incrementó la cantidad de PCM retenida en el sustrato y se mejoró la resistencia a la compresión en más de 15 Mpa, por lo que sugieren que puede ser

empleado en aplicaciones estructurales [60], lo que indica las ventajas del uso de resinas como medio de encapsulación de PCM, mantienen sus propiedades térmicas y evitan la pérdida de material, además, mantienen la estabilidad del PCM ante los ciclos de cambio de fase y evitan la interacción con agentes externos.

1.3. Planteamiento del problema

De acuerdo con el INEGI (2020), la tendencia de crecimiento poblacional durante los últimos años va en aumento, en México en 1950 se tenían 20,000,000 personas registradas y para finales del 2020 la población se encontraba en 130,000,000 personas, este factor aumenta la demanda de edificaciones y urbanización. Por otra parte, de acuerdo con CONAGUA (2020) la temperatura promedio ha incrementado; en México para 1965 la temperatura media promedio anual era de 20.4 °C, comparado con el 2025 la temperatura media promedio fue de 22.6 °C lo cual indica una tendencia en aumento, durante la noche las fluctuaciones térmicas son elevadas y la envolvente arquitectónica tradicional carece de inercia suficiente para mitigar los picos de temperatura, lo que deriva en el uso excesivo de sistemas de climatización y aumento proporcional de emisiones de CO₂. En ese sentido, el incremento de temperatura propicia un aumento en el consumo de energía eléctrica por el uso de equipos de climatización que se ven forzados a regular los picos de temperatura derivado de los ciclos térmicos para mejorar el confort térmico en el interior de las edificaciones, adicionalmente los altos consumos de energía, contribuyen al ya creciente problema de quema de combustibles para la generación de energía eléctrica, establecer estrategias que influyan de manera directa o indirecta a la reducción del consumo energético inciden en mitigar el impacto ambiental.

Los Materiales de Cambio de Fase (PCMs) se presentan como una solución innovadora gracias a su capacidad de almacenamiento de energía mediante calor latente, no obstante, su integración en materiales de la construcción enfrenta barreras técnicas y científicas no resueltas, la incompatibilidad química, segregación, lixiviación y corrosión. Por lo tanto, el problema radica en la necesidad de desarrollar un mortero de recubrimiento que incorpore PCMs inorgánicos, sin comprometer las propiedades mecánicas, durabilidad y que maximice la regulación térmica de las edificaciones.

1.4. Justificación

La presente investigación se fundamenta en la necesidad de evolucionar hacia una industria de la construcción más sostenible y técnicamente eficiente. La integración de Materiales de Cambio de Fase (PCMs) inorgánicos en morteros de recubrimiento no solo representa una innovación en la ciencia de materiales, sino que responde a demandas críticas con respecto al consumo energético, ambiental, social y técnica.

El sector de la construcción y edificación es responsable de una fracción significativa del consumo energético global, derivado principalmente de la dependencia de sistemas mecánicos para el confort térmico. La propuesta de un recubrimiento base cemento capaz de incrementar la inercia térmica mediante calor latente permite un ahorro energético directo. Al estabilizar la temperatura interior de la edificación, se optimizan los ciclos de operación de los equipos de climatización reduciendo la demanda y los costos operativos asociados al consumo eléctrico, su naturaleza poco invasiva lo convierte en una solución costo efectiva tanto para edificaciones nuevas como para la rehabilitación de edificaciones existentes.

Además, la justificación social de este proyecto reside en la generalización del confort térmico. En contextos donde la pobreza energética impide el uso de sistemas de aire acondicionado o calefacción, el mortero modificado actúa como un regulador pasivo que mantiene las viviendas dentro de rangos de habitabilidad saludables, reduce enfermedades relacionadas con el estrés térmico y permite que sea adoptado de manera sencilla en programas de vivienda social sin incrementar drásticamente la complejidad técnica de la obra y costos.

Técnicamente, esta investigación aborda uno de los mayores desafíos en el estudio de los PCMs, la estabilidad físico-química y termofísica. La metodología propuesta, que consiste en la impregnación de agregados finos porosos y su posterior encapsulado mediante recubrimiento polimérico, representa un avance significativo en la prevención de la pérdida y corrosión de PCMs, lo que garantiza la durabilidad y compatibilidad con la matriz cementante, aportando funcionalidad a los nuevos materiales de la construcción.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar un recubrimiento base cemento elaborado con agregados finos impregnados con diferentes sales hidratadas como material de cambio de fase (PCM) con propiedades termofísicas.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar física y fisicoquímicamente el agregado calizo y arena basáltica.
- Determinar los parámetros de impregnación de PCM (sulfato de sodio decahidratado y cloruro de calcio hexahidrato) en agregado calizo y basáltico, por inmersión a diferentes condiciones de tiempo.
- Determinar los parámetros de encapsulación mediante (RP) del agregado (calizo y basáltico) impregnado con PCM.
- Caracterizar físicamente los agregados impregnados y encapsulados, basado en la norma ASTM C144-18.
- Caracterizar física, mecánica y fisicoquímicamente el mortero de recubrimiento con agregados impregnados con PCM.
- Determinar las propiedades térmicas de calor específico, conductividad térmica y prueba termográfica de diferentes recubrimientos modificados con PCM.

1.6. Hipótesis

Los Materiales de Cambio de Fase (PCM) impregnados en agregado poroso como sustrato, funcionarán como un regulador térmico al reducir los picos de temperatura y el coeficiente de transferencia de calor a partir de sus cambios de fase sólido ↔ líquido, de un recubrimiento base cemento para edificaciones.

CAPÍTULO 2

2.1 Diagrama experimental

Para la ejecución del proyecto de investigación se presenta la siguiente metodología, que está dividida en cinco etapas como indica la Figura 5. La etapa uno está enfocada al diseño experimental para establecer los parámetros de impregnación de los dos tipos de agregado poroso, también, al estudio y caracterización de la materia prima comenzando por el agregado calizo y agregado basáltico. La etapa dos se enfoca en la realización del proceso de impregnación con los parámetros establecidos en la etapa uno, incluye también el proceso de encapsulación polimérica. En la etapa tres, se aborda el proceso de diseño de mortero tomando la fluidez como parámetro de control y también el diseño de la caja caliente que será empleada en la última etapa. La etapa cuatro consiste en la caracterización físico-química del mortero de recubrimiento y caracterización mecánica con la prueba de resistencia a la compresión. Finalmente, la quinta etapa está enfocada a la caracterización térmica del mortero de recubrimiento modificado mediante el uso del equipo TEMPOS y la evolución del desempeño térmico en condiciones controladas,

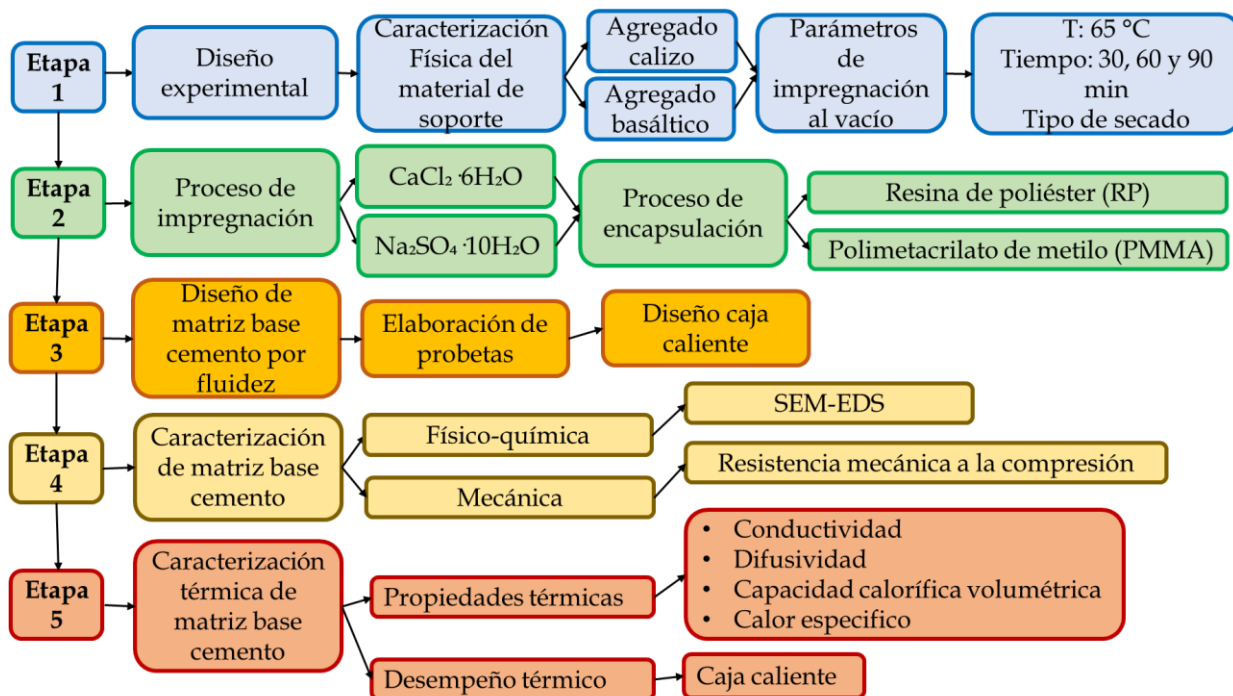


Figura 5. Diagrama experimental general de etapas de investigación.

2.2 Materiales y métodos

Fue utilizado Cemento Portland Compuesto, tipo I clasificado como CPC de acuerdo con la norma [61], densidad de 3.05 g/cm³ y peso volumétrico de 1216.22 kg/m³. Agregado calizo triturado con rango de tamaño de partícula de 0.075 a 1.18mm. Agregado basáltico triturado con rango tamaño de partícula de 0.075 a 1.18mm. Fueron utilizados dos PCMs, Sal de Glauber (Na₂SO₄·10H₂O) y cloruro de calcio hexahidrato (CaCl₂·6H₂O), ambos de la marca Sigma-Aldrich. Para el proceso de encapsulado se utilizó resina de poliéster (RP), elaborada con resina PP-250 marca Poliformas y Butanox M-50 marca Nouryon. En la Tabla 2, se presenta la nomenclatura establecida para el desarrollo de proyecto.

Tabla 2. Nomenclatura.

NOMENCLATURA	
Arena Caliza	AC
Arena Basáltica	AB
Cloruro de Calcio Hexahidratado (CaCl ₂ ·6H ₂ O)	CC
Sulfato de Sodio Decahidratado (Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O)	SS
Polimetacrilato de Metilo	PMMA
Mortero 1:3 Cemento/Arena	M
Mortero Referencia	RM
Tiempo (30, 60 y 90 min) *	T1, T2 y T3

T(X) *: X puede ser sustituida por los valores de 30, 60 y 90 min.

2.3 Diseño experimental

En la etapa de impregnación de los agregados con PCMs, se estableció un diseño factorial de tres factores 3^K y se representa en la gráfica de la Figura 6. El diseño contempla la combinación de factores independientes, los factores establecidos para el diseño experimental son presentados en la Tabla 3, los cuales son el Tiempo de impregnación, Tipo de sal y Tipo de arena. El primer factor que representa el tiempo de impregnación se estableció de 30, 60 y 90 minutos. El segundo factor que corresponde al tipo de sal indica la sal Cloruro de Calcio Hexahidratado (CaCl₂·6H₂O) y la sal de Sulfato de Sodio Decahidratado (Na₂SO₄·10H₂O). Finalmente, el tercer factor establece el tipo de arena, basáltica y caliza.

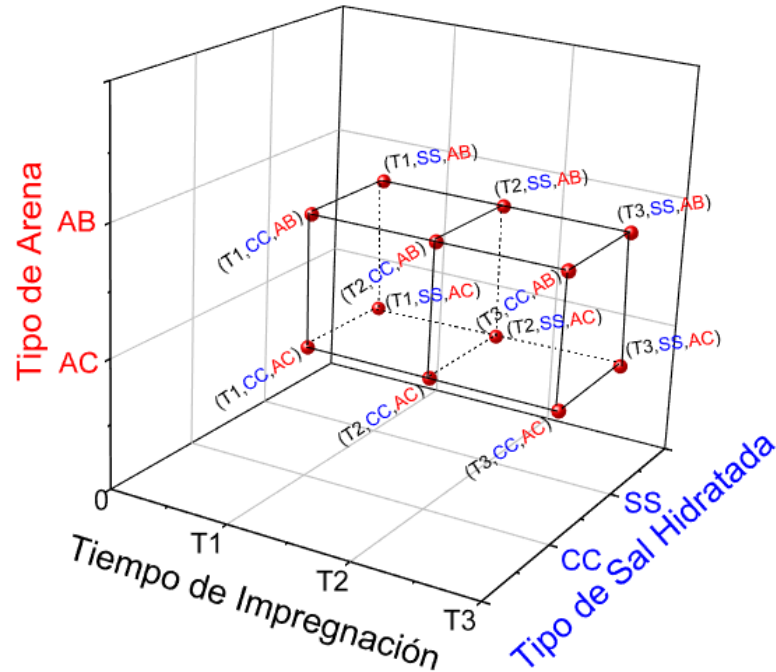


Figura 6. Experimento factorial de tres factores que incluye el tiempo de impregnación, el tipo de arena y el tipo de sal hidratada.

Para el desarrollo de cada una de las interacciones, se tomaron dos muestras de 50 g de cada tipo de arena por separado, las cuales se sumergieron en 50 g de cada tipo de sal a una temperatura de 65°C, (asegurando mantener la fase líquida) dentro de una cámara de vacío a los tres tiempos establecidos (Tabla 3), obteniendo un total de 24 muestras de 50 gramos de arena. La variable de salida se determinó por un diferencial de peso entre el porcentaje de impregnación y retención de sales en el sustrato poroso, de este modo se obtuvo cuatro diferentes combinaciones (Tabla 4).

Tabla 3. Diseño experimental 1: Variables de entrada y salida.

VARIABLES DE ENTRADA			VARIABLE DE SALIDA	NÚMERO DE MUESTRAS 50 g
TIPO DE AGREGADO	TIPO DE SAL	T (min)	% IMPREGNACIÓN (ΔW)	
AC	CC	30	-	2
		60	-	2
		90	-	2
	SS	30	-	2
		60	-	2
		90	-	2

AB	CC	30	-	2
		60	-	2
		90	-	2
	SS	30	-	2
		60	-	2
		90	-	2
TOTAL DE MUESTRAS				24

Posteriormente al proceso de impregnación, se realizó la encapsulación. Se analizaron dos ensayos diferentes variando el componente: Resina de poliéster y Polimetacrilato de metilo. Finalmente, los agregados impregnados y encapsulados fueron incorporados en una mezcla base cemento en relación 1:3 cemento – agregado, con respecto al volumen y fueron comparadas con dos muestras de control de mortero. Se obtuvieron 6 diferentes familias en base a las variables propuestas anteriormente. Cada muestra de mortero modificada fue caracterizada a 28 días de curado para cuatro variables de salida: resistencia a la compresión, propiedades físico-químicas, propiedades térmicas y desempeño térmico.

2.4 Caracterización de agregados

Granulometría y módulo de finura

La granulometría del agregado fino calizo (AC) y arena basáltica (AB), se realizó de acuerdo con la norma ASTM C-144 18, en ambos casos se realizó un cuarteo previo del material hasta obtener una muestra representativa de cada tipo, como se muestra en la imagen de la Figura 7. Se tomaron tres muestras de 1 kg de cada tipo de agregado, calizo y basáltico. Para el secado, las muestras se colocaron en un horno a una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, posteriormente al secado, se reduce cada muestra de 1 kg a 0.5 kg. Se emplearon las cribas de número 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200. Cada una de las muestras AC y AB de 500 g se colocaron en la parte superior del armado de las cribas y se sometió a agitación constante por diez minutos en el agitador de tamices motorizado marca HUMBOLDT. Al finalizar el tiempo de agitación, se peso cada una de las cribas y se recabaron los datos de peso retenido en cada una de ellas para su posterior análisis.



Figura 7. Proceso de granulometría de agregados.

Densidad y absorción

En cuanto al ensayo de densidad y absorción, se realizó de acuerdo a la norma [62] y el proceso se presenta en la imagen de la Figura 8, la prueba fue realizada por duplicado con cada tipo de agregado con la granulometría ajustada. Con el objetivo de evaluar la mayor cantidad de retención de sales al interior del agregado y no sobre su superficie, se trabajó solamente con el material que paso la malla número 16 (1.18 mm) y se retuvo en la malla número 30 (0.6 mm). Cada una de las muestras de 1 kg, se secó en horno a temperatura de 110 ± 5 °C por 24 h, posteriormente, cada muestra fue inmersa en agua por 24 h, seguidamente se retiró el excedente de agua sin perder finos y se extendió en una superficie plana no absorbente expuesta a una corriente de aire. Se agitó constantemente para asegurar un secado homogéneo hasta obtener la condición saturado superficialmente seco (SSS). La muestra fue pesada en un picnómetro con agua hasta la marca de afore, se retiró la mayoría del agua para dejar espacio para el agregado y se pesaron 500 g de agregado SSS, con ayuda de un embudo se colocaron dentro del picnómetro agregando agua, se agito vigorosamente por un periodo de 30 minutos hasta retirar todas las burbujas de aire contenidas al interior del líquido, finalmente con un papel

absorbente se retiró el resto de burbujas y se completó el agua hasta la afore. Para pesar el picnómetro con el agregado y establecer la densidad relativa (S), se retiró el líquido del interior del picnómetro y se colocó en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C por un periodo de 24 h.

En base a las siguientes ecuaciones, se calcularon los valores de densidad relativa y absorción.

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)}(S) = A/(B + S - C) \quad 1.1$$

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica)} SSS = S/(B + S - C) \quad 1.2$$

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)} = A/(B + A - C) \quad 1.3$$

$$\text{Absorción, \%} = 100 [(S - A)/A] \quad 1.4$$

Donde:

A = masa de la muestra secada a horno, g .

B = masa del picnómetro lleno con agua hasta el nivel de afore, g .

C = masa del picnómetro lleno con la muestra y agua hasta el nivel de afore, g .

R_1 = lectura inicial del nivel de agua en el matraz de Le Chatelier, mL .

R_2 = lectura final del nivel de agua en el matraz de Le Chatelier, mL .

S = masa de la muestra en condición SSS (usada en el procedimiento gravimétrico para densidad y densidad relativa (gravedad específica) o para absorción con ambos procedimientos), g .

S_1 = masa de la muestra en condición SSS (usada en el procedimiento volumétrico para densidad y densidad relativa (gravedad específica)), g .



Figura 8. Prueba de densidad y absorción.

Microscopía Óptica (MO)

Se analizaron dos rangos de tamaño en ambos tipos de agregado, el primer rango es de 1.18mm a 0.6 mm y el segundo rango es de 1.18mm a 0.075mm, se analizó un total de ocho muestras, antes y después del proceso de impregnación, utilizado un microscopio VE-B15 triocular biológico para analizar la superficie de las partículas.

Difracción de Rayos X (DRX)

Por último, se analizó la estructura cristalina de cada tipo de agregado mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX), se utilizó un equipo marca Bruker Phaser D2, radiación de cobre [λ ($\text{CuK}\alpha$) = 1,54056 Å] en el rango de detección de 2theta de 0° a 70°, tiempo de integración de 0.4 s y un intervalo de paso de 0.02 s.

2.5 Parámetros de impregnación de PCM en agregado calizo y basáltico.

El proceso de optimización de variables propuesto en el diagrama de la figura 9, permite mediante el ensayo de muestras de menos tamaño, reducir la cantidad de variables propuestas en el diseño experimental, para esto, las muestras empleadas de agregado fueron de 50 g de agregado y 50 g de sales hidratadas. Los parámetros de impregnación analizados fueron: tipo de agregado (calizo o basáltico), tamaño de agregado (1.18-0.6

mm o 1.18-0.075 m), tiempo al vacío (30, 60 o 90 min), tipo de secado final (suspendido o vacío) y tipo de sal (CC o SS). Para facilitar el proceso de selección y comparación, primero se analizaron las todas las variables anteriores con un tipo de sal, posteriormente el proceso se repitió, pero con otro tipo de sal disponible.

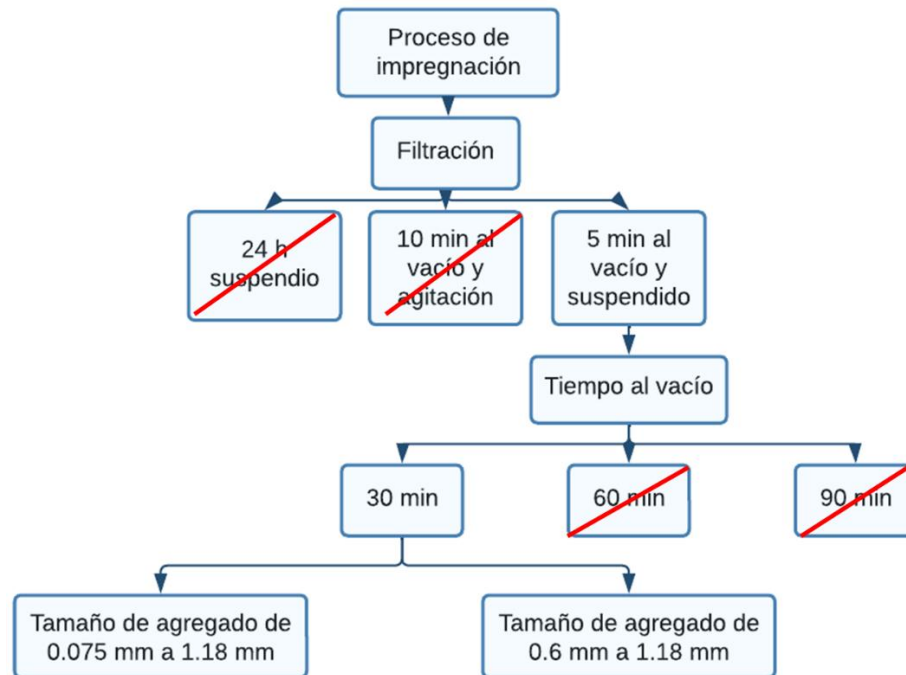


Figura 9. Proceso de determinación de variables.

Como se mencionó anteriormente se establecieron dos tamaños diferentes de agregado, la distribución granulométrica del agregado de 0.075-1.18 mm esta descrita en la Tabla 4 y la segunda de agregado de 0.6 a 1.18 mm, dicha distribución aplica para ambos tipos de agregado.

Tabla 4. Diseño de muestra de 50g de agregado.

Curva granulométrica ajustada		
Malla #	Abertura (mm)	Peso arena para 50 g
16 – 30	1.18 - 0.6	18.8
30 – 50	0.6 - 0.3	17.5
50 - 100	0.3 - 0.15	7.5
100 - 200	0.15 - 0.075	6.2

Previo al proceso de impregnación se realizaron pruebas piloto para determinar la temperatura y tiempo de calentamiento del CC y SS. El CC tiene una temperatura de fusión de 30°C, sin embargo, durante el proceso de calentamiento fue necesario superar esa temperatura asegurar la sal en su forma líquida de manera homogénea. Se tomaron muestras de 50 g de CC, se colocaron dentro de un vaso de precipitado de 100 ml cada una, sobre una parrilla de gas y fue calentado en el rango de temperatura mayor a 30 °C y menor a 75°C, con un incremento de 5 en 5 °C y tiempo de 5 min a 15 min (Figura 10). Para el caso del SS el proceso fue similar tomando en cuenta que, a diferencia del CC, el SS tiene un punto de fusión incongruente como se observa en la Figura 11.

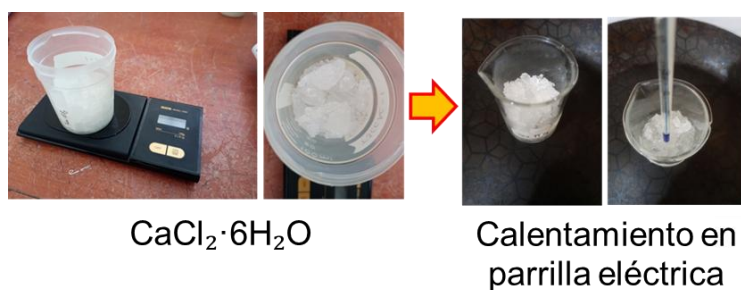


Figura 10. Determinación de parámetros de calentamiento de Cloruro de Calcio Hexahidratado.

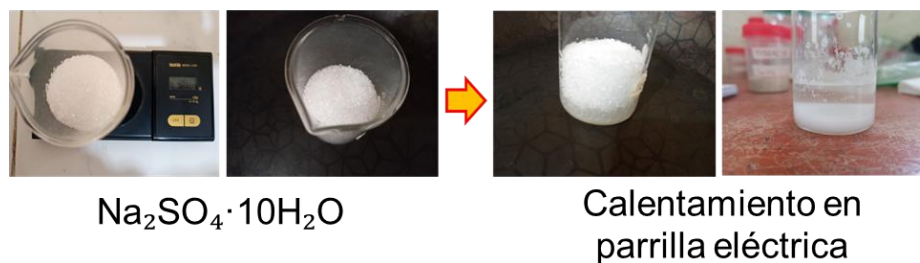


Figura 11. Determinación de parámetros de calentamiento de Sulfato de Sodio Decahidratado.

Tipo y tiempo de filtración, tiempo dentro de cámara de vacío y tamaño de agregado.

De acuerdo a los resultados preliminares como se indicó en el diagrama de la Figura 9, durante el proceso de impregnación, se estableció el tiempo y método de infiltración al vacío como primer parámetro de control, se emplearon 3 métodos: el primero fue por agitación mediante el uso de un embudo de buchner y papel filtro suspendido durante 24 h, el segundo método fue colocar el embudo con papel filtro sobre un matraz aforado y

filtrar al vacío en agitación constante durante 10 min, y el tercer método fue colocar el embudo con papel filtro sobre un matraz aforado y filtrar al vacío con el agregado suspendido sin agitar sobre el papel filtro del embudo durante 5 min. De acuerdo a los resultados preliminares, se optó por el tercer método de suspensión, por el periodo de 5 min ya que presento valores constantes en la retención de CC a diferencia de los otros.

Para determinar del tiempo de impregnación al vacío, se realizó el análisis a tres tiempos diferentes, $T_1=30 \text{ min}$, $T_2=60 \text{ min}$ y $T_3=90 \text{ min}$. Se realizaron dos ensayos para cada muestra y se determinó que el proceso de impregnación al vacío por $T_1=30 \text{ min}$ fue el más eficiente, ya que los valores de impregnación se mantuvieron constantes, aunque fueron similares a los de $T_3=60 \text{ min}$, para la selección se consideró el tiempo con el menor consumo de energía. Por último, se evaluaron dos rangos de tamaño del agregado empleado en la muestra, el primero con agregado en un rango de tamaño de 0.075 mm a 1.18 mm y el segundo en un rango de 0.6 mm a 1.18 mm.

Por otra parte, para cada uno de los ensayos de impregnación, el agregado paso por un proceso de secado al horno por 24 h a la temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Como se muestra en la Figura 12, en cada una de las interacciones se utilizó una relación de AC:CC de 1:1, con un total de 6 interacciones: dos con un periodo de inmersión al vacío de $T_1=30 \text{ min}$, dos de $T_2=60 \text{ min}$ y dos de $T_3=90 \text{ min}$. El proceso se inició calentando el CC durante seis minutos y medio hasta llegar a la temperatura de 65°C , posteriormente el CC se vertió en el AC y se agito durante un minuto, el recipiente se colocó dentro de la cámara de vacío por un periodo de $T(X)$ a una presión de -100 Kpa (-7.5006×10^{-2}), finalmente se filtró al vacío por cinco minutos, y por diferencial de peso (ΔW) se obtuvo la cantidad de CC retenido en la muestra de AC. El proceso de impregnación con el SS y agregado basáltico fue realizado de la misma manera, como se indica en la Figura 12.

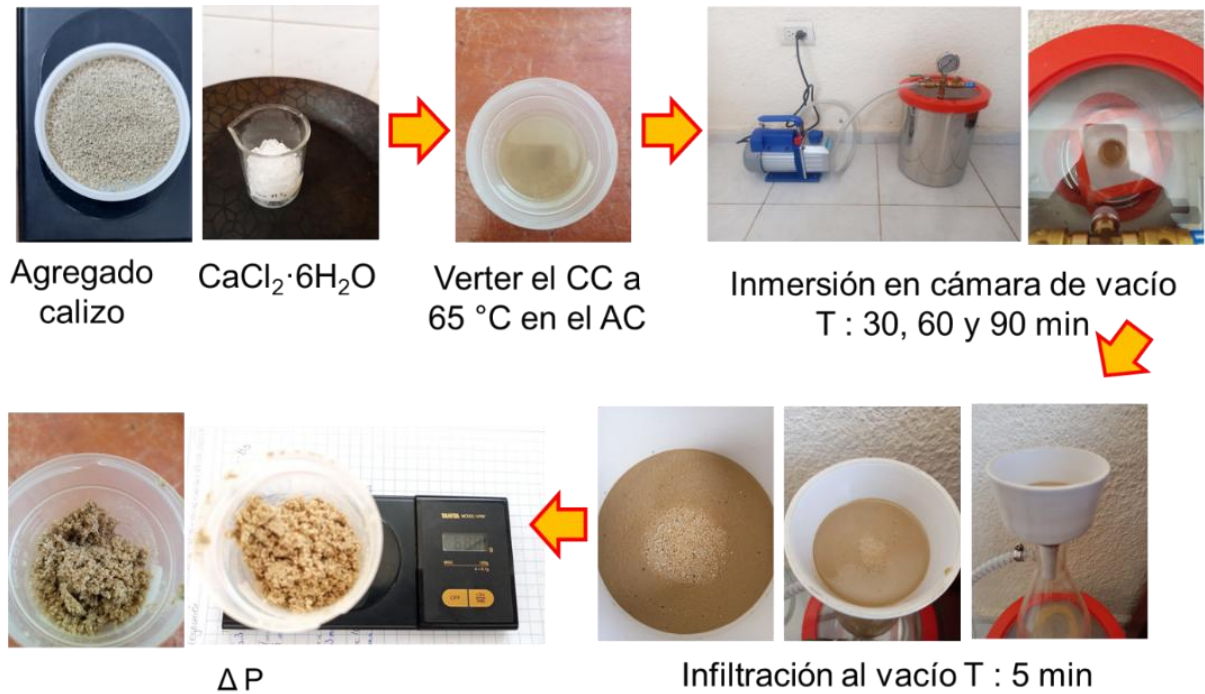


Figura 12. Proceso de impregnación al vacío.

2.6 Proceso de Encapsulación

El proceso de encapsulación fue evaluado con dos tipos de polímeros, el polimetacrilato de metilo *PMMA* y resina de poliéster *RP*, se comparó la homogeneidad del material sobre la superficie del agregado impregnado, espesor y aglomeración.

La encapsulación mediante polimetacrilato de metilo *PMMA* se dividió en dos etapas como indica la Figura 13. En la primera se determinó la relación en peso del metacrilato de metilo y el peroxidisulfato de potasio, para obtener una muestra trabajable para el recubrimiento del agregado. Las densidades de los polímeros son 0.936 g/cm³ a 25 °C y 2.477 g/cm³ a 25 °C, respectivamente, los cuales son datos importantes para establecer la relación con respecto al volumen y las proporciones empleadas son las descritas en la Tabla 5. En las primeras muestras del proceso de mezclado, el objetivo fue lograr una consistencia homogénea y lo suficiente trabajable para recubrir el agregado, para esto se empleó un mezclador de resina con paletas de plástico, sin embargo, durante el proceso de mezclado las aspas del mezclador se degradaron y se combinaron con la mezcla, lo cual cambió el color y la densidad, por lo que fue necesario realizar nuevas mezclas, con

aspas de metal, para evitar la contaminación de la misma. La segunda etapa consistió en determinar la cantidad de agregado con relación a la resina para propiciar la generación de una película uniforme sobre el agregado, considerando las pérdidas de material y saturación superficial; se fueron agregando porciones de 5 g a la mezcla en agitación constante, hasta alcanzar la trabajabilidad requerida y evitando la aglomeración del material y generar granos independientes y recubiertos. Después de 24 horas a temperatura ambiente la mezcla se seca completamente.

Tabla 5. Ensayos preliminares para encapsulación por PMMA.

Muestras piloto PMMA						
Núm. muestra	Metacrilato de metilo		Peroxidisulfato de potasio		Relación peso	Relación volumen
	(g)	(cm ³)	(g)	(cm ³)		
1	10	10.68	2	0.81	5:1	5.34:1
2	3	3.21	6	2.42	1:2	1.33:1
3	2	2.14	6	2.42	1:3	1:1.13
4	4	4.27	6	2.42	1:1.5	1.76:1
5	3.8	4	9.9	4	1:2.6	1:1



Figura 13. Proceso de encapsulación con PMMA.

Resina de poliéster (RP)

El proceso de encapsulación mediante resina de poliéster (RP), se dividió en dos etapas, la primera para determinar la cantidad de catalizador a resina para controlar el proceso

de endurecimiento y la segunda etapa para establecer la relación de *RP* con respecto a la cantidad de agregado. La Tabla 6 indica las diferentes cantidades de catalizador que se empleó con respecto de la cantidad de resina usada en esta investigación, se agito vigorosamente durante dos minutos en cada uno de los casos. Durante el proceso de mezclado la resina presentó un cambio de color a un tono verde y el proceso de endurecimiento inicio posterior al mezclado, antes de que la resina inicie el proceso de secado se vierte el agregado y se mantiene en agitación constante de 30 a 60 min, dependiendo de la cantidad que se usó de catalizador para propiciar la correcta distribución de la mezcla en la superficie del agregado, como muestra la Figura 14, el endurecimiento y secado finaliza 24 horas después de iniciado el proceso de mezcla.

Tabla 6. Ensayos preliminares para encapsulación por RP.

Muestras piloto RP			
No. muestra	Resina PP-250 (g)	Butanox M-50 (g)	AC (g)
1	10	0.025	40
2	10	0.1	40
3	10	0.2	60
4	10	0.3	70

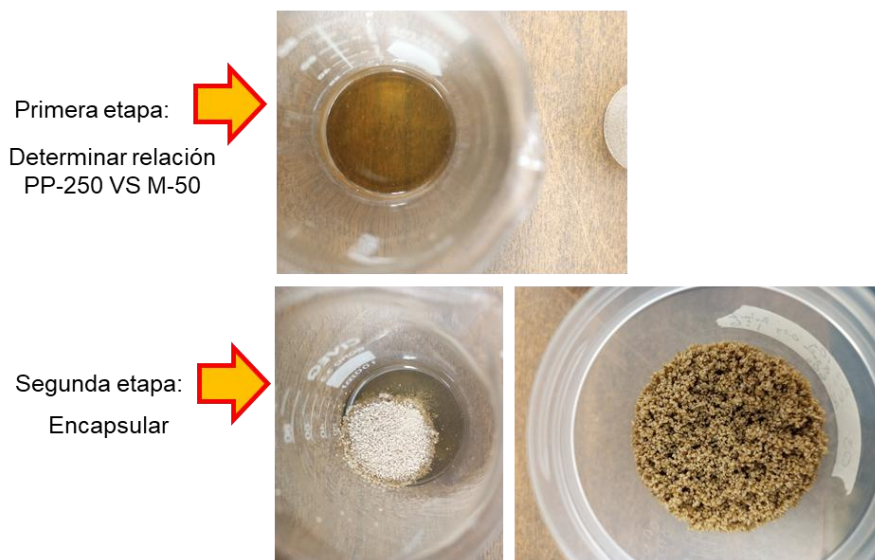


Figura 14. Proceso de encapsulación con RP.

2.7 Diseño de mezclas de morteros por fluidez

A diferencia del concreto, el mortero se diseña en base a la fluidez como un parámetro de control de acuerdo a la norma ASTM C 1437, que establece el diseño de mezcla por fluidez y la norma ASTM C 230, que establece las especificaciones de la mesa de fluidez. La Figura 15, presenta el procedimiento establecido en la norma.



Figura 15. Prueba de fluidez en morteros.

2.8 Caracterización térmica de morteros

Elaboración de muestras

Para evaluar las características térmicas de morteros con adición de PCMs se realizaron dos ensayos diferentes. El primero se enfocó en determinar los valores de conductividad térmica, difusividad y capacidad calorífica volumétrica mediante el uso del equipo TEMPOS (Thermal Properties Analyzer) y en base a la norma ASTM D 5334. El segundo evaluó el desempeño térmico mediante el uso de una caja térmica.

Para ambos ensayos se requirieron 2 muestras de morteros en forma de cubo de 5 cm de arista para cada tipo de agregado, AC y AB, de acuerdo a la norma ASTM C 109. Se

realizó una modificación en la proporción de los insumos, debido al cambio en el peso volumétrico suelto (*PVS*) del agregado impregnado con PSMs. La Figura 16, presenta la metodología seguida para la elaboración de los cubos, desde el mezclado hasta el proceso de curado de 28 días de los cubos.



Figura 16. Elaboración de muestras cúbicas de morteros con adición de PCMs.

2.9 Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas, como la conductividad térmica, difusividad y capacidad calorífica volumétrica fueron determinadas después de 28 días, usando el equipo TEMPOS (Thermal Properties Analyzer) y en base a la norma ASTM D 5334.

A partir de los datos obtenidos, conductividad térmica, difusividad y capacidad calorífica volumétrica se determinó el calor específico a partir de la Ecuación 1 de Difusividad propuesta por Errebai et al. [63]. Donde el calor específico (C_p), se obtuvo a partir de los datos de densidad, conductividad y difusividad.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (1.5)$$

Donde:

α = difusividad ($m^2 s^{-1}$)

λ = conductividad térmica ($W m^{-1} K^{-1}$)

ρ = densidad ($Kg m^{-3}$)

C_p = calor específico ($J kg^{-1} K^{-1}$)

Se empleó una caja de temperatura elaborada en madera de forma rectangular de 38 x 38.5 x 53 cm, con un aislamiento térmico de 2.5 cm de espesor de poliestireno extruido, en todas sus caras internas (Figura 19). Se evaluaron 6 muestras de mortero de diferente matriz, por cada tipo de matriz se emplearon dos cubos. La Tabla 7, presenta el diseño de mezclas de muestras con los dos diferentes agregados (basado en las normas ASTM C 1437 y ASTM C 230), manteniendo los valores de fluidez de 110 ± 5 .

Tabla 7. Dosificación por fluidez

Tipo de agregado	Agregado Kg	Cemento Kg	Agua Kg	Fluidez %
AC	0.4875	0.1321	0.1399	105.88
CCAC	0.3545	0.1321	0.0972	108.82
SSAC	0.3220	0.1321	0.0972	106.86
AB	0.4520	0.1321	0.1415	106.37
CCAB	0.2984	0.1321	0.0920	107.35
SSAB	0.3190	0.1321	0.09007	113.97

Para el análisis térmico se empleó el equipo TEMPOS (Thermal Properties Analyzer), que viene equipado con un sensor SH-3 de doble aguja (30 mm de largo, 1.3 mm de diámetro) (Figura 17), mide la capacidad calorífica volumétrica, difusividad, conductividad y resistividad térmica. El SH-3 es compatible con la mayoría de los materiales sólidos y granulares. Ambos pines del sensor deben quedar completamente dentro del cubo por lo cual, se realizaron dos barrenaciones de 1.3 mm de diámetro a una profundidad de 30 mm en cada uno de los cubos mediante el uso de un taladro con soporte vertical como se puede observar en la Figura 17.

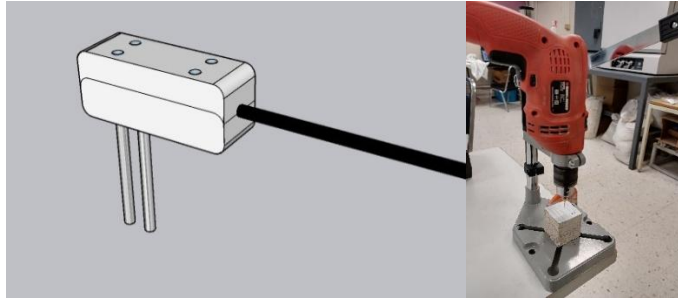


Figura 17. Sensor SH-3.

La Figura 18 indica el procedimiento para el proceso de toma de datos térmicos. Se realizaron tres replicas por cada una de las muestras. Los morteros fueron estabilizados a tres diferentes temperaturas: 21, 26 y $36 \pm 1^\circ\text{C}$; para estabilizar la temperatura fue necesario colocarlos previamente en una incubadora (Thermo Scientific Heratherm Incubator). Tanto la incubadora como las muestras de mortero se colocaron dentro de una campana extractora de humos. Una vez que la muestra alcanzó el equilibrio a la temperatura de muestreo, se retiró de la incubadora y se colocó sobre una superficie de espuma de poliuretano para evitar el cambio de temperatura brusco; el sensor SH-3, previamente lubricado con grasa disipadora de calor, se insertó en las barrenaciones y se procedió a la toma de la lectura.



Figura 18. Captura de conductividad, difusividad y capacidad calorífica volumétrica.

Desempeño térmico

El desempeño térmico de cada mortero de matriz cementante fue evaluado mediante el uso de la caja caliente [18], [29], [35], [42].

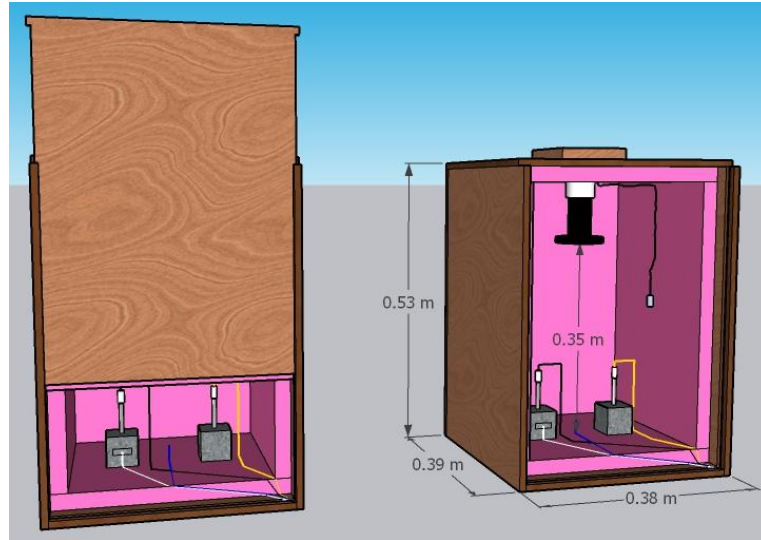


Figura 19. Caja térmica para determinación de desempeño térmico.

La caja caliente consta de un calentador eléctrico de 300 watts colocado a una distancia de 35 cm de la cara inferior de la caja. El calentador está conectado a un regulador por la parte exterior y a un termómetro que controla los intervalos de encendido del calentador, cada vez que llega a la temperatura de control establecida de 35 °C y una vez que alcanza la temperatura se apaga; Por otro lado, la caja caliente consta de cuatro termopares conectados a un termómetro de cuatro canales, marca Perfect Prime modelo TC0309. La ubicación de los termopares fue la siguiente: 1) dentro del mortero 1, 2) en la cara exterior del cubo de mortero 1, 3) dentro del cubo de mortero 2 y 4) ubicado a 5 cm de distancia de cada uno de los cubos y a 35 cm de la lámpara térmica al centro de la cara inferior de la caja. Primeramente, se calentó la caja hasta alcanzar una temperatura estable de 35 °C $\pm$ 5, separadamente los cubos de mortero se mantuvieron a 21.5 °C $\pm$ 0.5. Previamente se colocó el termopar en el interior de cada cubo con ayuda de grasa disipadora de calor. Una vez alcanzada la temperatura de la caja se introdujeron los cubos de mortero. El tiempo de permanencia de los cubos dentro de la caja fue por dos horas, seguido de tres horas de libre enfriamiento, hasta lograr el equilibrio térmico a temperatura ambiente.

2.10 Caracterización mecánica de morteros

Elaboración de muestras

La caracterización mecánica, estuvo enfocada en determinar los valores de resistencia a la compresión de los morteros de recubrimiento en base en la norma ASTM C109. Para el ensayo se elaboraron tres muestras de mortero de 5 cm de arista por cada tipo de agregado AC y AB. Se realizó una modificación en la proporción de los insumos, debido al cambio en el peso volumétrico suelto (*PVS*) del agregado impregnado y encapsulado con PCMs. Para la elaboración de las muestras de mortero se consideraron los datos obtenidos de las pruebas de fluidez, así como para establecer el diseño de mezcla de cada una de las muestras. En la Figura 20 se presenta la serie de pasos seguidos durante el proceso, desde la elaboración de la mezcla hasta el curado y obtención de las muestras de mortero.



Figura 20. Elaboración de probetas.

Se evaluaron 6 morteros diferentes clasificados como *MAC*, *MCCACRP*, *MSSACRP*, *MAB*, *MCCABRP* y *MSSABRP*; por cada tipo de mortero se emplearon tres cubos. La Tabla 7, presenta el diseño de mezclas de muestras basado en las normas ASTM C 1437 y ASTM C 230.

Después del curado de 28 días, se empleó la prensa marca ELVEC E 659-4 para el ensayo de tronado de los cubos y obtención de la resistencia a la compresión.

La densidad de los morteros *MAC*, *MCCACRP*, *MSSACRP*, *MAB*, *MCCABRP* y *MSSABRP* se determinó mediante la relación entre la masa y el volumen de un recipiente conocido.

CAPÍTULO 3

3.1 Resultados y discusión

Caracterización del agregado fino

La gráfica de la Figura 21, corresponde a la curva de granulometría realizada para el agregado AC y AB en ella se observan los parámetros mínimos y máximos de distribución granulométrica. Basado en la norma ASTM C-144 18, ambos agregados AC y AB no cumplen con los parámetros establecidos en la norma debido al exceso de agregado que se retiene en la malla número 4 y 8, por lo que se ajustó la curva de granulometría y se eliminó el agregado mayor a la malla 16 y solo se empleó el agregado que se retiene en la malla número 30, 50, 100 y 200.

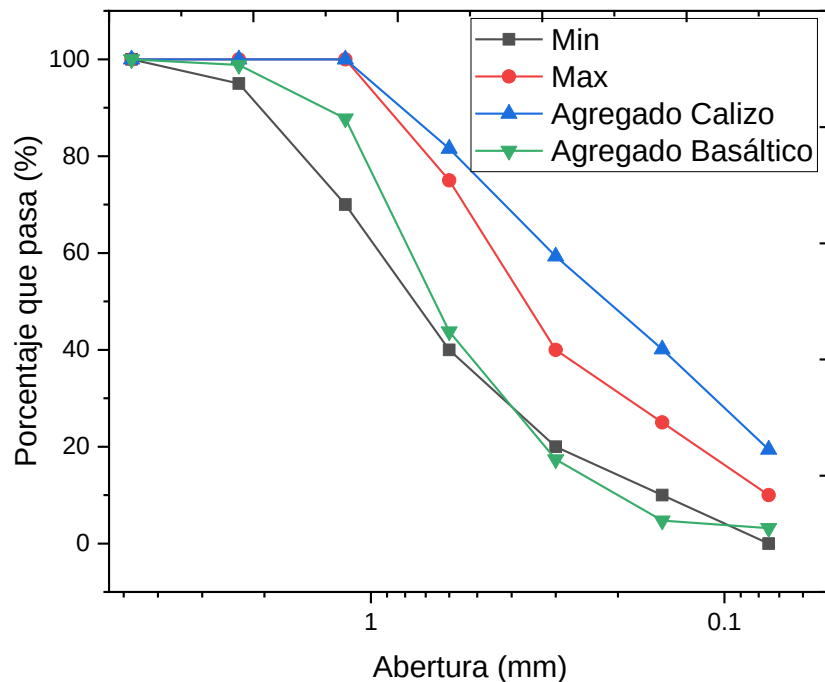


Figura 21. Granulometría de agregado calizo y basáltico.

La gráfica de la Figura 22, presenta el diseño de granulometría ajustado, para ambos tipos de agregado, el cual si cumple con los rangos mínimos y máximos establecidos en la norma. Es importante ajustar la gráfica, para asegurar la correcta distribución de los agregados y mejorar la trabajabilidad del mismo como indica la norma ASTM C-144.

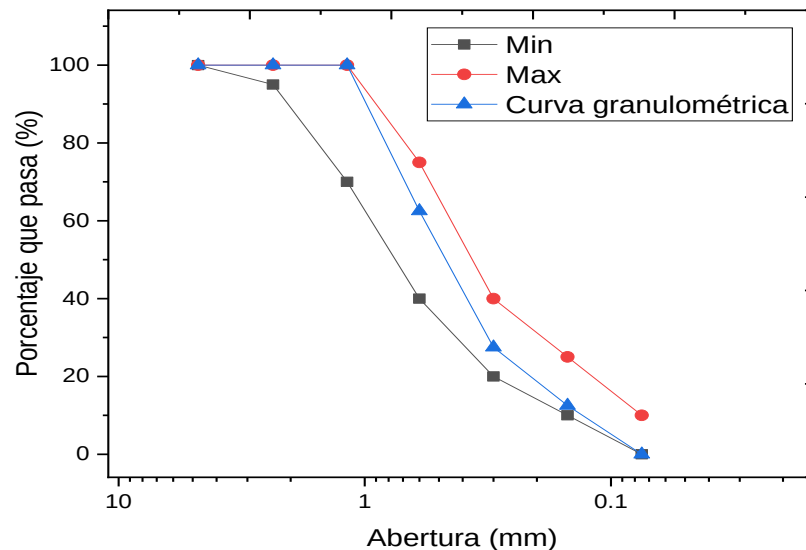


Figura 22. Granulometría ajustada de agregado calizo y basáltico.

Densidad relativa y absorción de agregados

Cada tipo de agregado fue dividido en dos grupos, como se presenta en la Tabla 8. En el primer grupo, la muestra está conformada por agregado que pasa la malla #16 hasta lo que se retiene en la malla #200 (1.18 mm a 0.075 mm), el segundo grupo corresponde al agregado que pasa la malla #16 y se retiene en la malla #30 (1.18 mm a 0.6 mm). Los resultados indicaron que tanto en el agregado calizo como en el agregado basáltico en el rango de tamaño de 1.18 mm a 0.6 mm presentaron mayor absorción. Los valores indican que retenidos en la malla #16 a #30 del segundo grupo, los valores de absorción fueron mayores con respecto al primer grupo de 1.18 mm a 0.075 mm, esto se atribuye principalmente a que la técnica empleada consiste en lograr la condición saturado superficialmente seco (SSS), donde la superficie del agregado es secada, considerando dentro del cálculo únicamente el contenido de agua al interior de los poros del agregado. En cuanto a la densidad relativa (SSS), el agregado basáltico presentó la más baja de 2.51 con respecto del agregado calizo de 2.60, ambas en el agregado de tamaño (1.18-0.6 mm), lo que indica un valor de absorción mayor para ambos casos. Por otro lado, la

diferencia fue mayor en el agregado basáltico infiriendo que el agregado es más poroso y lo cual fue corroborado con su valor de absorción mayor. Los valores de densidad y absorción en los agregados fueron similares a los reportados en la literatura [20], [21], [64].

Se recomienda el uso de agregados ligeros de baja densidad, ya que esta característica está estrechamente relacionada con un mayor grado de porosidad. La mayor porosidad no solo proporciona un volumen de poros más grande para alojar y confinar los PCM dentro de la estructura del agregado, sino que también ayuda a reducir la conductividad térmica del agregado debido a la presencia de aire atrapado en los poros. Como el aire tiene una conductividad térmica muy baja, mejora el rendimiento del material como aislante térmico [65], [66].

Tabla 8. Valores de Densidad y absorción.

Tipo de agregado	Agregado Calizo 1.18 mm a 0.075 mm	Agregado Basáltico 1.18 mm a 0.075 mm	Agregado Calizo 1.18 mm a 0.6 mm	agregado Basáltico 1.18 mm a 0.6 mm
Densidad relativa (S)	2.55	2.47	2.51	2.39
Densidad relativa (SSS)	2.64	2.56	2.60	2.51
Densidad relativa aparente	2.79	2.72	2.77	2.72
Absorción (%)	3.31	3.74	3.73	5.04

Microscopia óptica

En cuanto al análisis por MO antes y después del proceso de impregnación en ambos tipos de agregados, se observaron cambios en la superficie y aglomeración, como se observa en la imagen de la Figura 23, se muestran las ocho muestras analizadas, las diferencias en las muestras fueron el cambio en la granulometría debido al aglomeramiento de 2 a 4 granos lo que incrementan el tamaño y el contenido de CC, quedando con la nomenclatura indicada en la Tabla 9.

Tabla 9. Nomenclatura de muestras.

Nomenclatura	Descripción
--------------	-------------

<i>AC-1.18-0.075</i>	Agregado Calizo de 1.18 mm a 0.075 mm
<i>AC-1.18-0.6</i>	Agregado Calizo de 1.18 mm a 0.6 mm
<i>T1CCAC-01</i>	Agregado Calizo impregnado con Cloruro de Calcio Hexahidratado durante 30 min al vacío y de 1.18 mm a 0.075 mm
<i>T1CCAC-#30-1</i>	Agregado Calizo impregnado con Cloruro de Calcio Hexahidratado durante 30 min al vacío y de 1.18 mm a 0.6 mm
<i>AB-1.18-0.075</i>	Agregado Basáltico de 1.18 mm a 0.075 mm
<i>AB-1.18-0.6</i>	Agregado Basáltico de 1.18 mm a 0.6 mm
<i>T1CCAB-01</i>	Agregado Basáltico impregnado con Cloruro de Calcio Hexahidratado durante 30 min al vacío y de 1.18 mm a 0.075 mm
<i>T1CCAB-#30-1</i>	Agregado Basáltico impregnado con Cloruro de Calcio Hexahidratado durante 30 min al vacío y de 1.18 mm a 0.6 mm

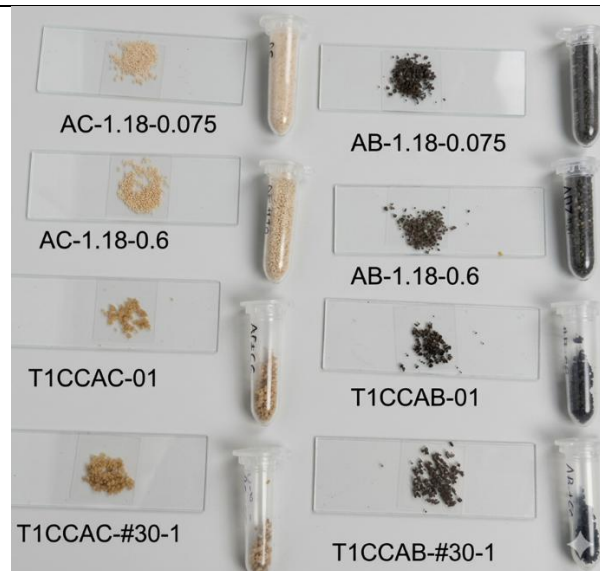


Figura 23. Muestras de ambos tipos de agregado con y sin cloruro de calcio Hexahidratado.

Como se estableció anteriormente, cada tipo de agregado, calizo y basáltico, fue dividido en dos rangos diferentes de tamaño, uno con la granulometría completa (0.075 a 1.18 mm) y el otro de 0.6 a 1.18 mm. Las 4 muestras diferentes, fueron analizadas por microscopia óptica a 4X de magnificación antes y después del proceso de impregnación y los resultados se presentan en la Figura 24. Al utilizar la granulometría completa (Fig. 24a), en el agregado calizo, se observó una gran acumulación de granos finos sobre la superficie de los de mayor tamaño, esta tendencia afecta posteriormente en el proceso

de impregnación ya que se generan aglomeraciones del material debido a que parte del contenido de la sal queda suspendida en la superficie del agregado más fino (Fig. 24b). En cuanto al agregado calizo utilizado con la granulometría controlada (0.6 a 1.18 mm) (Fig. 24c) se tiene una mayor dispersión, lo cual se ve reflejado después del proceso de impregnación ya que no se generaron aglomeraciones (Fig. 24d). En el caso del agregado basáltico, al utilizar la granulometría completa, se observó que después del proceso de impregnación parte de las sales quedó adherida sobre el agregado de menor tamaño y se formaron aglomeraciones en la superficie de los granos de mayor tamaño (Fig. 24e, f). En el agregado basáltico con granulometría controlada (Fig. 24g, h), se observó una mayor dispersión y menor cantidad de sales en la superficie de los granos.

El objetivo de esta prueba fue establecer un parámetro de control para evitar problemas de aglomeración que afectarían al posterior proceso de impregnación y al posterior proceso de encapsulación, al generar cúmulos de granos con exceso de espacios vacíos en su interior, un problema que afecta la resistencia mecánica al emplear material de este tipo en la elaboración de morteros de recubrimiento.

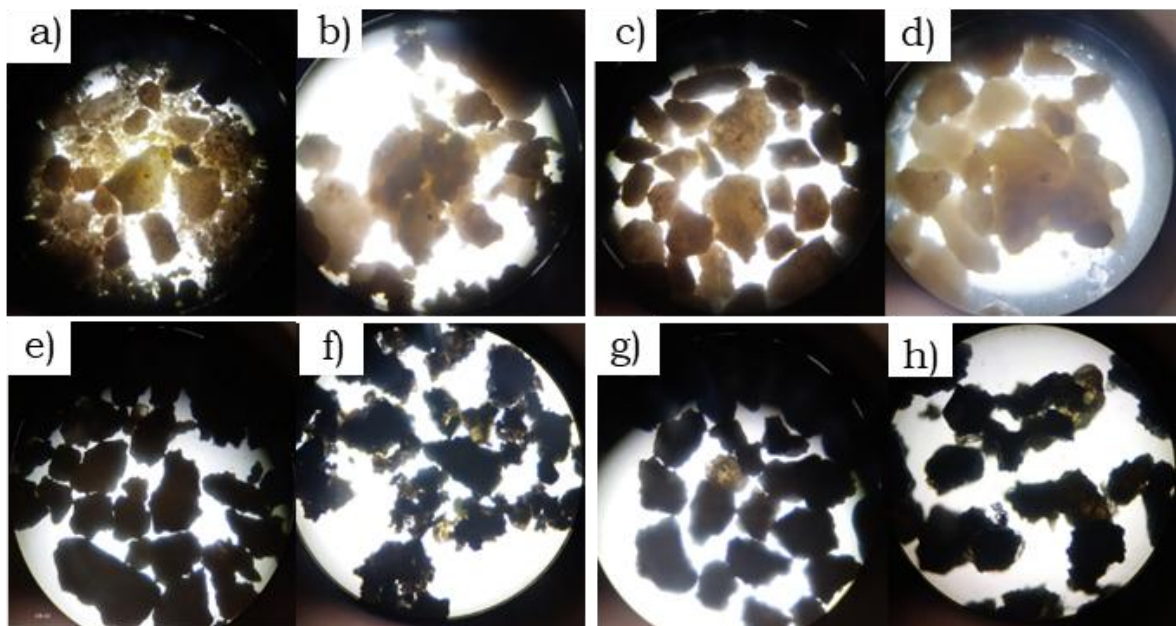


Figura 24. Fotografías en el microscopio óptico a 4X: a) AC-1.18-0.075, b) AC-1.18-0.6, c) T1CCAC, d) T1CCAC-#30, e) AB-1.18-0.075, f) AB-1.18-0.6, g) T1CCAB y h) T1CCAB-#30.

Microscopía Electrónica de Barrido-EDS

Los resultados del ensayo realizado por MEB-EDS del agregado calizo y basáltico se presentan en la Figura 25. La Figura 25a, presenta una micrografía a una magnificación de 1200X, se observa la microestructura del agregado, claramente se observa una superficie irregular y de textura rugosa; las características presentadas por este material son propias del tipo de agregado calizo ya han sido reportadas en la literatura [21], [67]. Adicionalmente, en la gráfica de la Figura, se observa el patrón obtenido por EDS, el cual indica los contenidos de Magnesio (Mg), Calcio (Ca) y carbón (C), los cuales son los principales componentes del agregado calizo que corresponden a la región sureste del país, llamada Dolomita por su alto contenido de Mg. En el inserto de la gráfica se presenta la gráfica de contenido elemental. Adicionalmente, se observa bajos contenidos de Silicio (Si) el cual no es parte de la composición del agregado calizo lo que se atribuye a contaminación por el agregado basáltico [67]–[71]. Los picos de Oro (Au) que se encuentran presentes, corresponden al recubrimiento de oro en las muestras como parte de su preparación para el análisis. En la Figura 25 b, se presenta la micrografía del agregado basáltico, se observa una superficie menos irregular y de textura rugosa, adicionalmente, se observó mayor contenido de grietas en la superficie que se atribuye a la piedra natural, de mayor dureza y quebradiza [72]. El inserto de la Figura 25b, se puede observar, que indica altos contenidos de dióxido de silicio (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y otros elementos como el magnesio (Mg) y óxido de calcio (CaO) que coincide con la literatura) [64], [73]–[76].

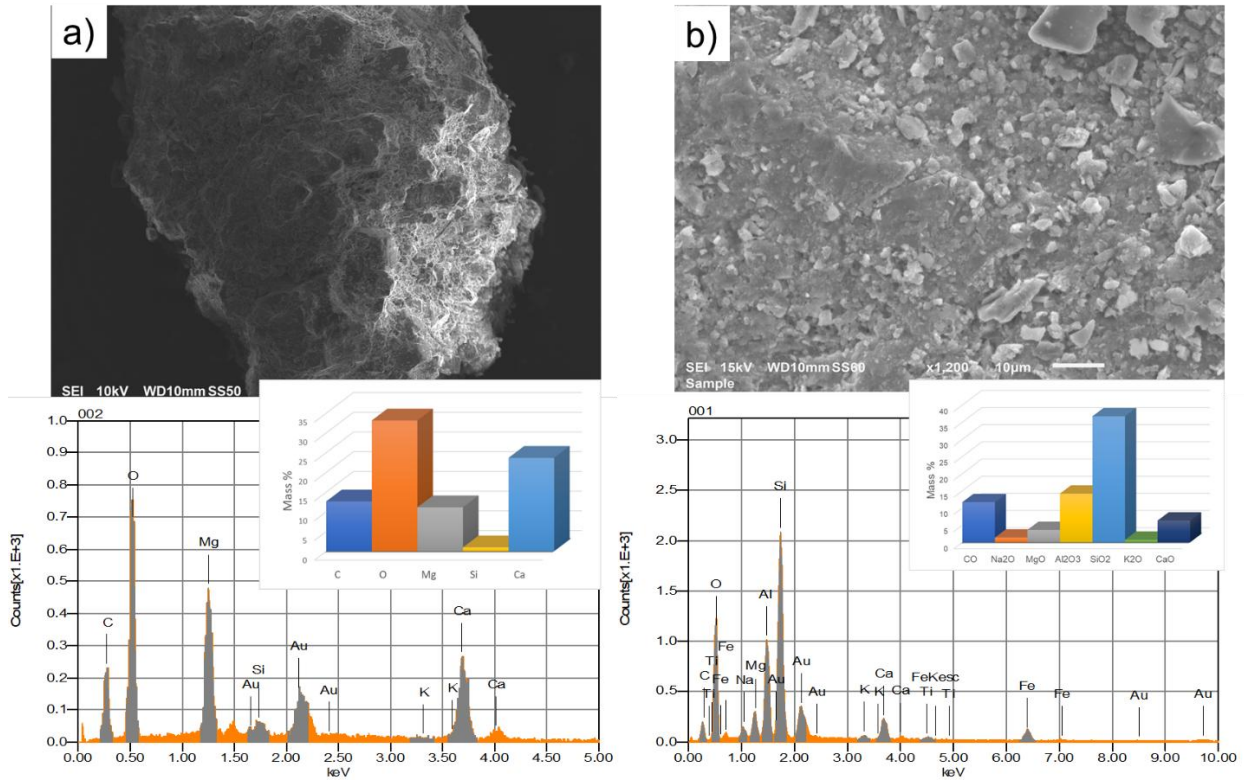


Figura 25. MEB-EDS de los agregados. a) agregado calizo, b) agregado basáltico.

El uso de materiales ligeros como sustratos de soporte con características de superficie adecuadas, densidad y capacidad de absorción, ayuda a minimizar la fuga del PCM mientras mejora la conductividad térmica del sistema compuesto [74]. Las interacciones entre el PCM y el sustrato de soporte están principalmente gobernadas por fuerzas capilares y tensión superficial. Dependiendo de la naturaleza química de ambos materiales, los enlaces de hidrogeno y las fuerzas de Van Der Waals también pueden contribuir a la retención del PCM. LA acción sinérgica de estos mecanismos fisicoquímicos favorece el confinamiento del PCM dentro de la estructura porosa del soporte, previniendo eficazmente las fugas durante los procesos de fusión y solidificación [75].

Difracción de Rayos X (DRX)

Para determinar la fase mineralógica de ambos tipos de agregado, se realizó el análisis de Difracción de Rayos X (DRX) en cada uno. La Figura 26, presenta el patrón de difracción de rayos X del agregado calizo, la indización de los picos de difracción en las

distancias 2θ de 30.938, 41.127 y 51.068 corresponden a la fase principal de Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) lo que se correlaciona con el análisis elemental por EDS (No. de TARJETA PDF#36-0426).

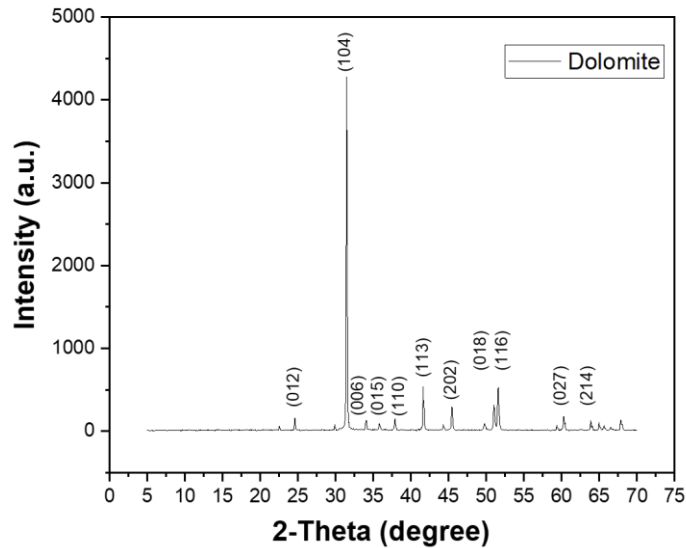


Figura 26. Patrón de Difracción de Rayos X (DRX) de polvo calizo.

La Figura 27, presenta el patrón de DRX del polvo basáltico, que muestra los picos característicos de las principales fases del agregado basáltico, el patrón presenta picos que corresponden a las fases de Albita y Anortita de acuerdo a la tarjeta No. PDF#19-1184 y PDF#18-1202. Puede observarse un grado de amorficidad que corresponden a su composición.

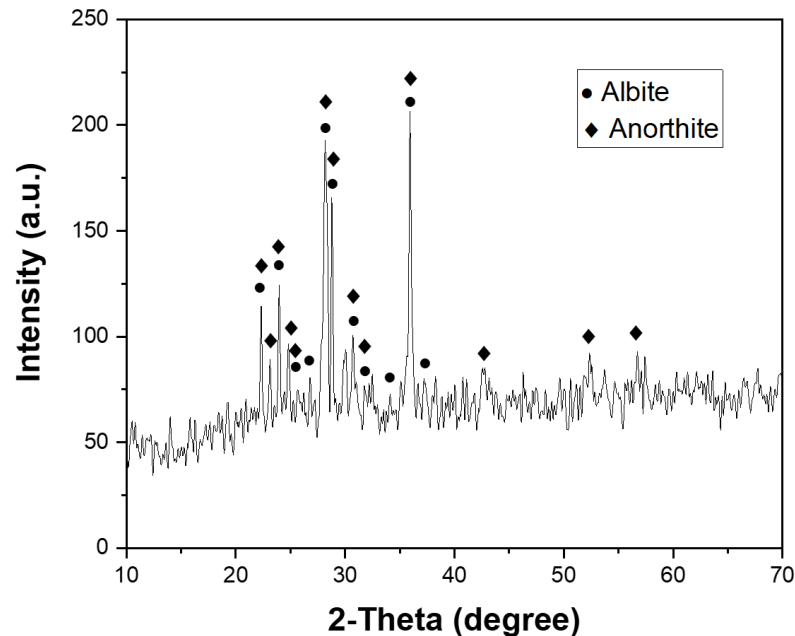


Figura 27. Patrón de difracción de rayos X de polvo basáltico.

Parámetros de impregnación CC

En cuanto a los parámetros de impregnación para sal CC, en la Tabla 10, se presentan los porcentajes de retención en el agregado calizo, se variaron las condiciones establecidas en el diseño experimental. El primer parámetro fue determinar el tiempo de impregnación al vacío evaluando en 30, 60 y 90 min. Se observó una dispersión considerable en los resultados. Indiferente del tiempo dentro de la cámara, el factor que influenció la retención de la sal fue el método de secado y tiempo de secado, el cual es posterior al proceso de impregnación, por lo que se compararon los resultados del proceso de secado estableciendo un tiempo de 5 minutos al vacío y empleando un embudo de buchner equipado con un papel filtro. Una vez establecido los parámetros óptimos de secado, se realizó la impregnación variando los tiempos dentro de la cámara de vacío, estableciendo un tiempo de 30 min como el óptimo, debido al menor consumo de energía ya que los resultados de retención fueron similares dejando más tiempo dentro de la cámara; al establecer el tiempo de la cámara en 30 min y un secado al vacío de 5 minutos se obtuvieron valores constantes mayores al 16% de retención de CC en el agregado calizo.

Basado en los resultados anteriores se fijó el mismo método de secado y se analizó el proceso de impregnación en el agregado basáltico con CC, variando el tiempo dentro de la cámara de vacío. Los resultados indicaron que el tiempo óptimo dentro de la cámara igualmente fue de 30 min para el agregado basáltico. Sin embargo, se obtuvo mayor retención de sal CC en el agregado basáltico con respecto del calizo (mayor al 20%), lo que se corrobora con los resultados obtenidos de densidad y porcentaje de absorción ya que agregado basáltico presento una menor densidad y mayor porcentaje de absorción que el agregado calizo.

Tabla 10. Parámetros de impregnación

Clave	Tipo agregado	t al vacío (min)	t infiltrado (min)	Peso parcial agregado + tara + CC (g)	CC retenido (g)	% de retención
T1CCAC-1	AC	30	1440	68.3	6.4	12.8%
T1CCAC-2	AC	30	10	72.2	11.4	22.8%
T1CCAC-3	AC	30	10	73.7	12.9	25.8%
T2CCAC-1	AC	60	10	79.7	18.9	37.8%
T2CCAC-2	AC	60	10	78.4	17.6	35.2%
T3CCAC-1	AC	90	10	76.0	15.2	30.4%
T3CCAC-2	AC	90	10	81.2	20.4	40.8%
T3CCAC-3	AC	90	10	72.3	11.5	23.0%
T1CCAC-01	AC	30	5	68.8	8.0	16.0%
T1CCAC-02	AC	30	5	68.8	8.0	16.0%
T2CCAC-01	AC	60	5	68.8	8.4	16.8%
T2CCAC-02	AC	60	5	68.9	8.5	17.0%
T3CCAC-01	AC	90	5	69.0	8.6	17.2%
T1CCAC-01-#30	AC	30	5	66.1	5.3	10.6%
T1CCAB-01	AB	30	5	69.8	9.4	18.8%
T1CCAB-02	AB	30	5	69.7	9.3	18.6%
T2CCAB-01	AB	60	5	70.2	9.3	18.6%
T1CCAB-01-#30	AB	30	5	69.2	8.7	17.4%

Parámetros de impregnación SS

En cuanto a los parámetros de impregnación de la sal SS, en la Tabla 11, se presentan los resultados obtenidos en ambos tipos de agregado AC y AB. Se observó que los porcentajes de retención con respecto al tiempo de impregnación de 30 min fueron

considerablemente cercanos al 22%, por lo que se evaluó a un tiempo de 15 min en lugar de 90 min con el objetivo de optimizar el tiempo y ahorro de energía. Los resultados obtenidos a 1 min de impregnación no representaron un incremento considerable de retención con respecto a los 30 min, incluso en el caso de agregado basáltico se presentó una menor retención de 2%, por lo tanto, para homogenizar el proceso se determinó el tiempo de 30 min como el óptimo.

Finalmente, del análisis realizado se concluye que la sal SS no solo se alojó en el interior de los poros del agregado, sino que también se adhirió en la superficie de los granos, lo que permitió una mayor retención en cada tipo de agregado, alcanzando valores por encima del 20%, lo que indica incrementos mayores al 8% con respecto al CC.

Tabla 11. Parámetros de impregnación

Clave	Tipo agregado	t al vacío (min)	t infiltrado (min)	Peso parcial agregado + tara + CC (g)	SS retenido (g)	% de retención
T0SSAC-#30-1	AC	15	5	73.24	12.05	24.1%
T1SSAC-#30-1	AC	30	5	73.89	12.38	24.8%
T1SSAC-#30-2	AC	30	5	73.07	11.96	23.9%
T2SSAC-#30-1	AC	60	5	72.47	11.21	22.4%
T2SSAC-#30-2	AC	60	5	73.14	11.79	23.6%
T0SSAB-#30-1	AB	15	5	72.61	11.53	23.1%
T1SSAB-#30-1	AB	30	5	74.60	13.41	26.8%
T1SSAB-#30-2	AB	30	5	74.34	13.17	26.3%

La impregnación al vacío se ha identificado como una técnica prometedora por que facilita la penetración de los PCMs en la estructura porosa del sustrato que los soporta, promoviendo un confinamiento eficaz de los PCMs y reduciendo significativamente el riesgo de fugas durante su uso. Según la literatura, el material de soporte debe secarse antes del proceso de impregnación para eliminar la humedad y aumentar el volumen de poros disponible, lo que mejora tanto la eficiencia de la impregnación como la retención de los PCMs [66].

Encapsulación con resina de poliéster (RP)

El proceso de encapsulación se realizó con la resina de poliéster *RP* y se presenta en la Figura 28. En las pruebas piloto de encapsulación con *RP*, la relación de 10 g de resina PP-250 con 0.3 g de Butanox dio el tiempo adecuado para realizar el proceso completo de encapsulación, al incrementar la cantidad del catalizador, el proceso de endurecimiento de la resina fue más rápido y no permitió la manipulación de la misma. Se evaluaron diferentes cantidades de agregados para la mezcla con la resina y se estableció la relación óptima para generar una película uniforme de 70 g de agregado con 10 g de resina y 0.3 g de catalizador.

En la etapa de encapsulación de agregado impregnado con *CC*, fue necesario realizar un ajuste en la cantidad de agregado para encapsular, se infiere que debido a que al presentar pequeñas aglomeraciones se redujo la superficie a recubrir, por lo tanto, se generó un exceso de resina que genera grumos, por lo tanto, se incrementó en 10 gr la cantidad de agregado a encapsular, para asegurar una capa uniforme de *RP*.

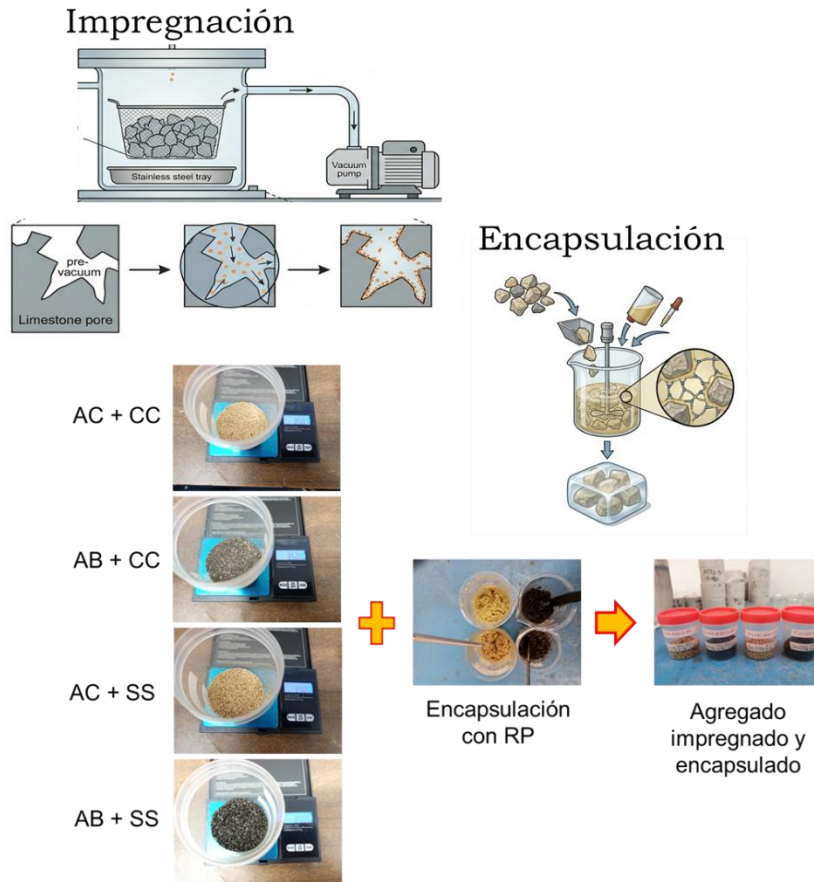


Figura 28. Proceso de encapsulación con RP de AC y AB impregnado con sales.

Parámetros de encapsulación

Como parte del proceso de caracterización del agregado impregnado y encapsulado se empleó un microscopio estereoscópico binocular marca Velab modelo VE-S7, con el cual se pudo observar los cambios en la superficie del agregado, evaluar la homogeneidad de del recubrimiento, cambios en la distribución de tamaño de partícula en la mezcla y distribución del agregado antes y después del proceso de encapsulación.

Se evaluó el encapsulamiento con las dos resinas, el primero con *PMMA* y el segundo con *RP*, en ambos casos se caracterizó el recubrimiento en las siguientes condiciones:

- los agregados sin impregnación AC y AB, el ensayo realizado bajo estas condiciones fue decisivo para la posterior encapsulación de los agregados impregnados.
- AC impregnado con CC y SS,

- AB impregnado con CC y SS.

En la imagen de la Figura 29 se observa el AC antes de ser encapsulado (Fig. 29a) y después del proceso de encapsulación con *PMMA* (Fig. 29b) y *RP* (Fig. 29c). Para el caso de la película formada por *PMMA*, se observó un cambio en la distribución de tamaño de partícula en la mezcla, se incrementó la cantidad de finos menor a 0.6 mm atribuido a que la mezcla de *PMMA* no polimerizó por completo y después del proceso de secado se fragmentó en partículas de menor tamaño; durante el proceso de mezclado si se obtuvo una mezcla líquida con la consistencia adecuada para recubrir el agregado, sin embargo, al finalizar el proceso de secado la polimerización no formó la película homogénea y se fragmentó.

Por otro lado, con el encapsulamiento mediante *RP* se obtuvo una consistencia y tiempo de secado adecuados para la mezcla; durante el secado fue necesario mantenerlo en constante movimiento; se obtuvo una película sobre el agregado con pequeñas aglomeraciones de hasta 3 granos de arena, sin embargo, se mantiene dentro del rango de tamaño de acuerdo a la norma para ser empleado en morteros de recubrimiento. Adicionalmente, se observó un cambio en el color y morfología en la superficie del agregado derivado de la naturaleza de la resina, un tono color verde brillante y una superficie menos porosa. Por lo que, derivado de los resultados observados de distribución, formación de la película, tiempo de secado, cambios en la superficie para la elaboración del encapsulado, la *RP* presentó mejor distribución, menor aglomeramiento, y un tiempo de secado que permite la manipulación de la mezcla. Estos resultados preliminares se adecuan a los objetivos esperados de una película resistente, que permita el cambio de fase en el interior de la misma y evite la pérdida de PCMs a través de los poros del agregado.

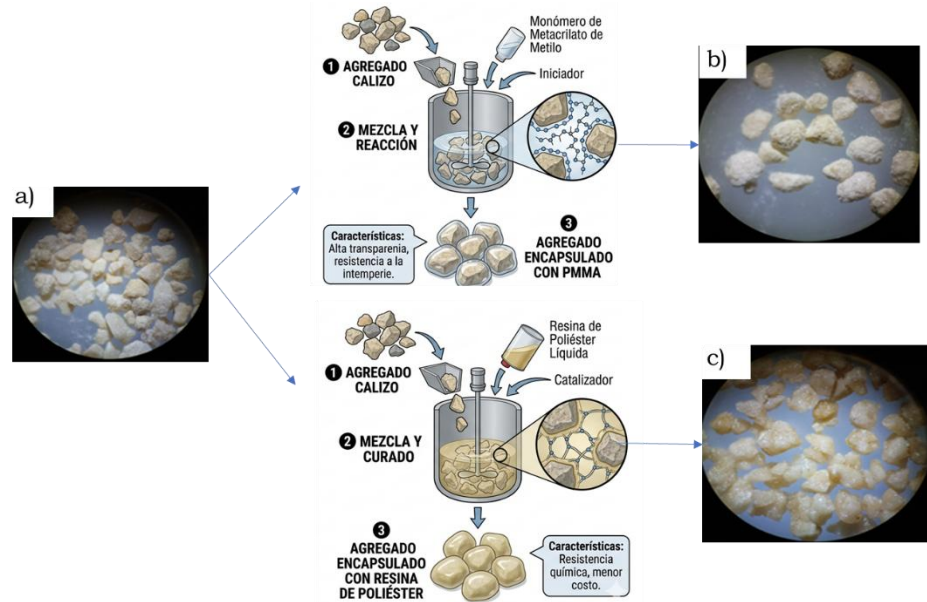


Figura 29. Encapsulación de Agregado calizo. a) natural (AC), b) recubierto con resina (AC + PMMA) y c) recubierto con resina (AC + RP)

Una vez definidos los parámetros de encapsulación, se realizó el encapsulado en ambos tipos de agregado previamente impregnados con las sales de CC y SS. En la Figura 30 se observa por fotografía digital de los agregados, se observan los cambios de coloración, distribución y tamaño de partícula del AC y AB a medida que fueron pasando por el proceso de impregnación y posteriormente al proceso de encapsulación mediante RP.

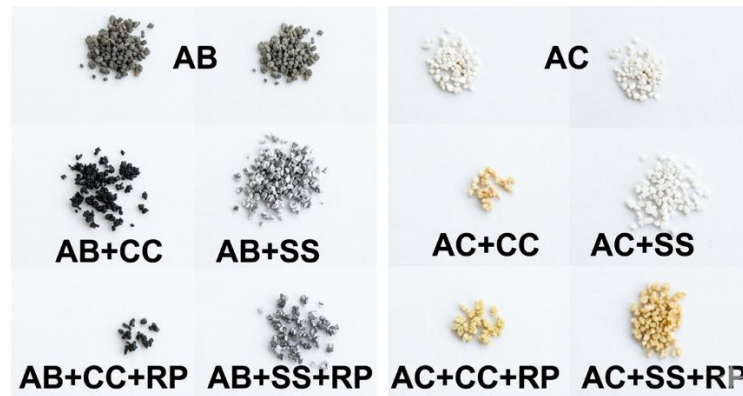


Figura 30. Cambios en la superficie del agregado impregnado con las diferentes sales.

En la Fig. 31a se muestra una imagen del agregado calizo y en la Fig. 31b el agregado basáltico, ambos impregnados con la sal SS. Se observaron pequeñas partículas de SS aglomeradas con tamaños menores de 0.6 mm, sueltas y también adheridas en la

superficie del agregado, atribuido al cambio de fase incongruente del PCM, donde la sal que se mantiene en un estado semisólido no puede filtrarse en la porosidad del agregado por las limitaciones de tamaño, se observó aglomeraciones de 3 a 4 granos de agregado, la película es altamente importante para evitar la pérdida de PCMs [77] .

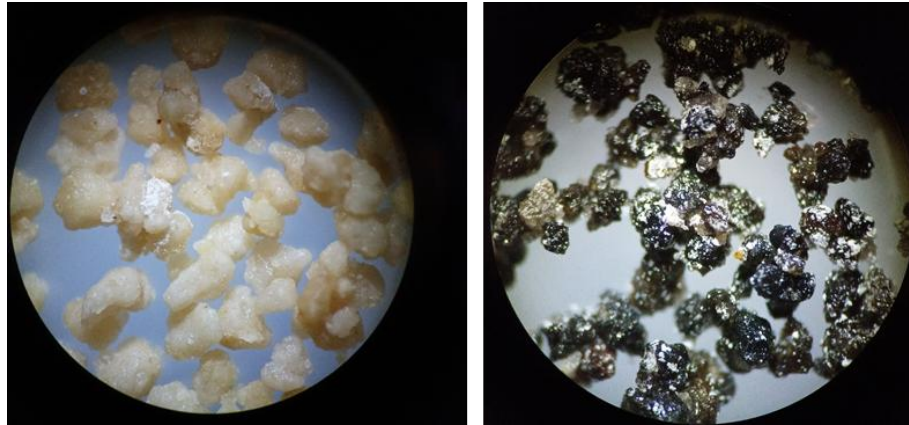


Figura 31. RP sobre AC y AB con SS.

Las muestras de agregados AC y AB impregnados con la sal SS y encapsulados se presentan en la Figura 32. Se observa los cambios en la superficie de ambos tipos de agregado, el color típico de la resina y su cambio en la textura, el recubrimiento de resina reduce la porosidad superficial del agregado [78], se presentan aglomeraciones de más de 4 granos indicando un exceso de resina, por lo que se incrementó la cantidad de agregado en la mezcla durante el proceso de encapsulación, para lograr una película más homogénea y reducir el exceso de RP.

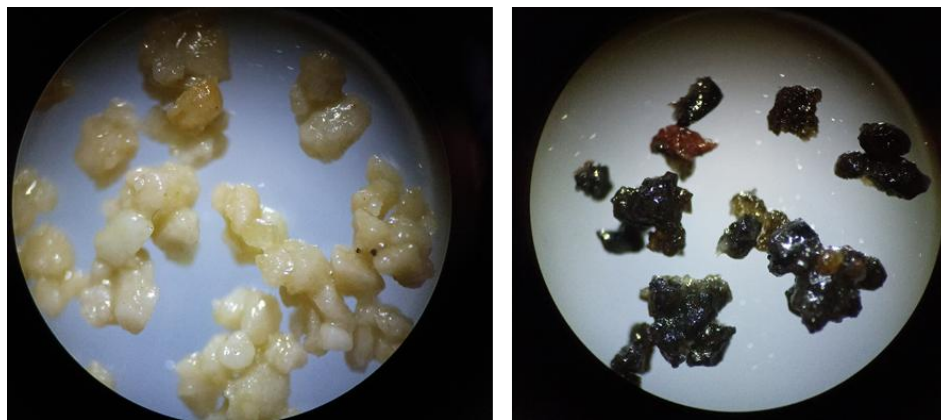


Figura 32. RP sobre AC y AB con CC.

Densidad de morteros modificados

En cuanto a la densidad de los morteros, se tiene un efecto directo en la conductividad térmica debido a la relación entre el sólido y la cantidad de aire o espacios vacíos. En la gráfica de la Figura 35, se presentan los resultados de la densidad obtenidos de las muestras de mortero elaborados con los dos tipos de agregados, impregnados y encapsulados, así como los morteros de referencia. Es evidente que existe una disminución significativa en la densidad de los morteros impregnados con PCM's con respecto de las muestras sin PCM. El incremento del porcentaje de masa y reducción de la densidad se infiere por la menor densidad del PCM y del polímero, comparativamente con la del agregado empleado [79] y la reducción del área superficial, derivado del espesor del encapsulado sobre el agregado.

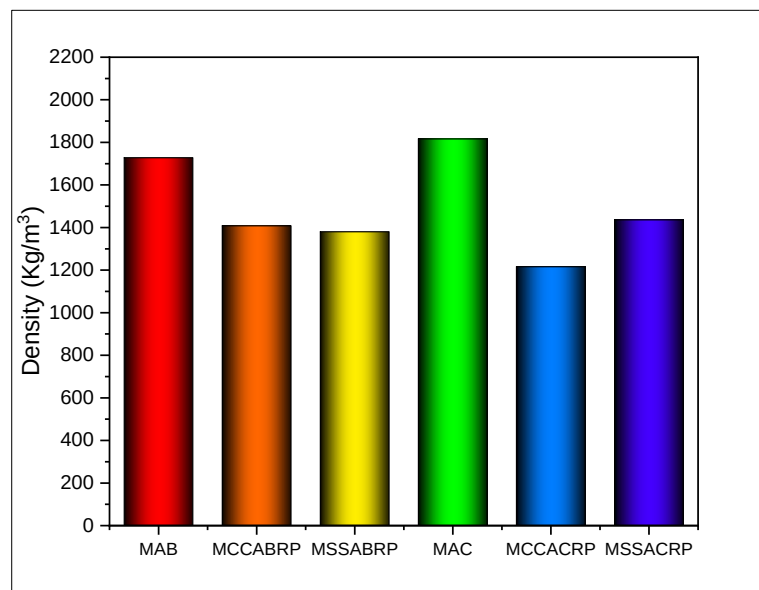


Figura 33. Densidad de morteros.

La disminución en la densidad de los morteros modificados con PCMs se debe principalmente a una menor compactación de la mezcla, al debilitamiento de la zona de transición interfacial (ITZ) entre la pasta de cemento y los agregados impregnados y a una distribución poco uniforme del PCM dentro de la estructura del cemento. Estas condiciones incrementan la porosidad y propician la aparición de defectos

microestructurales, lo que termina reduciendo tanto la densidad como la resistencia a la compresión de los morteros. Este comportamiento físico-mecánico ha sido ampliamente documentado en la literatura [80], [81].

Conductividad térmica de morteros modificados

Se evaluó la conductividad térmica de los cubos de mortero elaborados con los agregados impregnados y encapsulados. En cuanto al agregado calizo se presentan los resultados sin impregnación (MAC) e impregnados con los diferentes PCM's (MCCACRP) y (MSSACRP), los cuales fueron evaluados a tres diferentes temperaturas: 1) 294°K, 2) 299°K y 3) 309°K. La Figura 34, presenta la gráfica comparativa de los valores promedio de conductividad térmica obtenidos.

Los morteros con el PCM (CC) presentó una reducción en la conductividad térmica del 77% con respecto a la muestra sin PCM (MAC), mientras que las muestras con el PCM SS, presentaron una reducción del 64%. La reducción de la conductividad le permite al material disminuir el flujo del calor a través del mismo, por lo que la implementación de PCM en la matriz cementante contribuye de manera significativa a reducir la conductividad térmica. Al incrementar la temperatura en el mortero sin PCM, se presentó un incremento en los valores de conductividad, sin embargo, en el caso de los morteros con PCM, el valor de conductividad se mantuvo constante atribuido al calor latente de fusión, los PCM's absorben la energía calorífica que es consumida para el proceso de cambio de fase evitando el incremento de temperatura [82]. Se infiere que los cubos de MCCACRP presentaron la menor conductividad térmica, debido a la baja conductividad térmica de la sal CC.

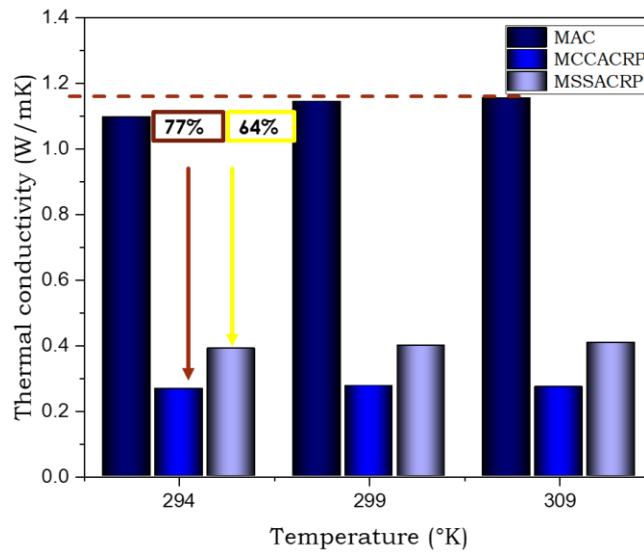


Figura 34. Conductividad en morteros de agregado calizo con y sin PCMs a diferente temperatura.

La Figura 35, presenta la comparativa de la conductividad térmica de *MCCACRP* y *MSSACRP* sometido a diferentes temperaturas. En los PCM's, la conductividad térmica no varía significativamente entre las fases sólidas y líquidas, en la fase sólida, los materiales suelen tener una estructura más organizada lo que mejora la transferencia de calor, por otro lado, en la fase líquida las moléculas tienen más libertad y la conductividad es menos eficiente. En el caso de *MSSACRP*, presentó un comportamiento proporcional, a medida que la temperatura incrementó, la conductividad también, pero en el caso del *MCCACRP*, al pasar por la temperatura de cambio de fase, la conductividad disminuyó, esta diferencia se atribuye a la temperatura de cambio de fase de la SS que es mayor a la de la CC.

Al encapsular las partículas de agregado impregnado, se forman cavidades internas que elevan la resistencia térmica y frenan la transferencia de calor en el mortero. A diferencia de este comportamiento, el mortero patrón no presentó variaciones significativas en su conductividad térmica frente a los cambios de temperatura.

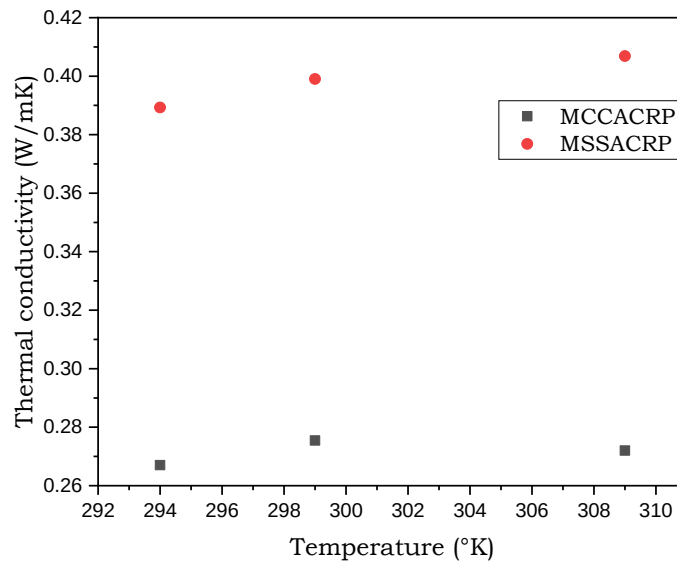


Figura 35. Conductividad en agregado calizo a diferente temperatura.

Los valores promedio de conductividad térmica del mortero cementante elaborado con agregado basáltico (*MAB*) e impregnado con los diferentes PCM's (*MCCABRP*) y (*MSSABRP*) se presentan en la gráfica de la Figura 36. La impregnación del agregado con PCM redujo un 48% la conductividad del *MCCABRP* y el 53% en *MSSABRP* [38]. En ambos casos las sales empleadas tienen una conductividad significativamente menor lo que reduce la conductividad del mortero como un todo, donde la conductividad de cada uno de los elementos contribuye a la conductividad acumulada del mortero, por otro lado, la reducción de la conductividad se atribuye al proceso de encapsulación, debido a que durante el mismo quedan espacios vacíos dentro del agregado impregnado y encapsulado, contribuyendo a reducir la velocidad del flujo de calor a través del mortero.

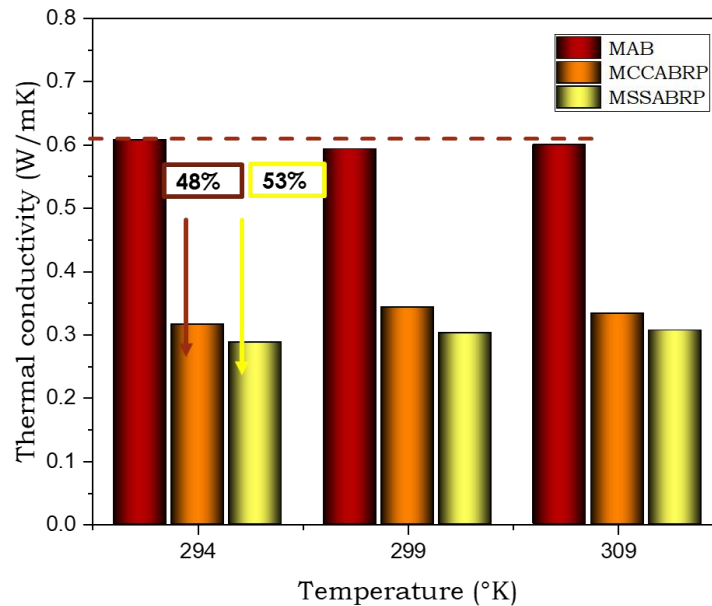


Figura 36. Comparativa de conductividad de mortero de agregado basáltico con y sin PCMs a diferente temperatura.

La Figura 37, presenta la comparativa de la conductividad térmica de *MCCABRP* y *MSSABRP* sometido a diferentes temperaturas, en ambos casos se observó, durante la temperatura de cambio de fase, a medida que la temperatura incrementa, la conductividad igual, sin embargo, al sobrepasar ese límite, la conductividad en ambas muestras disminuye. Durante la transición de cambio de fase, la cantidad de energía absorbida o liberada influye en la velocidad de la transferencia de calor lo cual genera pequeños picos o variaciones en la conductividad térmica. El agredo basáltico es considerado un agregado ligero y dependiendo de su origen varía su porosidad, en los resultados previos, el agregado basáltico presentó una estructura porosa y una densidad relativa (*S*) de 2.39 menor que la del AC de 2.51, lo cual contribuye a presentar la diferencia en conductividad con 45% menor a la del AC [21]. A diferencia de los morteros de *MAC*, los morteros de *MAB* mantienen una conductividad constante al incrementar la temperatura en el mortero.

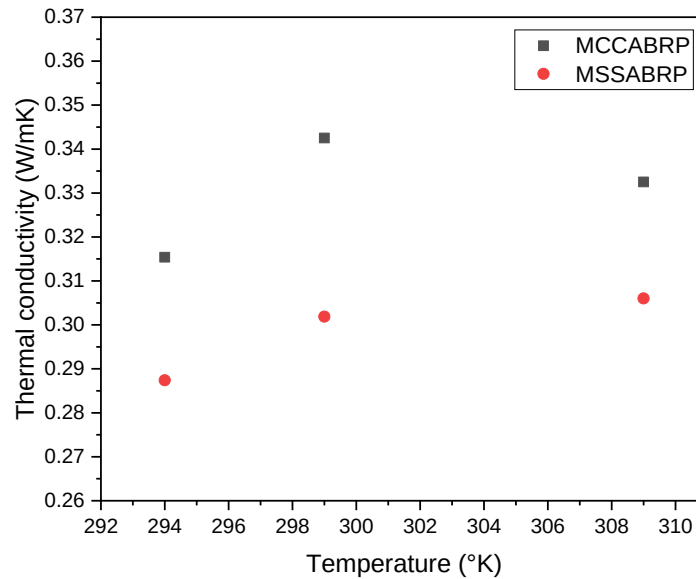


Figura 37. Conductividad térmica en agregado basáltico a diferente temperatura.

A diferencia de los morteros *MAC*, el *MCCACRP* presentó la menor conductividad térmica. En el caso de los morteros de *MAB*, el *MSSABRP* presentó menor conductividad, debido al mayor porcentaje de retención de *SS* en el *AB* con respecto del *CC*. La reducción significativa de la conductividad térmica observada en los morteros modificados implica una disminución directa del flujo de calor a través del mortero, posible resultado de la naturaleza multifase del sistema, los morteros desarrollados se pueden considerar un medio compuesto, donde la conductividad efectiva depende de la contribución de la matriz cementante, el PCM, el agregado natural, los vacíos dentro de la matriz, de este modo se genera una menor velocidad de propagación de las perturbaciones térmicas.

Los resultados obtenidos evidencian que la capacidad de conductividad de los materiales depende de manera intrínseca de su microestructura. Específicamente, factores como las variaciones en la porosidad, la composición química y la organización espacial de las fases que los integran ejercen un impacto determinante sobre sus propiedades de

transporte, incidiendo de forma directa en la conductividad tanto térmica como eléctrica [65]

Difusividad

La difusividad térmica es un parámetro fundamental para comprender los procesos de transferencia de calor en los materiales y predecir la velocidad con la que alcanzan el equilibrio térmico ante fluctuaciones de temperatura. Al integrar los efectos de la conductividad, la densidad, la propia difusividad y el calor específico, es posible determinar con precisión la tasa de respuesta térmica de un material. Por lo tanto, el diseño del mortero debe orientarse a optimizar esta difusividad, garantizando así una penetración de calor eficiente que permita una actividad óptima del PCM [65], [83].

Otro parámetro que fue influenciado por la impregnación de PCM's en los agregados del mortero es la difusividad, la cual disminuyó notablemente al igual que la conductividad térmica. En la gráfica de la Figura 38, se presenta el comportamiento en los morteros con agregado calizo e impregnados con las diferentes sales, indican la reducción en la difusividad [82], evidencia de que al adicionar agregado impregnado y encapsulado, se genera una mezcla heterogénea, reduce la velocidad del paso del calor a través de la matriz, debido a que en la trayectoria del flujo de calor, este tiene que pasar a través de granos encapsulados con aire en su interior, además de las sales que absorben parte del calor y reducen la cantidad disponible, de este modo se infiere a que parte de la reducción de la difusividad está relacionada a la reducción de la densidad del mortero, además de la energía que es absorbida durante el paso a través del mismo.

Cuando los agregados porosos son impregnados con sales, la microestructura cambia ya que parte de los poros del agregado quedan ocupados por cristales hidratados y se reduce el volumen de aire interno y además se incorpora una fase con alta capacidad de absorción de energía alterando tanto como el transporte como el almacenamiento térmico, por lo que se disminuye la resistencia térmica interna y mejora el contacto sólido-sólido/sólido-sal. La difusividad tiende a disminuir significativamente ya que la densidad efectiva disminuye por incorporación de sal, pero sobre todo aumenta de manera importante la capacidad calorífica aparente ya que cerca de la temperatura de transición de la sal, la sal absorbe calor para fundirse, almacena energía sin elevar rápidamente su

temperatura, esto significa que el material necesita más energía para experimentar el mismo incremento térmico. Por lo que el frente de calor avanza más lentamente dentro del mortero.

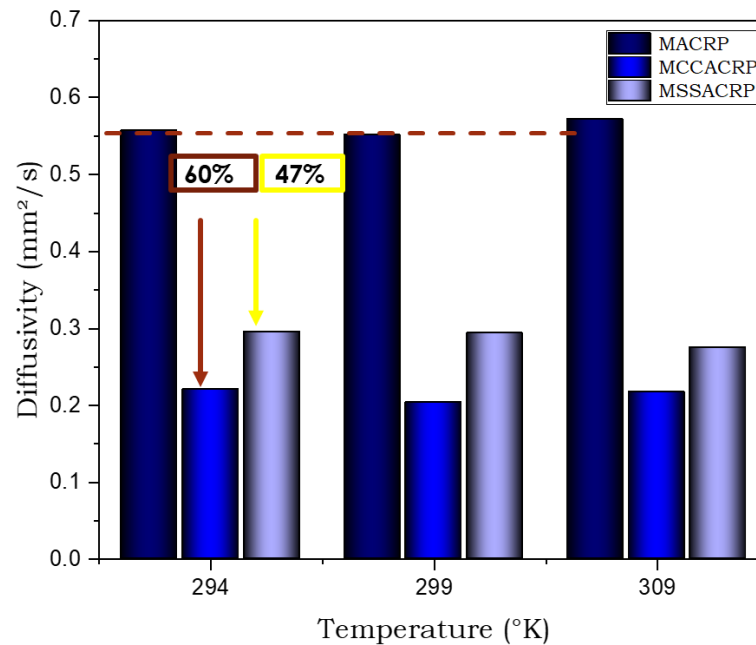


Figura 38. Difusividad en morteros a diferente temperatura.

La Figura 39, presenta los valores de difusividad de los morteros elaborados con agregado basáltico. Al igual que en el caso de la conductividad térmica, los valores de difusividad son menores que los morteros de MAC, también los morteros con PCM, presentaron menores valores de difusividad, la disminución de la velocidad en el flujo de calor a través del mortero, se relaciona con la conductividad del mismo, en medida que la conductividad baja también la velocidad del flujo de calor disminuye, ese comportamiento térmico es esperado en un material que mantenga el flujo lento y estable de temperatura. En conjunto, estos efectos generan un aumento en la resistencia térmica del mortero, lo que limita la transferencia de calor por conducción, por lo tanto, la reducción en la difusividad térmica indica una menor velocidad de propagación del calor, lo que contribuye a la mejora del desempeño térmico del mortero modificado como mortero de recubrimiento. En el mortero sin PCM's la temperatura superficial aumenta y

el calor atraviesa con relativa rapidez por lo que la cara opuesta comienza a calentarse pronto, mientras en el mortero impregnado con PCM's, inicialmente se absorbe parte del calor y la sal entra en transición de fase consumiendo la energía por lo que la elevación de temperatura interna se retrasa y el pico térmico en la cara opuesta aparece más tarde y con menor intensidad, es decir actúa como una barrera térmica dinámica o amortiguador térmico.

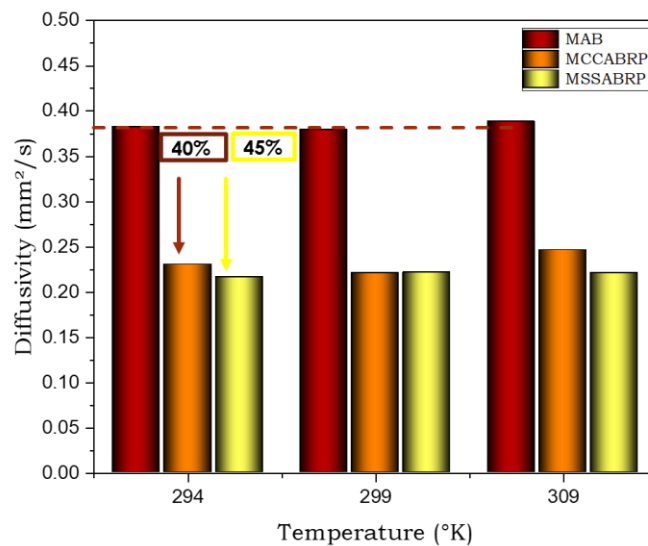


Figura 39. Difusividad de morteros a diferente temperatura.

Capacidad calorífica volumétrica

La capacidad calorífica volumétrica (C_v), se refiere a la cantidad de energía necesaria en forma de calor para provocar un aumento de una unidad de temperatura en el volumen de una sustancia y se expresa en $\text{MJ/m}^3 \cdot \text{K}$, mientras la C_v sea mayor, más tiempo se demora el material en encontrar el equilibrio térmico. Contrario a lo reportado en los diversos estudios, en la gráfica de la Figura 40, se observa que al impregnar con los PCM's, la capacidad calorífica volumétrica disminuye comparado con el mortero sin PCM, por lo tanto, se requiere de menor cantidad de energía para lograr un cambio en un grado en la temperatura interna de la matriz. La mayor reducción de capacidad calorífica volumétrica se presenta en la muestra *MCCACRP* con una reducción del 38%,

lo que indica que los cubos de *MCCACRP* alcanzan el equilibrio térmico más rápido que *MAC*. En los morteros sin PCM, la matriz está formada por la pasta cementante, los agregados y los poros con aire por lo que el almacenamiento térmico depende exclusivamente del calor sensible de estos componentes ya que no existe ninguna fase interna capaz de absorber calor sin modificar de inmediato su temperatura, por lo que la capacidad calorífica volumétrica es moderada y prácticamente constante en todo el intervalo de temperatura. Esto significa que el mortero puede almacenar cierta cantidad de calor gracias a su densidad relativamente alta, el calor específico del agregado y de la pasta de cemento, pero una vez que recibe energía térmica su temperatura aumenta de manera proporcional porque no hay un mecanismo adicional de amortiguamiento. En términos físicos se almacena calor, pero lo hace solo por elevación de temperatura del sólido. Cuando los agregados son impregnados con PCM's, teóricamente el sistema térmico cambia sustancialmente con alta capacidad de almacenamiento de calor latente y temperaturas de transición cercanas a 32–34 °C. La impregnación rellena parcial o totalmente los poros abiertos del agregado por lo que disminuye el volumen de aire interno, aumenta la masa sólida contenida por unidad de volumen teniendo como consecuencia que la densidad aparente del mortero aumenta ligeramente. Y dado que la capacidad calorífica volumétrica depende directamente de la densidad, esto ya produce por sí mismo una elevación de la capacidad calorífica volumétrica. Sin embargo, como se mencionó anteriormente en este trabajo, la densidad del mortero disminuye por la mayor cantidad de sustitución de agregado, ya que durante el proceso de encapsulamiento se incrementó el rango de tamaño de los agregados por efecto de la película, generando mayores espacios ocupados, lo que se ve reflejado en la disminución de la capacidad calorífica volumétrica en los morteros con agregados impregnados con PCM's.

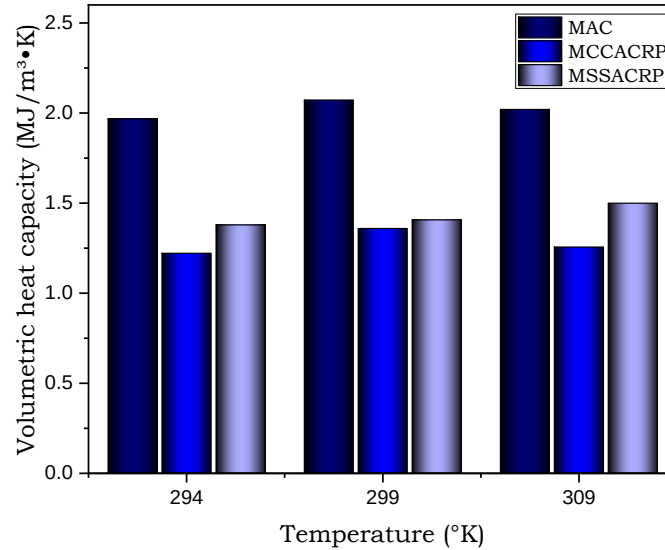


Figura 40. Capacidad calorífica volumétrica a diferente temperatura.

En la Figura 41, se presenta la gráfica de los resultados obtenidos de capacidad calorífica volumétrica de morteros con agregado basáltico, *MAB*, *MCCABRP* y *MSSABRP*. Comparativamente el *MAB* presenta una capacidad calorífica volumétrica 12% más baja que el mortero *MAC*. Al impregnar con los PCMs, el *MCCABRP* presentó una reducción del 17% con respecto de *MAB*, mientras el *MSSABRP* presentó una reducción del 24% con respecto de *MAB*, siendo esta la menor reducción en la capacidad calorífica volumétrica. Al igual que en los resultados anteriores, la *SS* presentó los menores valores de conductividad térmica, difusividad y capacidad calorífica volumétrica. Estos resultados se correlacionan directamente con la reducción de la densidad de en los morteros como se hizo mención anteriormente.

Esta tendencia responde a la disminución en la densidad del mortero tras añadir agregados con PCM encapsulado. La capa de resina empleada en el proceso aumento el diámetro efectivo de las partículas, empeorando el acomodo granular y generando una mayor porosidad en la matriz. Como la capacidad calorífica volumétrica depende directamente de la densidad, este descenso en la masa volumétrica disminuyo el aporte térmico del PCM, resultando en valores finales inferiores para los morteros modificados.

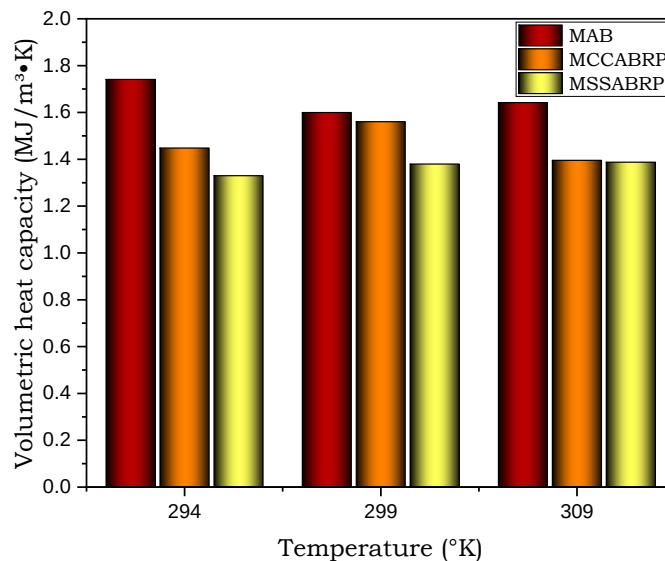


Figura 41. Capacidad calorífica volumétrica a diferente temperatura.

Calor específico

El calor específico es una propiedad fundamental que determina la cantidad de energía necesaria para modificar la temperatura del material. En la gráfica de la Figura 42, se presentan los resultados de calor específico, obtenidos a partir de los valores de conductividad, difusividad y densidad. Se observa que en los morteros modificados con PCM's el calor específico disminuyó. En el mortero sin PCM, el calor absorbido se destina únicamente a incrementar la energía interna vibracional de los sólidos, es decir el almacenamiento ocurre exclusivamente como calor sensible. Por ello, el calor específico presenta un valor moderado relativamente constante. En la matriz, los agregados y la pasta cementante poseen calores específicos típicos, por lo que el mortero manifiesta una capacidad moderada para absorber calor antes de aumentar su temperatura ya que no existen transiciones físicas internas ni reacciones endotérmicas dentro del rango usual de ensayo térmico, presenta un comportamiento lineal con la temperatura y a medida que la temperatura aumenta el calor específico puede incrementarse ligeramente, pero mantiene una tendencia estable. Esto significa que cada unidad adicional de calor genera un aumento de temperatura relativamente proporcional. Cuando la red porosa del agregado impregnado con PCM lo que ocurre es que se incorpora un compuesto

hidratado capaz de absorber la energía para romper enlaces intermoleculares, fundirse parcialmente, almacenar calor latente sin el aumento inmediato de temperatura. La literatura reporta que los PCM's poseen capacidades de almacenamiento térmico elevadas, lo que indicaría experimentalmente un incremento muy marcado del calor específico aparente durante la transición de fase. La presencia de las sales en el agregado, añade una fase con moléculas de agua y mayor capacidad de absorción energética que un vacío de aire y esto provocaría que, incluso antes de la fusión el calor específico del mortero modificado sea ligeramente superior al del mortero sin PCM, por lo que una fracción del calor también es absorbida por la sal. Por lo que el calor específico podría ser mayor que el del mortero sin PCM. A diferencia del mortero sin PCM, el calor específico en morteros con PCM, no permanece constante. Por tanto, el perfil térmico del calor específico es dependiente de la temperatura. Sin embargo, en este trabajo el calor específico disminuye ligeramente en los morteros modificados con los PSM's, atribuido a la cantidad de PCM retenido en los agregados y la película utilizada para el encapsulamiento.

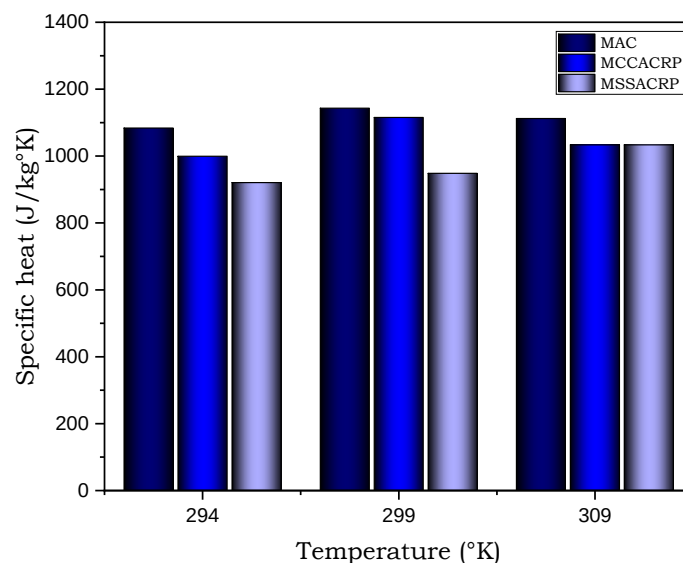


Figura 42. Calor específico de MAC a diferente temperatura.

La Figura 43, presenta el gráfico de los valores de calor específico, obtenidos a partir de los valores de conductividad, difusividad y densidad de los morteros de MAB con y sin

PCM's. Se observó un ligero incremento en la capacidad calorífica específica, al modificar con PCM's, el calor específico incremento ligeramente, al sumar un mecanismo extra de acumulación de calor, cerca de su cambio de fase el PCM absorbe energía sin elevar de inmediato la temperatura del sistema, lo que eleva la capacidad calorífica específica aparente. Así mismo, al rellenar los poros del agregado con PCM en lugar de aire, se introduce una fase con mayor capacidad de retención energética, a diferencia de MAB la respuesta de los morteros modificados varía según la temperatura debido al aporte del calor latente, pese a que la ganancia fue moderada, los datos validan que el PCM retenido en el basalto optimiza la acumulación de energía térmica en el mortero.

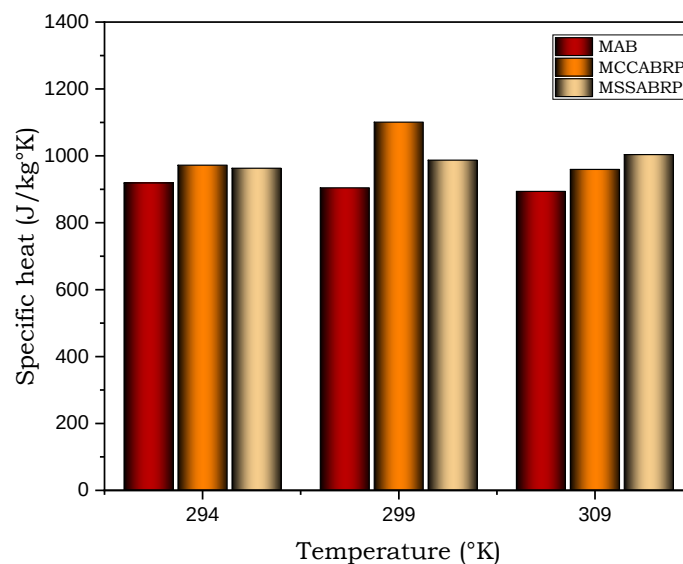


Figura 43. Calor específico de morteros a diferente temperatura.

Desempeño térmico mediante el método de caja caliente

El desempeño térmico de cada matriz cementante, se evaluó mediante el método de la caja caliente y fue dividido en dos etapas: 1) Calentamiento y 2) Enfriamiento.

La etapa de calentamiento fue por 2 horas, en esta etapa se estabiliza y controla la temperatura interna de la caja a $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$, por lo cual la temperatura exterior del cubo de mortero oscila del mismo modo, generando pequeños picos dentro de ese rango de temperatura. Se compararon los picos de temperatura exterior de los morteros con

agregado basáltico *MAB* y *MCCABRP* y se registró que la temperatura máxima de *MCCABRP* disminuyó con respecto de *MAB* en 0.76°C . Para el caso de la temperatura mínima de calentamiento, se presentó una reducción de 0.39°C , lo que indicó una reducción en los picos de temperatura del agregado con PCM con respecto del agregado sin PCM [18], [29], [36].

Por otro lado, aproximadamente durante la primera hora, el *MAB* alcanzó su temperatura máxima antes que *MCCABRP*, sin embargo, después de la primera hora, el *MCCABRP*, alcanzó primero la temperatura máxima. Este comportamiento se atribuye a que en el *MCCABRP* el flujo de calor es más lento y se almacena energía indicando que al agregar PCM se mantiene un control de la fluctuación de la temperatura dentro de la caja [15].

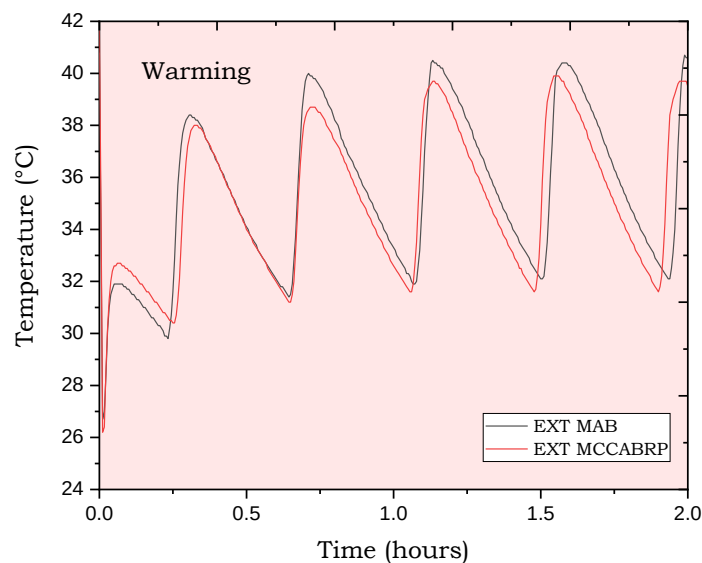


Figura 44. Desempeño térmico de temperatura exterior en zona de calentamiento de MAB.

La segunda etapa de la prueba constó de generar un proceso de libre enfriamiento durante tres horas. En la gráfica de la Figura 45, se presenta el diagrama completo de la prueba, con un tiempo de 5 horas dividido en dos partes. La primera parte fue de calentamiento por 2 horas y la segunda de enfriamiento libre por 3 horas, para este caso en particular se evaluó el desempeño térmico del material sin y con PCM. Se fijaron temperaturas de control a 35° y 25°C . La Fig. 45, compara el desempeño de *MAC* con respecto de *MCCACRP*. Se observa que la muestra que corresponde a *MCCACRP*

alcanzó primero la temperatura objetivo de los 35°C, sin embargo, se mantuvo estable en el rango de temperatura establecido comparativamente con el MAC.

Comparando las últimas tres crestas de ambas muestras de morteros, se determinó la temperatura mínima del MAC de 32.85°C a un tiempo de 1:02 horas de calentamiento y el pico máximo alcanzado fue de 36.15°C a un tiempo de 2:03 horas, indicando un rango de oscilación de 3.243°C. Por otro lado, la muestra *MCCACRP*, con temperatura mínima de 33.7°C registrada a la 1:07 horas y temperatura máxima de 36.15°C a las 2:13 horas un rango de temperatura de 2.398°C. Por lo que la muestra de mortero con PCM's presenta un rango menor de picos de temperatura; además se observa un desfase en los picos de temperatura que indican la capacidad del material modificado de retener el calor y liberarlo controladamente. Por otro lado, al iniciar el periodo de libre enfriamiento, la muestra de MAC libera primero el calor, alcanzando primero los 25°C a las 3:38 horas, con respecto de la muestra *MCCACRP* la cual llega a la temperatura objetivo a las 3:42 horas; 4 minutos más tarde, los que indica que la muestra con PCM's tiene mayor control en las fluctuaciones de la temperatura.

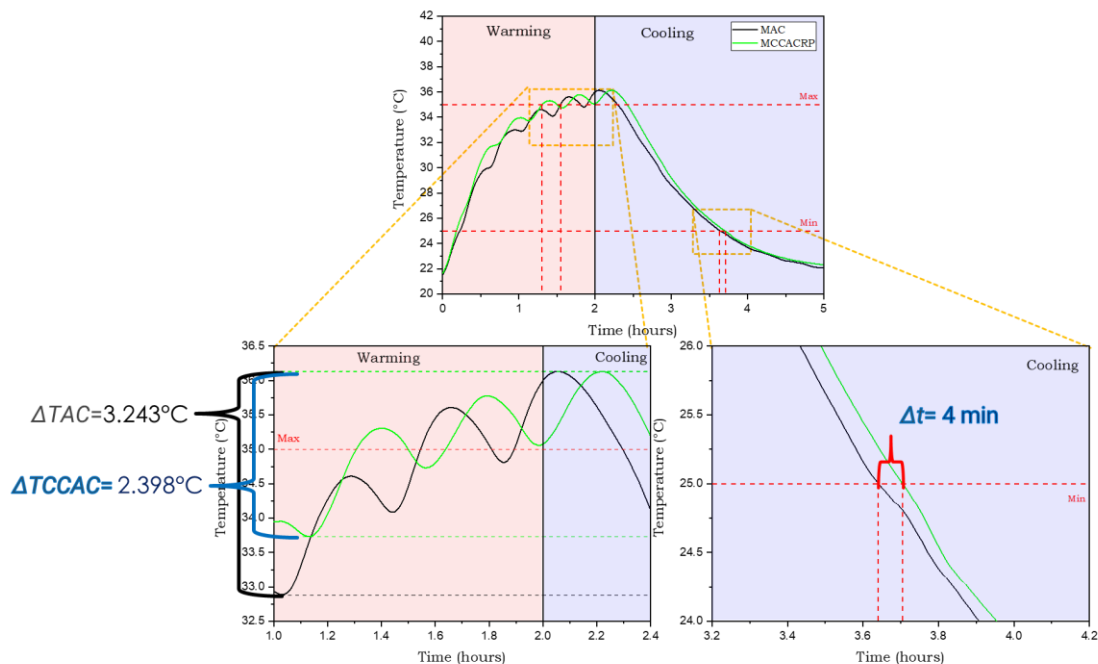


Figura 45. Desempeño térmico de AC vs CCAC en caja térmica.

Del mismo modo, la Figura 46 presenta la comparativa de MAC vs MSSACRP, a diferencia del grafico anterior, en este caso la muestra MAC, llegó primero a la temperatura objetivo de 35 grados, pero se puede observar una irregularidad en las crestas de incremento de temperatura, comparado con el controlado incremento de temperatura de la muestra MSSACRP, como en el caso anterior al comparar las ultimas 3 crestas, se determina la temperatura mínima del MAC de 32.85°C a la 1:02 hora de calentamiento y el pico máximo de 36.15°C a las 2:03 horas, lo que indica un rango de oscilación de 3.243°C, por otro lado la muestra MSSACRP con temperatura mínima de 33.15°C registrada a la hora con seis minutos y temperatura máxima de 35.8°C a las dos horas con ocho minutos, indica un rango de temperatura de 2.631°C, un rango menor al de la muestra sin PCM y al igual que la muestra anterior se puede observar un desfase en los picos de temperatura, por lado al iniciar el periodo de libre enfriamiento, la muestra de MAC, libera primero el calor llegando antes a la temperatura objetivo de 25°C a las 3:38 horas con respecto de la muestra MSSACRP que alcanza la temperatura objetivo a las 3:47 horas, 9 minutos más tarde, los que nos indica que la muestra MSSACRP, funciona mejor al controlar las fluctuaciones de la temperatura con respecto de MAC.

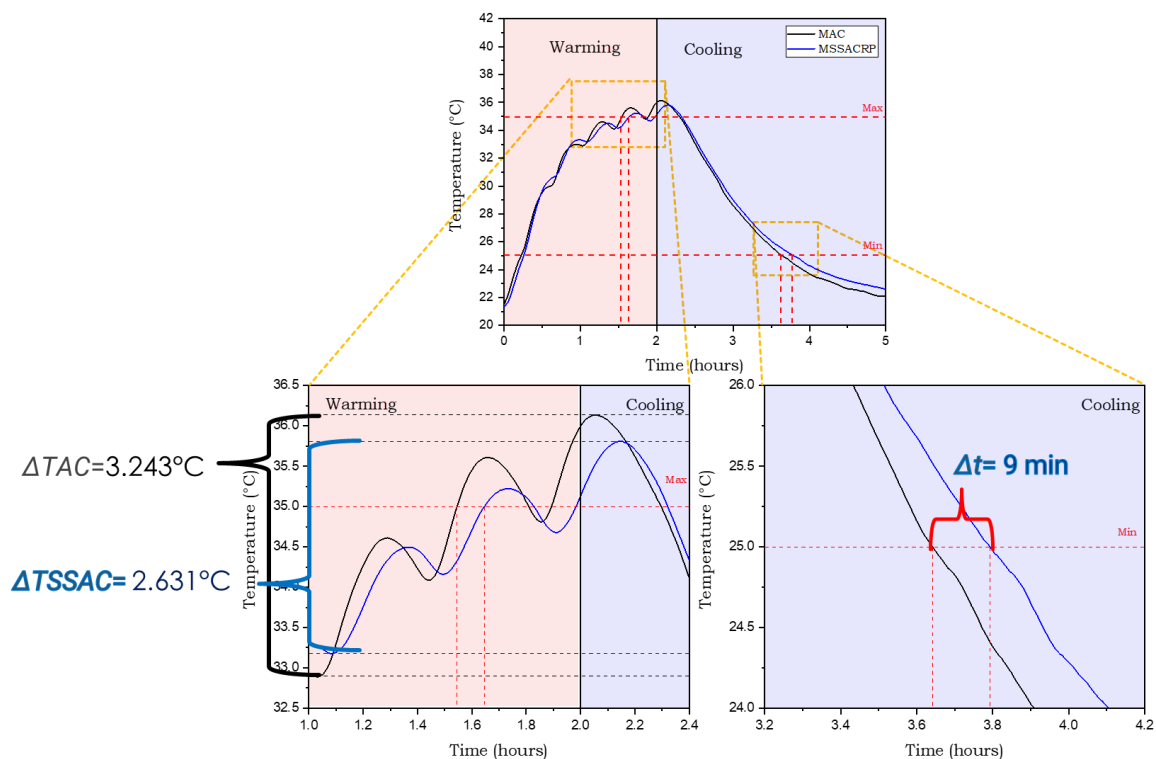


Figura 46. Desempeño térmico de MAC vs MSSACRP en caja térmica.

A diferencia del MAC el MAB, presento un desempeño ligeramente diferente, La Figura 47 presenta la comparativa del MAB vs MCCABRP, al analizar el comportamiento térmico de las curvas y considerando los últimos tres picos de la etapa de calentamiento, se determinó que el mortero MAB alcanzó una temperatura mínima de 33.35 °C a las 1:07 h, correspondiente al primer valle de la sección analizada y una temperatura máxima de 36.30 °C a las 2:12 h, ubicada en el tercer pico. Estos valores representan un rango de oscilación térmica de 2.893 °C. Por su parte el mortero de MCCABRP presentó una temperatura mínima de 33.20 °C a las 1:05 h, registrada también en el primer valle y una temperatura máxima de 33.95 °C a las 2:11 h, correspondiente al tercer pico, con un rango de oscilación de 2.685 °C.

La comparación entre ambos morteros evidencia una reducción de 0.208 °C en la amplitud de las fluctuaciones térmicas del mortero con PCM respecto al mortero sin PCM. Asimismo, se observó un desfase en la ocurrencia de los picos de temperatura, lo que sugiere la capacidad del mortero con PCM para almacenar y liberar energía de manera gradual.

En la etapa de libre enfriamiento, el mortero MCCABRP alcanzó la temperatura objetivo de 25 °C a las 3:45 h, mientras que el mortero MAB lo hizo a las 3:59 h, es decir, 14 minutos después. Durante todo el proceso de enfriamiento, la temperatura del mortero con PCM se mantuvo por debajo de la registrada en el mortero sin PCM, con una diferencia promedio de 0.7567 °C. En condiciones reales de edificación, estos resultados sugieren que la incorporación de PCM en el mortero contribuye a una regulación térmica más eficiente del ambiente interior, favoreciendo un funcionamiento óptimo de los sistemas de climatización y en consecuencia una reducción en el consumo energético.

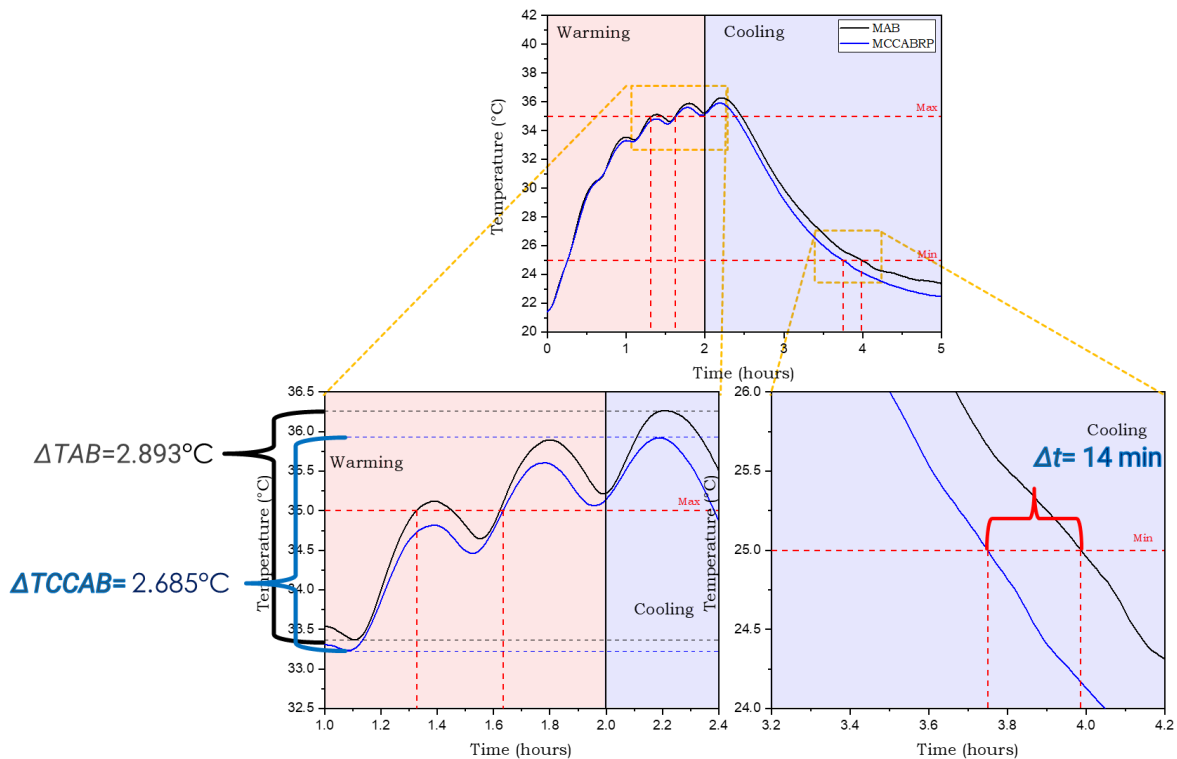


Figura 47. Desempeño térmico de MAB vs MCCABRP en caja térmica.

La Figura 48 presenta la comparación del comportamiento entre los morteros MAB y *MSSABRP*. De manera similar al análisis anterior, la temperatura mínima del mortero *MAB* durante la etapa de calentamiento se determinó a partir de los últimos tres picos y valles de la curva (inserto inferior izquierdo), obteniéndose un valor de 33.35°C a las 1:07 h, mientras que la temperatura máxima fue de 36.30°C a las 2:12 h, lo que corresponde a un rango de oscilación térmica de 2.893°C . por su parte, el mortero *MSSABRP* registro una temperatura mínima de 33.40°C a las 1:07 h y una temperatura máxima de 35.90°C a las 2:11 h, alcanzando un rango de oscilación de 2.529°C , inferior al obtenido para el mortero *MAB*. Asimismo, se observó un desfase en la ocurrencia de los picos de temperatura, lo que evidencia la capacidad del mortero con PCM para almacenar energía térmica y liberarla de manera gradual.

Por otro lado, el inserto inferior derecho muestra el comportamiento durante el periodo de libre enfriamiento. En esta etapa, el mortero *MSSABRP* disipó el calor con mayor

rapidez, alcanzando la temperatura objetivo de 25 °C a las 3:49 h mientras que la muestra MAB llegó a dicha temperatura a las 2:59 h, es decir, 10 minutos después.

De manera similar a lo observado en el mortero *MCCABRP*, durante la etapa de enfriamiento la temperatura del mortero con PCM se mantuvo por debajo de la del mortero sin PCM, registrándose una diferencia promedio de 0.4295 °C. Estos resultados indican que los morteros con incorporación de PCM presentan una mayor inercia térmica efectiva, característica altamente deseable en aplicaciones de recubrimiento para edificaciones, ya que favorece la estabilización de la temperatura interior y contribuye a mejorar la eficiencia energética de los sistemas de climatización.

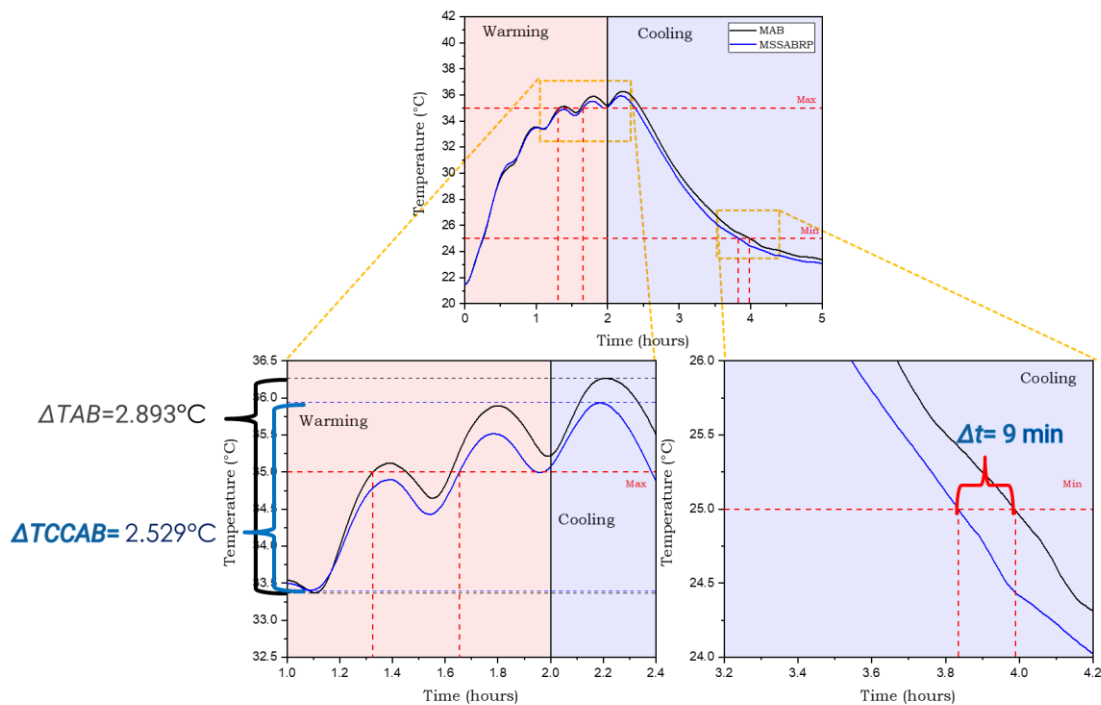


Figura 48. Desempeño térmico de MAB vs MSSABRP en caja térmica.

Propiedades mecánicas

Resistencia a la compresión mortero de agregado calizo con y sin PCMs

Los resultados del ensayo de compresión en morteros con 28 días de curado, elaborados con agregado calizo y agregado modificado con PCM, se muestran en la Figura 49. De acuerdo con los resultados, se presentó una reducción del 87% de la resistencia a la

compresión en las muestras *MCCACRP* comparado con la muestra de referencia *MAC*. En cuanto a la muestra *MSSACRP* presentó una reducción del 60% con respecto a la muestra de referencia, el comportamiento en el decremento de la resistencia a la compresión en las muestras con PCM puede atribuirse principalmente a 3 factores. Primero debido a la generación de espacios vacíos dentro de la estructura del mortero, dado al acomodo y a la película de recubrimiento de menor densidad [16], [84], El segundo factor se atribuye a la distribución granulométrica del agregado utilizado para la elaboración de los morteros modificados, ya que únicamente se empleó un tamaño de agregado de 1.18 a 0.6 mm; es importante mencionar que dicha práctica reduce incluso la resistencia a la compresión de la muestra de referencia sin PCM, ya que durante la elaboración del mortero se generan espacios vacíos dentro de la estructura que son propios del acomodo del agregado y estos espacios vacíos se incrementan por la falta de distribución de tamaño de agregado utilizado. Adicionalmente, para el caso de agregados modificados, también por las aglomeraciones de 4 a 5 granos de agregado modificado [85]. El tercer factor por el cual se puede ver afectada la resistencia a la compresión de los morteros modificados, se atribuye a las características propias de la película de recubrimiento, ya que la resina de poliéster como hidrofóbica, reduce la nucleación de productos de hidratación en la interface del agregado y la matriz cementante, generando puntos débiles dentro de la estructura del mortero.

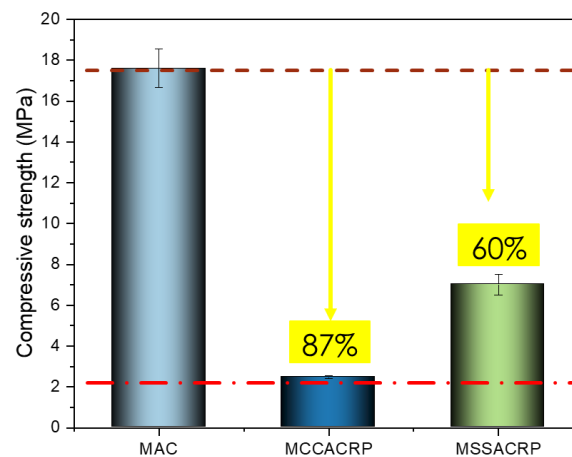


Figura 49. Resistencia a la compresión de mortero de referencia y morteros con AC modificado.

Resistencia a la compresión del mortero con agregado basáltico con y sin PCMs

Los resultados de la prueba de compresión en morteros elaborados con agregado basáltico con y sin PCMs, *MAB*, *MCCABRP* y *MSSABRP*, respectivamente, a 28 días de curado se muestran en la Figura 50. Al comparar la resistencia a la compresión de los morteros *MCCABRP* con la muestra de referencia *MAB*, se presentó una reducción del 76 % en la resistencia; para el caso de morteros *MSSABRP* se obtuvo una reducción del 61% en la resistencia a la compresión. El comportamiento presentado en los morteros fue el mismo que con los morteros con agregado calizo y es atribuido igualmente a los mismos factores presentados anteriormente.

La Tabla 12, presenta un análisis comparativo de los valores de resistencia a la compresión reportados en la literatura, de morteros y concretos sin y con adición PCMs. El resultado del análisis sugiere que, al incrementar el porcentaje de sustitución de agregado modificado por agregado natural, la resistencia a la compresión disminuye, lo cual es atribuido a la disminución de la densidad por la generación de espacios vacíos en la estructura del mortero, adicionalmente, se recomienda la incorporación de porcentajes no mayores al 10%, lo que ha demostrado no causar cambios significativos en las propiedades mecánicas [23]. Por otra parte, la norma ASTM C270, clasifica los morteros de recubrimiento como tipo “O” y establece que los requerimientos mínimos de resistencia a la compresión son de 2.4 Mpa, por lo que los morteros con PCM propuestos en esta investigación cumplen con el mínimo requerido.

La disminución en la resistencia mecánica puede explicarse a partir de tres mecanismos, la incorporación de PCM en agregados porosos incrementa la cantidad de vacíos dentro de la matriz, reduciendo su densidad y en consecuencia su capacidad de soportar cargas; la presencia de resina de poliéster genera una interfaz débil entre el agregado y la pasta cementante, debido a su naturaleza hidrofóbica, lo cual inhibe la adecuada hidratación del cemento en esa zona y por último la aglomeración de partículas, lo que genera heterogeneidad en el mortero y favorece la aparición de concentradores de esfuerzo.

Los resultados sugieren que los morteros desarrollados deben considerarse únicamente aplicables en recubrimientos de edificaciones y no como elementos estructurales, donde el desempeño térmico sea prioritario.

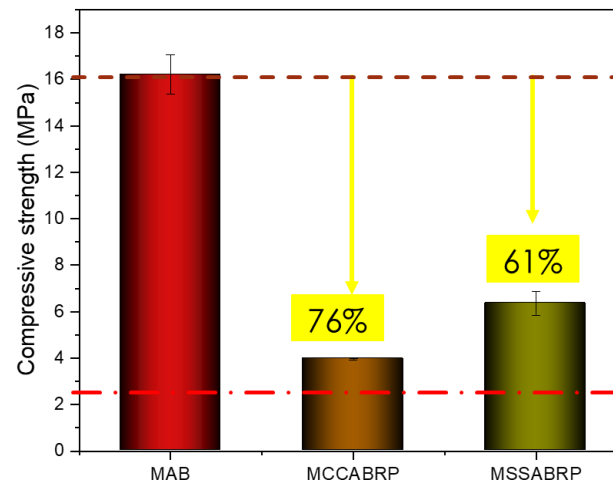


Figura 50. Resistencia a la compresión de mortero de referencia y morteros con AB modificado.

Tabla 12. Resistencia a la compresión de morteros/concretos con adición de PCM

Reference	Type	Compressive strength (Mpa)	Decrease %
(Guardia et al., 2019)	Mortar	14.33	
	mortar + 10% PCM	7.3	49
	mortar + 20% PCM	7.17	50
. G. Kim et al., 2020)	Concrete	47.1	
	concrete + PCM/SiC 30%	41.2	13
	concrete + PCM/SiC 50%	39	17
	concrete + PCM/SiC 70%	36.5	23
	concrete + PCM/SiC 100%	34.4	27
(Kontoleon et al., 2021)	Mortar	78.28	
	mortar + 10% PCM	38.8	50
	mortar + 20% PCM	19.75	75
(Y. U. Kim et al., 2021)	Mortar	34.23	
	mortar + 50% wt PCM	32.8	4
	mortar + 100% wt PCM	30.23	12
(Pongsopha et al., 2021)	Concrete	22.1	
	concrete + PCM	19	14
This research	mortar AC	17.59	
	mortar + CCAC	2.47	87
	mortar + SSAC	7.01	60
	mortar AB	16.22	
	mortar + CCAB	3.95	76
	mortar + SSAB	6.35	61

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM-EDS)

En la Figura 51, se presentan las micrografías obtenidas por SEM de los morteros elaborados con agregado basáltico con y sin PCMs. La Figura 51 (a), corresponde a la zona de fractura de un mortero elaborado con agregado basáltico sin adición de PCM, en ella se observa claramente la zona de transición interfacial (ITZ) entre la pasta cementante y el agregado basáltico. En la imagen de la Figura 51 (b) se presenta la micrografía correspondiente al mortero elaborado con agregado basáltico impregnado

con CC y encapsulado con RP, en ella también puede observarse la zona de interfase entre el agregado y la matriz cementante, también se observa mayor espacio vacío en la superficie de la matriz, una característica significativa que impacta directamente en la reducción de propiedades mecánicas y que puede impactar positivamente en la mejora en las propiedades térmicas [65], adicionalmente, se puede apreciar la película de RP sobre la superficie del grano. Cabe resaltar que incluso después del ensayo de resistencia a compresión de la muestra, se conserva la película de encapsulado del agregado. La Figura 53 (c) muestra la micrografía del mortero elaborado con agregado basáltico impregnado con SS y encapsulado con RP, donde se observan igualmente mayores espacios vacíos en la superficie de la pasta de mortero, por otro lado, se observa que a partir de la ITZ se generan puntos débiles, puntos de partida para microfisuras y la disminución de la resistencia a la compresión.

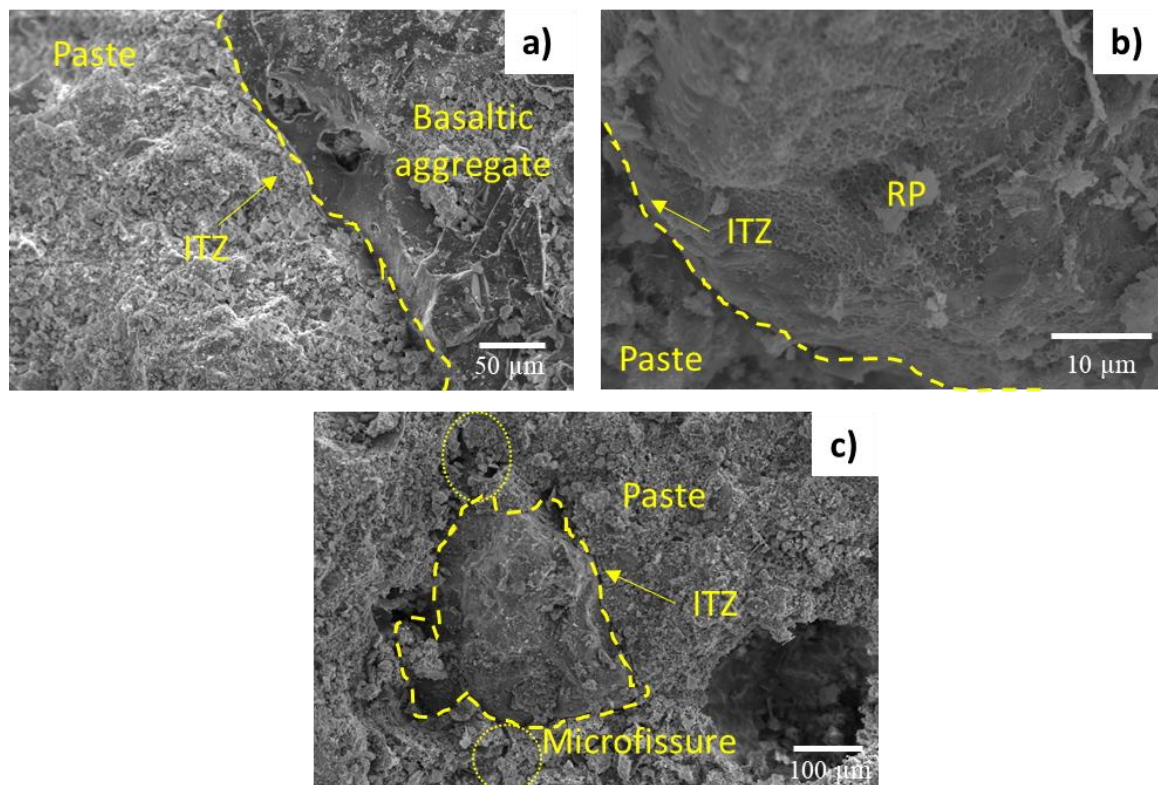


Figura 51. Imágenes SEM de especímenes a) mortero AB (x300) b) mortero CCAB (x2300) c) mortero SSAB (x150).

La siguiente imagen de la Figura 52, corresponde a una micrografía de los morteros elaborados con CC y SS, respectivamente, así como el análisis por EDS. En la Figura 52(a) se muestra el patrón por EDS y se observan los picos correspondientes al elemento de Cl que corresponde al PCM de cloruro de calcio hexahidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). En cuanto a la Figura (b) el patrón de difracción presenta los picos representativos del elemento Na, que corresponde al sulfato de sodio decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

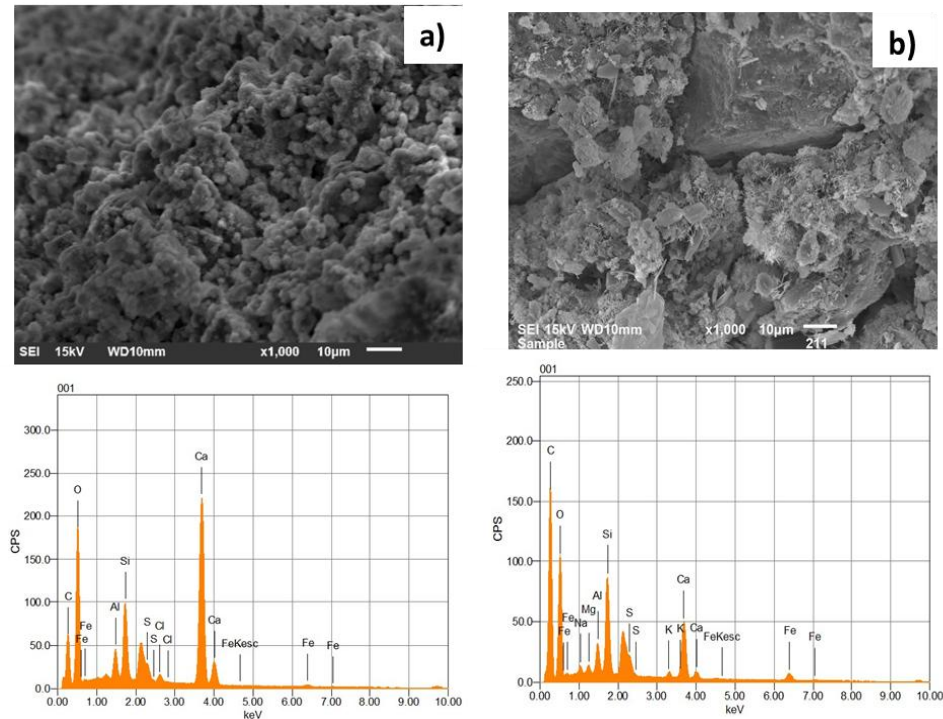


Figura 52. Imagen SEM-EDS de especímenes mortero a) CCAB (x1000) b) SSAB (x1000)

Conclusiones

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) impregnados en agregados bálticos y calizos utilizados como medio de soporte en la elaboración de morteros de recubrimiento, con el propósito de mejorar su desempeño térmico y potenciar la regulación de la temperatura interior de las edificaciones sin comprometer sus propiedades mecánicas. Para ello, se emplearon como PCMs el cloruro de calcio hexahidratado (CC) y el sulfato de sodio decahidratado (SS). Los porcentajes promedio de retención obtenidos fueron de 20.64 % para el CC y

23.35 % para el SS en el agregado basáltico, mientras que en el agregado calizo se alcanzaron valores de 17.72 % y 20.65 %, respectivamente.

La caracterización física de ambos agregados, reveló que su estructura porosa, elevada absorción hídrica y morfología superficial actúan de forma sinérgica para fijar los PCMs mediante mecanismos físicos y capilares. Los microporos ejercen la función de depósitos microscópicos que albergan PCM en estado líquido, por lo cual, a mayor porosidad accesible, mayor es la carga de PCM incorporable. Una distribución granulométrica heterogénea dentro de la red de poroso no solo facilita el ingreso inicial del fluido por los vacíos de mayor tamaño, sino que genera presiones capilares elevadas en las cavidades más estrechas. Esta fuerza capilar opone resistencia a las fuerzas de flujo saliente, estabilizando el PCM ante eventuales fugas durante los ciclos de solidificación y fusión.

La incorporación de los PCMs en los morteros produjo una disminución significativa de la densidad del material, lo que contribuyó favorablemente a la reducción de la conductividad térmica y la difusividad térmica. Asimismo, la disminución de la capacidad calorífica volumétrica se relaciona tanto con la reducción de la densidad como con la distribución de PCM dentro de la matriz del mortero.

Los resultados obtenidos mediante el ensayo de caja caliente evidenciaron una reducción en el rango de fluctuación térmica de 0.208 °C en el mortero elaborado con agregado basáltico y PCM de cloruro de calcio y de 0.364 °C en el mortero con PCM de sulfato de sodio, en comparación con el mortero de referencia sin PCM. En términos de desempeño térmico, los morteros modificados presentaron una disminución de los picos máximos de temperatura de hasta 0.3106 °C y una reducción de 0.1547 °C en las temperaturas mínimas. En particular, el mortero con agregado basáltico y PCM de sulfato de sodio registró reducciones promedio de 0.3105 °C en los picos máximos y de 0.2276 °C en los valles de temperatura.

En mezclas convencionales, el almacenamiento térmico depende en su totalidad del calor sensible del cemento, los agregados y el aire atrapado. En los morteros modificados, la absorción endotérmica por calor latente incrementa la capacidad calorífica aparente del sistema durante la transición de fase, reduciendo significativamente la velocidad de propagación de la onda térmica. Aunque la adición de resina y PCM reduce ligeramente

la densidad volumétrica del mortero, la caída drástica en la difusividad equilibra el sistema, en términos generales, la combinación de una baja conductividad térmica con una respuesta de calor latente elevada dota a estos morteros de una excelente inercia térmica.

En cuanto al comportamiento mecánico la resistencia a la compresión de los morteros modificados con PCM disminuyó, en promedio hasta en un 65 % respecto al mortero de referencia. No obstante, de acuerdo con los criterios establecidos en la ASTM C270, los morteros desarrollados cumplen con la resistencia mínima requerida de 2.4 MPa para morteros de recubrimiento, lo que indica que, pese a la reducción observada, las propiedades mecánicas permanecen dentro de los límites aceptables para aplicaciones no estructurales. En consecuencia, el material desarrollado se perfila como una alternativa viable para su implementación en sistemas de envolvente térmica pasiva, particularmente como mortero de recubrimiento orientado a mejorar la eficiencia energética y el confort térmico de las edificaciones.

Trabajos a futuro

Para investigaciones futuras, se sugiere evaluar y optimizar nuevos porcentajes de sustitución del agregado modificado con PCM, empleando una curva granulométrica que asegure una mayor compactación de los espacios vacíos en el composito de recubrimiento para el incremento de la resistencia mecánica sin comprometer el desempeño térmico alcanzado en este estudio.

Referencias bibliográficas:

- [1] M. H. Zahir, S. A. Mohamed, R. Saidur, and F. A. Al-Sulaiman, "Supercooling of phase-change materials and the techniques used to mitigate the phenomenon," *Appl. Energy*, vol. 240, no. July 2018, pp. 793–817, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.02.045.
- [2] V. S. K. V. Harish and A. Kumar, "A review on modeling and simulation of building energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1272–1292, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.040.
- [3] B. Li, T. Liu, L. Hu, Y. Wang, and S. Nie, "Facile preparation and adjustable thermal property of stearic acid-graphene oxide composite as shape-stabilized phase change material," *Chem. Eng. J.*, vol. 215–216, pp. 819–826, 2013, doi:

10.1016/j.cej.2012.11.077.

- [4] M. A. Franesqui, J. Yepes, and C. García-González, "Improvement of moisture damage resistance and permanent deformation performance of asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates using crumb rubber modified bitumen," *Constr. Build. Mater.*, vol. 201, pp. 328–339, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.181.
- [5] E. M. Cervantes-Ramírez, D. L. Trejo-Arroyo, J. C. Cruz-Argüello, and M. P. Gurrola, "Thermal coating with rigid recycled polyurethane foam as a partial substitute of limestone aggregate," *Rev. Ing. Civ.*, vol. 6, no. 16, pp. 1–11, 2022, doi: 10.35429/jce.2022.16.6.1.11.
- [6] N. Saikia and J. De Brito, "Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 34, pp. 385–401, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066.
- [7] E. Oró, A. de Gracia, A. Castell, M. M. Farid, and L. F. Cabeza, "Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications," *Applied Energy*, vol. 99, Elsevier Ltd, pp. 513–533, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.03.058.
- [8] M. Pomianowski, P. Heiselberg, and Y. Zhang, "Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings," *Energy Build.*, vol. 67, pp. 56–69, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.006.
- [9] D. S. Malkawi and A. I. Tamimi, "Comparison of phase change material for thermal analysis of a passive hydronic solar system," *J. Energy Storage*, vol. 33, no. October 2020, p. 102069, 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102069.
- [10] E. Sassine, Z. Younsi, Y. Cherif, and E. Antczak, "Thermal performance evaluation of a massive brick wall under real weather conditions via the Conduction Transfer function method," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 7, no. April, pp. 56–65, 2017, doi: 10.1016/j.cscm.2017.04.003.
- [11] F. Kuznik, D. David, K. Johannes, and J. J. Roux, *A review on phase change materials integrated in building walls*, vol. 15, no. 1. 2011.
- [12] D. Zhou, C. Y. Zhao, and Y. Tian, "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications," *Applied Energy*, vol. 92, Elsevier Ltd, pp. 593–605, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.08.025.
- [13] P. Pongsopha *et al.*, "Sustainable rubberized concrete mixed with surface treated PCM lightweight aggregates subjected to high temperature cycle," *Constr. Build. Mater.*, vol. 303, no. August, p. 124535, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124535.
- [14] E. Alehosseini and S. M. Jafari, "Nanoencapsulation of phase change materials (PCMs) and their applications in various fields for energy storage and management," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 283, p. 102226, 2020, doi: 10.1016/j.cis.2020.102226.

- [15] K. Yu, Y. Liu, and Y. Yang, "Review on form-stable inorganic hydrated salt phase change materials: Preparation, characterization and effect on the thermophysical properties," *Appl. Energy*, vol. 292, no. April, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116845.
- [16] H. G. Kim, A. Qudoos, I. K. Jeon, and J. S. Ryou, "Assessment of PCM/SiC-based composite aggregate in concrete: Mechanical, physical and microstructural properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 120088, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120088.
- [17] M. Muraleedharan and Y. Nadir, "Geopolymer mortar integrated with phase change materials for improvement of thermal efficiency in buildings: A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 878–885, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.791.
- [18] Y. U. Kim, J. H. Park, B. Y. Yun, S. Yang, S. Wi, and S. Kim, "Mechanical and thermal properties of artificial stone finishing materials mixed with PCM impregnated lightweight aggregate and carbon material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, p. 121882, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121882.
- [19] D. L. Trejo-Arroyo, K. E. Acosta, J. C. Cruz, A. M. Valenzuela-Muñiz, R. E. Vega-Azamar, and L. F. Jiménez, "Influence of ZrO₂ nanoparticles on the microstructural development of cement mortars with limestone aggregates," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 3, pp. 1–12, 2019, doi: 10.3390/app9030598.
- [20] W. Piasta, J. Góra, and T. Turkiewicz, "Properties and durability of coarse igneous rock aggregates and concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 126, pp. 119–129, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.022.
- [21] N. U. Kockal, "Investigation about the effect of different fine aggregates on physical, mechanical and thermal properties of mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 816–825, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.008.
- [22] C. Liu, P. Du, B. Fang, Z. Li, B. Chen, and Z. Rao, "Experimental study on a functional microencapsulated phase change material for thermal management," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 118, p. 104876, 2020, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104876.
- [23] K. J. Kontoleon *et al.*, "Defensive behaviour of building envelopes in terms of mechanical and thermal responsiveness by incorporating PCMs in cement mortar layers," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 47, no. June, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101349.
- [24] J. A. Pulido-Arcas, V. Flores-Alés, and A. Pérez-Fargallo, "Coating mortars with improved physical properties, economic cost, and carbon footprint," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01095.
- [25] ASTM C 270, "Standard Specification for Mortar for Unit Masonry: C270-14a," *ASTM Int.*, vol. July, no. November 2003, pp. 1–14, 2012, [Online]. Available: www.astm.org.
- [26] V. G. Haach, G. Vasconcelos, and P. B. Loureno, "Influence of aggregates

- grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 6, pp. 2980–2987, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011.
- [27] D. Fernandes, F. Pitié, G. Cáceres, and J. Baeyens, “Thermal energy storage: ‘How previous findings determine current research priorities,’” *Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 246–257, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.01.024.
- [28] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, and Y. Zeraouli, “Energy storage: Applications and challenges,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 120, no. PART A, pp. 59–80, 2014, doi: 10.1016/j.solmat.2013.08.015.
- [29] E. Mohseni, W. Tang, K. H. Khayat, and H. Cui, “Thermal performance and corrosion resistance of structural-functional concrete made with inorganic PCM,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 249, p. 118768, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118768.
- [30] E. Marcial *et al.*, “Advances in the Stabilization of Eutectic Salts as Phase Change Materials (PCMs) for Enhanced Thermal Performance : A Critical Review,” *J. Compos. Sci.*, 2025, doi: 10.3390/jcs9120667.
- [31] V. V. Tyagi and D. Buddhi, “Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 92, no. 8, pp. 891–899, 2008, doi: 10.1016/j.solmat.2008.02.021.
- [32] N. Barhemmati-Rajab and W. Zhao, “Investigation into boron nitride nanoparticle effects on thermal properties of calcium chloride hexahydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) as a phase change material,” *MRS Commun.*, vol. 8, no. 4, pp. 1439–1444, 2018, doi: 10.1557/mrc.2018.210.
- [33] Z. Zhang, Y. Lian, X. Xu, X. Xu, G. Fang, and M. Gu, “Synthesis and characterization of microencapsulated sodium sulfate decahydrate as phase change energy storage materials,” *Appl. Energy*, vol. 255, no. August, p. 113830, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113830.
- [34] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar, and P. Santos, “Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency,” *Energy and Buildings*, vol. 59, pp. 82–103, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.12.042.
- [35] R. Illampas, I. Rigopoulos, and I. Ioannou, “Influence of microencapsulated Phase Change Materials (PCMs) on the properties of polymer modified cementitious repair mortar,” *J. Build. Eng.*, vol. 40, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102328.
- [36] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, K. Chahine, and C. Castelain, “Short recent summary review on evolving phase change material encapsulation techniques for building applications,” *Energy Reports*, vol. 8, no. May, pp. 1245–1260, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.07.135.
- [37] Z. Rao, G. Zhang, T. Xu, and K. Hong, “Experimental study on a novel form-stable

- phase change materials based on diatomite for solar energy storage,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 182, no. March, pp. 52–60, 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2018.03.016.
- [38] C. Guardia, G. Barluenga, I. Palomar, and G. Diarce, “Thermal enhanced cement-lime mortars with phase change materials (PCM), lightweight aggregate and cellulose fibers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 221, pp. 586–594, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.098.
- [39] E. Günther, S. Hiebler, H. Mehling, and R. Redlich, “Enthalpy of phase change materials as a function of temperature: Required accuracy and suitable measurement methods,” *Int. J. Thermophys.*, vol. 30, no. 4, pp. 1257–1269, 2009, doi: 10.1007/s10765-009-0641-z.
- [40] C. Barreneche, A. Solé, L. Miró, I. Martorell, A. I. Fernández, and L. F. Cabeza, “Study on differential scanning calorimetry analysis with two operation modes and organic and inorganic phase change material (PCM),” *Thermochim. Acta*, vol. 553, pp. 23–26, 2013, doi: 10.1016/j.tca.2012.11.027.
- [41] A. Hasan, S. J. McCormack, M. J. Huang, and B. Norton, “Characterization of phase change materials for thermal control of photovoltaics using Differential Scanning Calorimetry and Temperature History Method,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 81, pp. 322–329, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.02.042.
- [42] Y. Liu, M. Xie, X. Gao, Y. Yang, and Y. Sang, “Experimental exploration of incorporating form-stable hydrate salt phase change materials into cement mortar for thermal energy storage,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 140, no. May, pp. 112–119, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.042.
- [43] Y. Grosu *et al.*, “Hierarchical macro-nanoporous metals for leakage-free high-thermal conductivity shape-stabilized phase change materials,” *Appl. Energy*, vol. 269, no. February, p. 13, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115088.
- [44] T. Nomura, N. Okinaka, and T. Akiyama, “Impregnation of porous material with phase change material for thermal energy storage,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 115, no. 2–3, pp. 846–850, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.matchemphys.2009.02.045.
- [45] Y. E. Milián, A. Gutiérrez, M. Grágeda, and S. Ushak, “A review on encapsulation techniques for inorganic phase change materials and the influence on their thermophysical properties,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, no. January, pp. 983–999, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.159.
- [46] W. Su, J. Darkwa, and G. Kokogiannakis, “Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 373–391, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.044.
- [47] R. Yang, H. Xu, and Y. Zhang, “Preparation, physical property and thermal physical property of phase change microcapsule slurry and phase change emulsion,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 80, no. 4, pp. 405–416, 2003, doi: 10.1016/j.solmat.2003.08.005.

- [48] S. Lashgari, H. Arabi, A. R. Mahdavian, and V. Ambrogi, "Thermal and morphological studies on novel PCM microcapsules containing n-hexadecane as the core in a flexible shell," *Appl. Energy*, vol. 190, pp. 612–622, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.158.
- [49] V. Ferrándiz-Mas and E. García-Alcocel, "Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS)," *Mater. Construcción*, vol. 62, no. 308, pp. 547–566, 2012, doi: 10.3989/mc.2012.04611.
- [50] A. A. Mahmoud, E. A. A. Nasr, and A. A. H. Maamoun, "The Influence of Polyurethane Foam on the Insulation Characteristics of Mortar Pastes," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 05, no. 02, pp. 49–61, 2017, doi: 10.4236/jmmce.2017.52005.
- [51] D. Zhang, S. Tian, and D. Xiao, "Experimental study on the phase change behavior of phase change material confined in pores," *Sol. Energy*, vol. 81, no. 5, pp. 653–660, May 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.08.010.
- [52] J. M. Yang and J. S. Kim, "The microencapsulation of calcium chloride hexahydrate as a phase-change material by using the hybrid coupler of organoalkoxysilanes," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 135, no. 6, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1002/app.45821.
- [53] X. Huang, C. Zhu, Y. Lin, and G. Fang, "Thermal properties and applications of microencapsulated PCM for thermal energy storage: A review," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 147, no. August 2018, pp. 841–855, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.007.
- [54] S. A. Memon, "Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31. Elsevier Ltd, pp. 870–906, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.042.
- [55] E. M. Alawadhi, "Thermal analysis of a building brick containing phase change material," *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, pp. 351–357, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.001.
- [56] V. V. Tyagi, S. C. Kaushik, S. K. Tyagi, and T. Akiyama, "Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2. pp. 1373–1391, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.10.006.
- [57] P. Arce, C. Castellón, A. Castell, and L. F. Cabeza, "Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings," *Energy Build.*, vol. 44, no. 1, pp. 88–93, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.028.
- [58] L. F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, and O. Zubillaga, "Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings," *Energy Build.*, vol. 39, no. 2, pp. 113–119, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.03.030.

- [59] Y. Liu, M. Xie, X. Gao, Y. Yang, and Y. Sang, "Experimental exploration of incorporating form-stable hydrate salt phase change materials into cement mortar for thermal energy storage," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 140, no. May, pp. 112–119, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.042.
- [60] S. A. Memon, H. Z. Cui, H. Zhang, and F. Xing, "Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete," *Appl. Energy*, vol. 139, pp. 43–55, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.11.022.
- [61] ASTM C 150, "ASTM C 150 Standard Specification for Portland Cement," *ASTM Int.*, vol. 04, p. 08, 2012, doi: 10.1520/C0150-07.
- [62] ASTM C 128, "Método de ensayo normalizado para determinar peso específico y la absorción de los áridos finos.," *ASTM Int.*, vol. 04, p. 1, 2001, doi: 10.1520/C0128-15.
- [63] F. B. ERREBAI, S. CHIKH, L. DERRADJI, M. AMARA, and Z. YOUNSI, "Optimum mass percentage of microencapsulated PCM mixed with gypsum for improved latent heat storage," *J. Energy Storage*, vol. 33, no. May, p. 101910, 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.101910.
- [64] S. Ahmad and S. A. Alghamdi, "A Study on Effect of Coarse Aggregate Type on Concrete Performance," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 37, no. 7, pp. 1777–1786, 2012, doi: 10.1007/s13369-012-0282-6.
- [65] I. Asadi, G. Ji, G. Steiner, and M. hajmohammadian baghban, "Impact of microencapsulated phase change materials (PCMs) on the thermal and mechanical performance of cement mortar," *Dev. Built Environ.*, vol. 21, no. December 2024, p. 100594, 2025, doi: 10.1016/j.dibe.2024.100594.
- [66] M. Alvarez-Rodriguez, M. Lopez-Arias, M. Velay-Lizancos, and M. Alonso-Martinez, "Impact of the phase change material (PCM) integration on the mortar's thermal inertia: The role of the aggregates and PCM types," *Constr. Build. Mater.*, vol. 470, no. March, p. 140642, 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140642.
- [67] O. Mikhailova, G. Yakovlev, I. Maeva, and S. Senkov, "Effect of dolomite limestone powder on the compressive strength of concrete," *Procedia Eng.*, vol. 57, pp. 775–780, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.098.
- [68] B. Menadi, S. Kenai, J. Khatib, and A. Ait-Mokhtar, "Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 625–633, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.005.
- [69] M. Shivakumar and T. Selvaraj, "Characterization study on the influence of limestone and shell lime as a fine aggregate substitute: A traditional approach on lime plaster restoration," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, no. xxxx, pp. 6519–6526, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.454.
- [70] İ. Bekem Kara, "Effects of cooling regimes on limestone rock and concrete with limestone aggregates at elevated temperatures," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol.

138, no. January, 2021, doi: 10.1016/j.ijrmms.2021.104618.

- [71] L. E. Menchaca-Ballinas and J. I. Escalante-García, "Limestone as aggregate and precursor in binders of waste glass activated by CaO and NaOH," *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 120013, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120013.
- [72] L. Laibao, Z. Yunsheng, Z. Wenhua, L. Zhiyong, and Z. Lihua, "Investigating the influence of basalt as mineral admixture on hydration and microstructure formation mechanism of cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 434–440, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.021.
- [73] O. Çopuroğlu, Ö. Andiç-Çakir, M. A. T. M. Broekmans, and R. Kühnel, "Mineralogy, geochemistry and expansion testing of an alkali-reactive basalt from western Anatolia, Turkey," *Mater. Charact.*, vol. 60, no. 7, pp. 756–766, 2009, doi: 10.1016/j.matchar.2008.09.011.
- [74] H. Akbulut, C. Güreler, and S. Çetin, "Use of volcanic aggregates in asphalt pavement mixes," *Proc. Inst. Civ. Eng. Transp.*, vol. 164, no. 2, pp. 111–123, 2011, doi: 10.1680/tran.2011.164.2.111.
- [75] M. Korkanç and A. Tuğrul, "Evaluation of selected basalts from the point of alkali-silica reactivity," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 505–512, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.013.
- [76] M. Korkanç and A. Tuğrul, "Evaluation of selected basalts from Niğde, Turkey, as source of concrete aggregate," *Eng. Geol.*, vol. 75, no. 3–4, pp. 291–307, 2004, doi: 10.1016/j.enggeo.2004.06.015.
- [77] D. Platte, U. Helbig, R. Houbertz, and G. Sestl, "Microencapsulation of alkaline salt hydrate melts for phase change applications by surface thiol-michael addition polymerization," *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 298, no. 1, pp. 67–77, 2013, doi: 10.1002/mame.201100338.
- [78] M. M. Rahman and M. A. Islam, "Effect of epoxy resin on the intrinsic properties of masonry mortars," *Iran. Polym. J. (English Ed.)*, vol. 21, no. 9, pp. 621–629, 2012, doi: 10.1007/s13726-012-0065-7.
- [79] J. Giro-Paloma, G. Oncins, C. Barreneche, M. Martínez, A. I. Fernández, and L. F. Cabeza, "Physico-chemical and mechanical properties of microencapsulated phase change material," *Appl. Energy*, vol. 109, pp. 441–448, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.007.
- [80] M. Aguayo *et al.*, "The influence of microencapsulated phase change material (PCM) characteristics on the microstructure and strength of cementitious composites: Experiments and finite element simulations," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 73, pp. 29–41, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2016.06.018.
- [81] B. Qu *et al.*, "Investigation of microencapsulate phase change material-based energy pile group: Energy analysis and optimization design," *J. Clean. Prod.*, vol. 381, p. 135204, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.135204.
- [82] J. Shi *et al.*, "Thermal and mechanical properties of thermal energy storage



lightweight aggregate mortar incorporated with phase change material,” *J. Energy Storage*, vol. 32, no. July, p. 101719, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101719.

- [83] L. Olivieri, J. A. Tenorio, D. Revuelta, L. Navarro, and L. F. Cabeza, “Developing a PCM-enhanced mortar for thermally active precast walls,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 181, pp. 638–649, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.06.013.
- [84] X. Wang, Y. Huang, L. Shi, S. Zhang, and W. Li, “Enhanced thermal performance of phase change mortar using multi-scale carbon-based materials,” *J. Build. Eng.*, vol. 98, no. July, 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.111259.
- [85] L. Bi, G. Long, C. Ma, and Y. Xie, “Mechanical properties and water absorption of steam-cured mortar containing phase change composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 248, p. 118707, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118707.