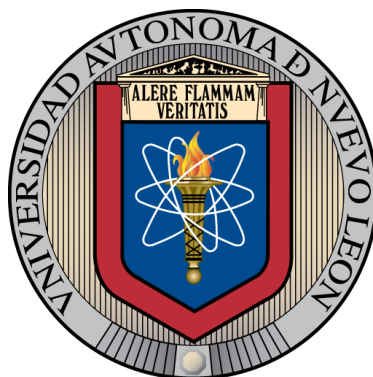


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



**INCORPORACIÓN DE UN NANOCOMPUESTO HÍBRIDO DE
DIÓXIDO DE VANADIO-NANOTUBOS DE CARBONO EN UN
MORTERO DE CEMENTO PORTLAND Y UNA PASTA DE YESO
PARA LA TERMORREGULACIÓN EN EDIFICACIONES**

Por

JESUS ROBERTO VILLEGAS MENDEZ

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con orientacion en Materiales de
Construcción**

Junio 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**INCORPORACIÓN DE UN NANOCOMPUESTO HÍBRIDO DE DIÓXIDO DE
VANADIO-NANOTUBOS DE CARBONO EN UN MORTERO DE CEMENTO
PORTLAND Y UNA PASTA DE YESO PARA LA TERMORREGULACIÓN EN
EFIFICACIONES**

PRESENTA

ING. JESUS ROBERTO VILLEGAS MENDEZ

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con orientacion en Materiales de Construcción**

**DIRECTOR DE TESIS
DRA. MAYRA ZYZLILA FIGUEROA TORRES**

**CO-DIRECTOR
DR. JAVIER RODRIGO GONZALEZ LÓPEZ**

**EVALUADOR DE TESIS
DR. MIGUEL ANGEL GUERRA COSSÍO**

Junio 2022

**INCORPORACIÓN DE UN NANOCOMPUESTO HÍBRIDO DE DIÓXIDO
DE VANADIO-NANOTUBOS DE CARBONO EN UN MORTERO DE
CEMENTO PORTLAND Y UNA PASTA DE YESO PARA LA
TERMORREGULACIÓN EN EDIFICACIONES**

POR

JESUS ROBERTO VILLEGAS MENDEZ

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con orientacion en Materiales de Construcción**

Aprobación de la Tesis:

**DRA. MAYRA ZYSLILA FIGUEROA TORRES
DIRECTOR DE TESIS**

**DR. JAVIER RODRIGO GONZALEZ LÓPEZ
CO-DIRECTOR DE TESIS**

**DR. MIGUEL ANGEL GUERRA COSSÍO
EVALUADOR DE TESIS**

**DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE POSGRADO E INVESTIGACION DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**

**INCORPORACIÓN DE UN NANOCOMPUESTO HÍBRIDO DE
DIÓXIDO DE VANADIO-NANOTUBOS DE CARBONO EN UN
MORTERO DE CEMENTO PORTLAND Y UNA PASTA DE YESO
PARA LA TERMORREGULACIÓN EN EDIFICACIONES**

Este trabajo fue realizado en el laboratorio del Cuerpo Académico de Materiales Alternativos para Ingeniería (CAMAI) y los laboratorios de materiales de construcción pertenecientes a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, bajo la dirección de la Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres.

Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres

Dedicatoria

A **Dios** por brindarme la salud, el tiempo y las herramientas para cumplir mis metas y objetivos.

A **Mi Familia** que mantuvo su apoyo y confianza incondicional en mí para recorrer este camino.

A mi tía **Beatriz Adriana Villegas Mata** que durante mis estudios se mantuvo en una lucha constante hasta que partió al descanso eterno, por demostrar que sin importar las circunstancias se debe seguir luchando.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento de este trabajo de investigación por medio de la beca de maestría No. 1106862.

De igual forma, mi gratitud a la Facultad de Ingeniería Civil (FIC) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por las facilidades otorgadas para la caracterización microestructural de los materiales, uso de maquinaria y equipos así como al personal de los laboratorios por el apoyo brindado para realizar los experimentos.

Especialmente, reconozco el apoyo profesional y personal otorgado por la Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres, el Dr. Javier Rodrigo Gonzales López, el Dr. Miguel Ángel Guerra Cossío y al Dr. Fabián René Ruvalcava Ayala durante mis estudios de maestría ya que gracias a su guía logré generar habilidades académicas y de solución de problemas fuera de mi expectativa.

Además, agradezco infinitamente a mis padres, hermanos, abuelos, tíos y primos por estar presentes en cada paso de mi camino ya que solo gracias a ellos he podido ser capaz de buscar, encontrar y desarrollar comportamientos, habilidades y conocimientos que me han formado como persona que sirve a la sociedad.

Igualmente, mi gratitud a mis amigos el Lic. Raymundo Ramírez, el Ing. Ricardo Lira y el Ing. Juan Benítez por su respaldo y acompañamiento durante el tiempo dedicado a los estudios de maestría y que a pesar de las dificultades presentadas supimos sobrellevarlas y lograr nuestras metas.

Finalmente, reconozco a mis amigos y ti, aunque cuento con un reducido espacio para plasmarlos, ya que sin su escucha, consejos y pensamientos no hubiera sido capaz de sobrellevar situaciones mortificantes específicas. Y aclarando que, aunque el tiempo y espacio nos obligue a separarnos pueden contar conmigo para servirles mientras me sea posible.

Tabla de contenido

Capítulo	Página
1 Introducción	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Justificación.....	8
1.4 Hipótesis	9
1.5 Objetivos	9
1.5.1 Objetivo General	9
1.5.2 Objetivos Específicos.....	9
2 Antecedentes	11
2.1 Propiedades térmicas de los materiales	12
2.2 Materiales de Cambio de Fase (PCMs).....	12
2.2.1 Dióxido de Vanadio (VO ₂)	13
2.2.2 Conductividad térmica de los PCM.....	15
2.2.3 Nanotubos de Carbono Multiparedes (MWCNT)	15
2.3 Comportamiento térmico de la envolvente de una edificación	16
2.3.1 Pérdidas de calor en las construcciones	16
2.3.2 Materiales de construcción convencionales vs adicionados con PCM.....	17
2.4 Utilización de nanomateriales en materiales cementantes	19
2.5 Investigaciones previas de la utilización de PCMs	20
2.5.1 Aporte al ahorro energético al utilizar PCMs	22
3 Materiales y métodos	24
3.1 Materiales de Partida	25
3.2 Caracterización microestructural.....	26

3.3 Caracterización del agregado fino	27
3.3.1 Granulometría	27
3.3.2 Humedad, absorción y densidad	28
3.4 Preparación del nanocompuesto híbrido VO ₂ /MWCNT	30
3.5 Especímenes de prueba con y sin adición del nanocompuesto híbrido VO ₂ /MWCNT	31
3.5.1 Determinación de la relación agua/cemento	31
3.5.2 Determinación de la relación agua/yeso	32
3.5.3 Dosificación y elaboración de los morteros de CPC	32
3.5.4 Dosificación y elaboración de las pastas de yeso	34
3.6 Caracterización microestructural y física de los morteros y pastas con y sin adición del nanocompuesto híbrido VO ₂ /MWCNT	35
3.6.1 Densidad	35
3.6.2 Caracterización microestructural	35
3.6.3 Estudio de la cinética de hidratación	36
3.6.4 Angulo de contacto del agua.....	36
3.6.5 Resistencia al agua.....	36
3.6.6 Prueba de resistencia a la compresión	38
3.6.7 Propiedades térmicas	38
3.7 Modelación del comportamiento térmico de los morteros y pastas al utilizarse como recubrimientos	42
3.7.1 Contribución al ahorro energético derivado del uso del recubrimiento de los morteros y las pastas adicionados con 95 % VO ₂ /5 % MWCNT	43
4 Resultados y discusiones.....	45
4.1 Materiales de partida	46
4.1.1 Caracterización microestructural	46

4.1.2 Caracterización del agregado fino	50
4.2 Nanocompuesto híbrido VO ₂ /MWCNT	51
4.3 Especímenes de prueba con y sin adición del nanocompuesto híbrido VO ₂ /MWCNT	56
4.3.1 Determinación de la relación agua/material cementante	56
4.4 Densidad de los morteros	57
4.5 Caracterización microestructural de los morteros	58
4.6 Estudio de la cinética de hidratación de los morteros	65
4.7 Prueba de resistencia a la compresión de los morteros	67
4.8 Angulo de contacto del agua de los morteros.....	68
4.9 Resistencia al agua de los morteros.....	69
4.10 Propiedades térmicas de los morteros	72
4.11 Densidad de las pastas de yeso.....	77
4.12 Caracterización microestructural de las pastas de yeso.....	77
4.13 Estudio de la cinética de hidratación de las pastas de yeso.....	83
4.14 Prueba de resistencia a la compresión de las pastas de yeso.....	84
4.15 Angulo de contacto del agua de las pastas de yeso	84
4.16 Resistencia al agua de las pastas de yeso	85
4.17 Propiedades térmicas de las pastas de yeso.....	91
4.18 Modelación del comportamiento térmico de los morteros y pastas de yeso al utilizarse como recubrimientos	97
5 Conclusiones y recomendaciones.....	103
5.1 Conclusiones y Recomendaciones	104
6. Productos Generados.....	105
7. Referencias.....	106
8. Anexos	121

8.1 Glosario	121
Materiales Cementantes	121
Mecanismos de transferencia y Sistemas de almacenamiento de calor	123
Sistemas de Almacenamiento de calor	123

Lista de Tablas

Tabla	Página
Tabla 1. Propiedades físicas y térmicas del VO ₂ (M)	14
Tabla 2. Conductividad térmica de los PCM orgánicos e inorgánicos.	15
Tabla 3. Propiedades térmicas de materiales de construcción convencionales.....	18
Tabla 4. Estudios realizados a mezclas de cementantes adicionados con materiales de cambio de fase (PCM).....	21
Tabla 5. Aportación al confort térmico de materiales de construcción integrados con PCM	22
Tabla 6. Límites de material que pasa por tamaño de malla	27
Tabla 7. Dosificación de los morteros de CPC	33
Tabla 8. Dosificación de las pastas de yeso	34
Tabla 9. Composición química del CPC y yeso.....	46
Tabla 10. Tamaño medio de partícula y desviación estándar del CPC 30R, yeso y VO ₂	50
Tabla 11. Entalpías del VO ₂ y mezclas VO ₂ /MWCNT	53
Tabla 12. Conductividad térmica del VO ₂ puro y de la mezcla 95 % VO ₂ / 5 % MWCNT	56
Tabla 13. Resultados de prueba de fluidez.....	56
Tabla 14. Resultados de la prueba de vaso de saturación	57
Tabla 15. Cuantificación en %p del elemento vanadio en los morteros M0, M05, M1, M2 y M3	65
Tabla 16. Angulo de contacto del agua promedio y energía libre superficial de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3.....	69
Tabla 17. Comparación del tiempo y temperatura de calentamiento y enfriamiento de los morteros.....	75
Tabla 18. Cuantificación de sulfato de calcio hidratado y carbonato de calcio en las pastas	80
Tabla 19. Cuantificación en %p del elemento vanadio en las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2 a 7 días de edad	82

Tabla 20. Angulo de contacto del agua promedio y energía libre superficial de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2	85
Tabla 21. Análisis TGA de los yesos Y0, Y0, Y1 y Y2 después del método humedad-secado	89
Tabla 22. Cuantificación en %p del elemento vanadio en las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2 después de 6 ciclos de humedad-secado	91
Tabla 23. Comparación del tiempo de calentamiento y enfriamiento de los morteros...95	
Tabla 24. Densidad, conductividad térmica y calor específico de los materiales evaluados	97
Tabla 25. Código de las simulaciones realizadas y su arreglo constructivo	98
Tabla 26. Consumo eléctrico anual para la climatización de los sistemas constructivos simulados	99
Tabla 27. Comparación del uso de PCMs en construcciones para el ahorro energético	102

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 1. Cambio de fase del VO ₂ (M) a VO ₂ (T).....	14
Figura 2. Pérdida de calor en una construcción durante el verano e invierno	17
Figura 3. Comportamiento térmico de materiales de construcción convencionales vs materiales incorporados con PCM	18
Figura 4. Comportamiento térmico de materiales de construcción con PCM	19
Figura 5. Etapas del trabajo de investigación	25
Figura 6. Arreglo experimental para la evaluación del desempeño de los morteros y pastas como termorreguladores.....	41
Figura 7. Vista de planta de la unidad habitacional bajo simulación energética	42
Figura 8. Vista 3D de la unidad habitacional a simular	43
Figura 9. Difractogramas realizados al material de partida: a) Difractograma del CPC 30R, b) Difractograma del Yeso con fichas PDF, c) Difractograma del VO ₂ con fichas PDF y d) Difractograma de los MWCNT con fichas.....	47
Figura 10. Microscopías del material de partida, donde: a) CPC 30R, A: alita B: belita C: celita; b) Yeso, c) VO ₂ (M) y d) MWCNT	48
Figura 11. Análisis TGA/DTA al VO ₂	49
Figura 12. Comparación de las gráficas de distribución de tamaño de partícula: a) CPC 30R y yeso y b) VO ₂	49
Figura 13. Granulometría realizada a la arena caliza #4.....	50
Figura 14. Diagrama de flujo de calor del VO ₂ y mezclas de VO ₂ /MWCNT	52
Figura 15. Comparación de los difractogramas de las mezclas del nanocompuesto	53
Figura 16. Espectrogramas del VO ₂ puro y las mezclas 99 %/1 %, 95 %/5 % y 90 %/10 %	54
Figura 17. Análisis EDS elemental de las mezclas VO ₂ /MWCNT, donde a) 99 % VO ₂ /1 % MWCNT, b) 95 % VO ₂ /5 % MWCNT y c) 90 % VO ₂ /10 % MWCNT	54
Figura 18. Micrografías de: a) Dióxido de vanadio puro y b) 95 % VO ₂ /5 % MWCNT	55
Figura 19. Densidades de los morteros de CPC con y sin incorporación del NH	58
Figura 20, Difractogramas de los morteros: a) 3 días de edad y b) 7 días de edad.....	59

Figura 21. Difractogramas de los morteros: a) 14 días e edad y b) 28 días de edad.....	60
Figura 22. Espectrogramas de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3, donde: a) 3 días de edad, b) 7 días de edad, c) 14 días de esas y d) 28 días de edad	61
Figura 23. Microscopias de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3 a 3 días de edad.....	62
Figura 24. Microscopias de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3 a 7 días de edad.....	62
Figura 25. Microscopias de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3 a 14 días de edad...	63
Figura 26. Microscopias de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3 a 28 días de edad...	63
Figura 27. Microscopias (izquierda) y análisis EDS (derecha) a los morteros M05, M1, M2 y M3 con enfoque en el elemento vanadio	64
Figura 28. Diagramas de la cinética de hidratación de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3, donde: a) grafica de flujo de calor y b) grafica de calor acumulado	66
Figura 29. Comparación de resistencia a la compresión de los morteros de CPC 30R con y sin nanocompuesto a 3, 7, 14 y 28 días de edad	68
Figura 30. Angulo de contacto del agua de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3	69
Figura 31. Grafica de pérdida de masa y resistencia a la compresión de los morteros después de 16 ciclos de humectación-secado.....	70
Figura 32. Pérdida de masa de lo morteros durante el método humectación-secado	71
Figura 33. Grafica de absorción de agua de los morteros durante 16 ciclos de humectación-secado	71
Figura 34. Microscopia de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3 después de 16 ciclos de humectación-secado	72
Figura 35. Conductividad térmica de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3	73
Figura 36. Calor específico de los morteros de CPC	74
Figura 37. Graficas de la difusividad (a) y efusividad (b) térmica de los morteros.....	75
Figura 38. Grafica del comportamiento térmico de los morteros al someterlos a 40 °C y después a un enfriamiento a temperatura ambiente, donde: a) M0 vs M05, b) M0 vs M1, c) M0 vs M2 y d) M0 vs M3	76
Figura 39. Densidad de las pastas de yeso con y sin integración del NH.....	77
Figura 40. Difractogramas de las pastas de yeso a 7 días de edad.....	78
Figura 41. Espectrogramas de infrarrojo de las pastas de yeso a 7 días de edad.....	79
Figura 42. Análisis TGA de las pastas de yeso a 7 días de edad	80

Figura 43. Microscopias de las mezclas Y0, Y05, Y1 y Y2 a 7 días de edad	81
Figura 44. Microscopias (izquierda) y análisis EDS (derecha) a las pastas de yeso Y05, Y1 y Y2 con enfoque en el elemento vanadio	82
Figura 45. Diagramas de la cinética de hidratación de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2, donde: a) grafica de flujo de calor y b) grafica de calor acumulado.....	83
Figura 46. Resistencia a la compresión de las pastas con y sin nanocompuesto de yeso a 7 días de edad	84
Figura 47. Angulo de contacto del agua de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2.....	85
Figura 48. Grafica de pérdida de masa y resistencia a la compresión de las pastas de yeso con y sin adiciones después de 6 ciclos del método humedad-secado.....	86
Figura 49. Grafica de absorción de agua de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2 durante los 6 ciclos de humectación-secado	87
Figura 50. Difractogramas de las pastas de yeso después de 6 ciclos de humectación-secado.....	87
Figura 51. Espectrogramas de infrarrojo de los yesos Y0, Y05, Y1 y Y2 después de 6 ciclos de humectación-secado	88
Figura 52. Análisis TGA de los yesos Y0, Y05, Y1 y Y2 después de 6 ciclos de humectación-secado	89
Figura 53. Microscopias (izquierda) y análisis EDS (derecha) a las pastas de yeso Y05, Y1 y Y2 después de la prueba humedad-secado con enfoque en el elemento vanadio ...	90
Figura 54. Conductividad térmica de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2	92
Figura 55. Calor específico de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2.....	93
Figura 56. Graficas del comportamiento térmico de las pastas de yeso con y sin adición del NH, donde: a) Difusividad térmica y b) Efusividad térmica.....	94
Figura 57. Variación de temperatura respecto al tiempo de las pastas con y sin adición del NH cuando la temperatura exterior es de 40 °C, donde: a) Y0 vs Y05, b) Y0 vs Y1 y c) Y0 vs Y2	95
Figura 58. Variación de temperatura interna del inmueble sin uso de sistemas de climatización en la ciudad de Temosachic durante un día de verano.	100
Figura 59. Variación de temperatura interna del inmueble sin uso de sistemas de climatización en la ciudad de Temosachic durante un día de invierno.....	101

Figura 60. Sistemas de almacenamiento de calor124

Lista de abreviaturas

PCM: Material de cambio de fase (por sus siglas en ingles *phase change material*)

CO₂eq: Dióxido de carbono equivalente

VO₂: Dióxido de vanadio

MWCNT: Nanotubos de carbono multiparedes

SWCNT: Nanotubos de carbono de pared simple

VO₂/MWCNT: Nanocompuesto híbrido de dióxido de vanadio y nanotubos de carbono multiparedes

NH: Nanocompuesto Híbrido

CPC: cemento Portland compuesto

Cp: Calor específico

k: Conductividad térmica

α : Difusividad

ε : Efusividad

%p: Porcentaje en peso

%wt: Porcentaje en peso total

A.T.: Almacenamiento térmico

f'c: Resistencia a la compresión

AD: Aditivo dispersante

FRX: Fluorescencia de rayos X

DRX: Difracción de rayos X

ICDD: International Centre for diffraction

SEM: Microscopia electrónica de barrido

EDS: Espectroscopia de energía dispersiva

DTP: Determinación de tamaño de partícula

ASTM: American Society for Testing and Materials

%H: Porcentaje de humedad

%ABS: Porcentaje de absorción

DSC: Calorimetría diferencial de barrido

FTIR: Espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier

UNE: Una Norma Española

TGA/DTA: Termogravimetría y análisis térmico diferencial

Pm: Perdida de masa

ISD: US NOAA's Integrated Surface Database

PDF: Powder diffraction file

MTY: Monterrey Nuevo León, México

TMC: Temosachic Chihuahua, México

CDMX: Ciudad de México, México

S-L: Sólido - Líquido

S-S: Sólido - Sólido

RESUMEN

Jesus Roberto Villegas Mendez

Fecha de Graduación: Junio, 2023

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Título del Estudio: INCOPORACIÓN DE UN NANOCOMPUESTO HÍBRIDO DE DIÓXIDO DE VANADIO-NANOTUBOS DE CARBONO EN UN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND Y UNA PASTA DE YESO PARA LA TERMORREGULACIÓN EN EDIFICACIONES

Número de páginas: Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción

Área de Estudio: Materiales de construcción energéticamente eficientes

Propósito y Método del Estudio: En la actualidad, el desarrollo de materiales de construcción sustentables se ha vuelto crucial para la reducción del alto consumo energético en el mundo. El dióxido de vanadio (VO_2) es un material de cambio de fase (PCM) sólido-sólido que ha tenido un nulo estudio en su uso para dotar a los materiales de construcción convencionales con propiedades termorreguladoras a fin de disminuir la utilización de los sistemas climatización en edificaciones. En el presente trabajo se llevó a cabo la integración de un nanocompuesto híbrido de dióxido de vanadio con nanotubos de carbono en un mortero de CPC y una pasta de yeso a fin de dotar a estos materiales con la capacidad de modular la temperatura interior de una edificación de acuerdo a los cambios de la temperatura exterior sin perjudicar el comportamiento físico-mecánico de estos cerámicos. Durante la realización de esta investigación se aplicaron técnicas de caracterización microestructural, física, mecánica y térmica para la evaluación de los cerámicos modificados. También, se llevó a cabo la simulación virtual de la utilización de los materiales con integración del nanocompuesto como recubrimiento de una construcción a fin de determinar la aportación al ahorro energético derivado de la utilización de estos sistemas.

Contribuciones y Conclusiones: La evaluación del comportamiento microestructural, físico, mecánico y térmico de los cerámicos estudiados dio como resultado que la integración del NH en un mortero de CPC y una pasta de yeso no modifica el desarrollo de fases de hidratación ni resistencia al agua. Además, el nanocompuesto no perjudica el desempeño mecánico de estos cerámicos. Con ello, se demostró la compatibilidad físico-microestructural del NH con el mortero y el yeso, los cuales desarrollaron propiedades térmicas que permiten la termorregulación en una edificación. Finalmente, la simulación energética del uso de los cementantes como un recubrimiento exterior e interior indicó que estos materiales tienen la capacidad de aportar hasta un 2.23% de ahorro energético anual a causa de la disminución de la utilización de sistemas de climatización en una edificación.

DRA. MAYRA ZYLLILA FIGUEROA TORRES
DIRECTOR DE TESIS

ABSTRACT

Jesus Roberto Villegas Mendez

Graduation date: June, 2023

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Research title:

**VANADIUM DIOXIDE-CARBON NANOTUBES HYBRID
NANOCOMPOSITE ENBEDDEN IN A CEMENT PORTLAND
MORTAR AND A GYPSUM PASTE AS THERMAL
REGULATOR IN CONSTRUCTIONS**

Pages:

Master degree on Science with Orientation in Construction Material
candidate

Research area: Energetically efficient construction materials

Purpose and Study method: Nowadays, sustainable building materials development has become crucial for worldwide high energy consumption reduction. Vanadium dioxide (VO_2) is a solid-solid phase change material (PCM) that has had no study on its use to provide conventional construction materials with thermoregulatory properties in order to reduce the use of air conditioning systems in buildings. In the present research, the integration of a hybrid nanocomposite of vanadium dioxide with carbon nanotubes in a CPC mortar and a plaster paste was carried out in order to provide these materials with the ability to modulate the interior temperature of a building according to changes in outside temperature without affection on its physical-mechanical behavior of these ceramics. During this research, microstructural, physical, mechanical and thermal characterization techniques were applied for the evaluation of modified ceramics. Also, the virtual simulation of the use of materials with integration of the nanocomposite as a coating of a construction was carried out in order to determine the contribution to energy savings derived from the use of these systems.

Contributions and conclusions: The evaluation of the microstructural, physical, mechanical and thermal behavior of the studied ceramics gave as a result that the integration of NH in a CPC mortar and a gypsum paste does not modify the development of hydration phases or resistance to water. In addition, the nanocomposite does not affect the mechanical performance of these ceramics. That being said, the physical-microstructural compatibility of NH with mortar and gypsum plaster was demonstrated, which developed thermal properties that enable building thermoregulation. Finally, the energy simulation of the use of cementitious materials as an exterior ad interior coating indicated that these materials have the capacity to provide 2.23 % annual energy saving due to the reduction in the use of air conditioning systems in a building.

DRA. MAYRA ZYZZLILA FIGUEROA TORRES
THESIS DIRECTOR

1 Introducción

1.1 Introducción

La búsqueda del ser humano por mantener el progreso de la sociedad está íntimamente ligada a la creciente demanda de energía y el deterioro ambiental. En específico, el sector vivienda y construcción poseen un papel trascendente como propiciadores de bienestar social debido a que satisfacen necesidades básicas de la sociedad. No obstante, son de las principales actividades humanas que contribuyen significativamente al deterioro ambiental. Por un lado, la fabricación de materiales de construcción participa en el agotamiento de recursos no renovables debido a la extracción de materia prima y el alto consumo de combustibles fósiles. Por el otro, la creciente demanda energética para el funcionamiento de las edificaciones, donde la mayoría de este consumo se emplea para la operación de los sistemas de climatización a fin de proporcionar un confort térmico al interior. De modo que, el consumo energético de las edificaciones representa una gran huella en el futuro energético del mundo y en los patrones de emisión de CO₂eq al medio ambiente.

Una de las principales áreas de oportunidad para remediar la situación del consumo de energía del sector construcción es la mejora de los materiales que se utilizan en la envolvente de una edificación (muros externos y techos). Una opción prometedora es la incorporación de materiales de cambio de fase o PCMs (por sus siglas en inglés Phase Change Materials) en materiales cementantes a fin de dotarlos de propiedades térmicas que propicien la termorregulación en edificaciones. Los PCMs tienen la capacidad de almacenar o liberar energía térmica en forma de calor latente. De esta manera, les es posible modular las variaciones de temperatura, almacenando y liberando el calor de manera automática respecto a los cambios de temperatura de su entorno. Los PCMs más utilizados son los que modifican su fase de sólido a líquido (S-L), debido a su alto almacenamiento térmico y puntos de fusión bajos. No obstante, se requieren grandes adiciones del PCM para dotar a los materiales con la capacidad de almacenar calor y la mayoría presenta escurrimientos durante su cambio de fase, a causa de esto, suelen encapsularse al incorporarse a materiales de construcción, pero la expansión térmica del material cambio de fase provoca el rompimiento de las capsulas provocando afectaciones

mecánicas y fugas del PCM. Estas problemáticas evidencian la incompatibilidad de los PCM sólido-líquido con los materiales de construcción. Otro tipo de PCM con menor área de estudio son los sólido a sólido (S-S), los cuales almacenan una menor cantidad de calor y tienen puntos de fusión más altos que los anteriores, pero, no sufren escurrimientos y suelen tener mejor compatibilidad con los materiales cementantes al conservar su estado sólido durante su cambio de fase. En general, uno de los principales retos en el uso de PCM consiste en modular su conductividad térmica, con tal de proporcionar una respuesta más dinámica al almacenar y liberar calor. Cosa que se ha logrado con el uso de materiales base carbono en conjunto con los PCMs.

En este trabajo de investigación se estudió la incorporación de un PCM híbrido con cambio de fase sólido-sólido formado por dióxido de vanadio (VO_2) con nanotubos de carbono multiparedes (MWCNT) en un mortero de cemento Portland compuesto (CPC) y una pasta de yeso. Con la finalidad de desarrollar cementantes con la capacidad de almacenar calor, que actúen como reguladores térmicos en edificaciones y se empleen principalmente en su envolvente. Además, se investigó el efecto del porcentaje de adición del nanocompuesto VO_2/MWCNT en: la capacidad de almacenamiento térmico, conductividad térmica, trabajabilidad, cinética de hidratación, desarrollo de fases hidratadas, resistencia al agua y resistencia a la compresión de los morteros y las pastas. Lo cual se correlacionó con el grado de dispersión e interacción a nivel microestructural entre la matriz y los materiales adicionados.

1.2 Planteamiento del problema

El aumento de la población y economía mundial desemboca en el aumento de la demanda y consumo de energía [1]. Se estima que, del consumo total de energía bruta en el mundo, el 40% es utilizada por el sector de la construcción [1, 2]. De este porcentaje, el 70% es empleado para la iluminación y, en gran medida, para el funcionamiento de sistemas de calefacción y refrigeración en las edificaciones [2, 3].

La cantidad de energía destinada a sistemas de regularización térmica se relaciona directamente con el requerimiento de la población de mantener el confort térmico al interior de los edificios. Lo cual resulta preocupante, ya que se interpreta como un aumento en las variaciones térmicas a las que las construcciones están expuestas debido a la radiación infrarroja emitida por el sol hacia la tierra. La interacción de esta emisión con algún tipo de materia provoca movimiento vibratorio-rotacional en sus átomos, lo que genera un aumento en la temperatura de la materia con la que interacciona [4]. Por un lado, durante el verano la exposición de la envolvente (muros, techos y piso) de una edificación a la radiación solar durante la mayor parte del día, provoca un flujo de calor continuo hacia al interior debido al diferencial de temperatura [5]. Por el otro, en invierno la transferencia de calor se da en sentido contrario, donde el calor del interior de las construcciones fluye hacia el exterior debido a la baja temperatura derivando en pérdidas de calor [5]. Estos fenómenos acarrearán variaciones de temperatura al interior de las construcciones debido a que la inercia térmica de los materiales tradicionales (ladrillo, block, concreto) es demasiado baja, en otras palabras, su temperatura varía con mayor facilidad [6–9].

Debido a esto, resulta destacable la necesidad de dotar a los materiales cerámicos, utilizados en la envolvente de las construcciones, de propiedades térmicas que propicien la termorregulación en las edificaciones. Una de las alternativas ampliamente estudiadas para este fin es la incorporación de PCMs en cementantes como el yeso, CPC, estuco, bloques de tierra y concreto, por mencionar algunos; para propiciar el almacenamiento-liberación del calor que envuelve a la edificación [1, 10, 11].

La mayoría de investigaciones sobre la incorporación de PCMs en materiales para construcción involucran el uso de PCMs sólido a líquido, los cuales en su mayoría son orgánicos como parafinas y ceras. Estos cuentan con alta capacidad de almacenamiento térmico de entre 60 y 230 J/g [12], pero, sufren escurrimientos durante su transición por lo que se suelen encapsular. Sin embargo, dicho proceso afecta los enlaces físicos entre las moléculas del PCM y la matriz cementante, además, la expansión térmica de los PCMs provoca el rompimiento de los contenedores traduciéndose en la afectación del comportamiento mecánico del material modificado y fugas del PCM [13].

Las conclusiones de varios trabajos de investigación han encontrado que se requieren adiciones de PCM S-L mayores al 20% en función del peso total del material para obtener un calor latente alrededor de los 20 J/g, el cual se traduce a la reducción en la temperatura interior de una construcción de entre 2 y 3 °C durante el verano [10, 14, 15]. No obstante, se observa que una adición a materiales cementantes mayor a 5% ocasiona: Aumento de la cantidad de agua de mezcla en más de un 20% e incremento de hasta un 40% en la cantidad de macroporos con diámetros de hasta 3 veces más grandes en comparación de una mezcla sin adiciones [16]. Además, se han encontrado afectaciones en la hidratación de los cementantes a causa del rompimiento de las microcápsulas contenedoras del PCM, puesto que el material cambio de fase derramado rodea las partículas del aglutinante quedándose sin reaccionar con el agua de mezcla [16, 17]. El incremento en la cantidad de poros y afectación en la hidratación del cementante aunado a la baja cohesión entre el PCM sólido-líquido y la matriz cerámica, se relaciona con la reducción en la resistencia a la compresión de los materiales de construcción, la cual se ha reportado de hasta en un 75% con adiciones mayores al 5% de PCM [15, 16].

Por otro lado, los PCMs de S-S presentan menor almacenamiento térmico (30 a 100 J/g) en comparación con los mencionados anteriormente; pero cuentan con un punto de fusión alto por esta razón no necesitan ser encapsulados [18]. Estas características propician una mejor compatibilidad al mezclarse con un cementante, ya que se tiene una mejor interacción de enlaces físicos entre sus moléculas [18]. Además, le otorgan al material mayor estabilidad y durabilidad durante su desempeño [19].

La aplicación de PCMs en materiales cerámicos como revestimiento se ve afectada por su baja conductividad térmica, esto provoca que no logren captar y liberar de manera eficiente el calor del ambiente [20]. Una de las formas para mejorar la conductividad térmica de este tipo de revestimientos es la adición de materiales con alta conducción térmica [1]. Diversos autores han adicionado materiales base carbono (carbón activado, nanotubos de carbono, grafeno y grafito) a mezclas de materiales cerámicos con PCMs, donde, presentaron un aumento de más del doble de la conductividad respecto al mismo material sin adiciones [1, 21, 22].

A pesar de las destacables ventajas del uso de PCMs sólido-sólido sobre los sólido-líquido su estudio ha sido poco abordado, a causa de esto se ha omitido la investigación de diversos PCMs con estas propiedades. Tal es el caso del VO₂ en su fase cristalina monoclinica, el cual destaca por sus aplicaciones en sistemas de almacenamiento de calor y conversión de energía [23, 24]. Sin embargo, este compuesto no ha sido estudiado como PCM en materiales de la industria de la construcción. Por ello, en este proyecto de investigación se planteó el uso de VO₂ como PCM en conjunto con un mejorador de conductividad térmica como lo son los nanotubos de carbono multiparedes (MWCNT) a fin de formar un nanocompuesto híbrido de VO₂/MWCNT, el cual se incorporó a un mortero de CPC y una pasta de yeso para evaluar su comportamiento térmico en función del porcentaje de adición que fue entre 0.5 y 3 %p del cementante.

Como ya se mencionó, se han realizado numerosas investigaciones relacionadas con el uso de PCMs en materiales de construcción. Sin embargo, estos se han enfocado en el análisis térmico y de resistencia a la compresión [25, 26]. Por ello, resulta de alto interés evaluar otras propiedades que pudieran modificarse a causa de estas adiciones; por un lado, la cinética de hidratación, la cual, al ser un proceso térmico, que se desarrolla tanto en el CPC como el yeso, podría alterarse debido al almacenamiento de calor por el PCM. Por otra parte, la tendencia del nanocompuesto híbrido a ocupar espacios vacíos dentro de los cerámicos [27], lo cual se puede relacionar con la densificación de las mezclas y una mejora en la resistencia al agua. La evaluación de estas características definiría: si el mortero mejora su desempeño convencional o ante la humedad al aplicarse en exteriores

o si un yeso adicionado con el nanocompuesto podría ser utilizado en zonas expuestas a la humedad.

Por ello, en esta investigación tambien se estudió el efecto de la adición del VO₂/MWCNT en propiedades como la trabajabilidad, hidratación de los cementantes, resistencia al agua y resistencia a la compresión de los morteros y las pastas. A partir de las propiedades térmicas desarrolladas en los cementantes, se estimó el aporte al ahorro energético que podría proporcionar el material al aplicarse en la envolvente de una edificación.

1.3 Justificación

El calentamiento global ha propiciado un aumento en la radiación térmica que reciben las edificaciones, lo que se relaciona con el aumento en el uso de sistemas de climatización en las construcciones para proporcionar confort térmico [28]. Por ello, es de amplia conveniencia investigar materiales de construcción con propiedades térmicas específicas que mitiguen la entrada de calor hacia el interior de un edificio durante el verano, y que también, eviten la pérdida de calor al interior durante las estaciones frías.

Este trabajo de investigación nace de la posibilidad de desarrollar en los materiales de construcción tradicionales (mortero de CPC y yeso) la capacidad de absorber-liberar calor en función de los cambios de temperatura ambiental para favorecer el confort térmico en las edificaciones. Para ello, se planteó la incorporación de un nanocompuesto híbrido de VO₂/MWCNT en un mortero de CPC y una pasta de yeso. Con ello, fue posible establecer la relación entre la cantidad de NH adicionada y la capacidad de almacenamiento de calor en el yeso y el mortero. Asimismo, se estudió el efecto de las adiciones del nanocompuesto en la trabajabilidad, hidratación de los cementantes, resistencia al agua y resistencia a la compresión de los morteros y las pastas. De las cuales, la cinética de hidratación y resistencia al agua han sido variables a las que se les ha dado nulo seguimiento en las investigaciones relacionadas con el uso de PCMs. Por lo que, los resultados obtenidos generaron información trascendente para conocer su influencia en dichas propiedades, las cuales son indispensables y se encuentran estandarizadas en los materiales de construcción como parte de los requerimientos de calidad y durabilidad en las edificaciones. La metodología desarrollada en esta investigación servirá de base para incorporar este tipo de PCMs en otros materiales de construcción.

La obtención de propiedades termorreguladoras en el CPC y el yeso demuestra el amplio potencial de utilizarlos para construir en la envolvente de las edificaciones a fin de contribuir al ahorro de energía. Lo que podría generar un ahorro energético derivado de la disminución del uso de sistemas de climatización.

Asimismo, esta investigación contribuyó a establecer los rangos de adición de VO₂ y MWCNT que propicien mejor almacenamiento y conductividad térmica.

1.4 Hipótesis

La modificación de un mortero de cemento Portland compuesto y una pasta de yeso mediante la adición en cantidades controladas de un nanocompuesto híbrido de VO₂/MWCNT permitirá desarrollar un material cementante con la capacidad de almacenar-liberar calor a través de una respuesta automática en función de los cambios ambientales de temperatura, con la finalidad de regular la temperatura al interior de una edificación, sin que el cementante presente afectaciones en su desempeño físico-mecánico en comparación de un mortero de CPC y una pasta de yeso sin adiciones.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Analizar el efecto de la adición de un nanocompuesto VO₂/MWCNT en diferentes porcentajes en un mortero de cemento Portland compuesto y una pasta de yeso mediante la determinación de su capacidad de almacenamiento-liberación de calor, conducción térmica y desempeño físico-mecánico para su uso como termorregulador en la envolvente de una construcción.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Determinar la proporción en %p de VO₂ y MWCNT, en el nanocompuesto, que ofrezca un equilibrio entre la cantidad de calor almacenada y la conductividad térmica para su adición en un mortero de CPC y una pasta de yeso.
- Evaluar el comportamiento térmico y microestructural del nanocompuesto VO₂/MWCNT mediante calorimetría diferencial de barrido, difracción de rayos X

y microscopia electrónica de barrido con el fin de comprobar su almacenamiento térmico y la interacción entre los MWCNT y VO₂ como un material híbrido.

- Evaluar la dispersión y propiedades microestructurales de acuerdo con la cantidad adicionada del VO₂/MWCNT en los cementantes por medio de técnicas de caracterización microestructural y pruebas de trabajabilidad, resistencia al agua y resistencia a la compresión de las pastas y morteros para definir el efecto de la adición del nanocompuesto en las mezclas.
- Estudiar la cinética de hidratación de los cementantes con el nanocompuesto mediante la técnica de calorimetría isotérmica y compararla con la cinética de hidratación convencional en relación con el porcentaje de adición del nanocompuesto.
- Determinar la capacidad de almacenamiento y la conductividad térmica de un mortero de CPC y una pasta de yeso con diferentes porcentajes de adición del nanocompuesto.
- Calcular el aporte al ahorro energético que propiciaría los materiales a partir de las propiedades térmicas de los morteros de CPC y las pastas de yeso mediante los softwares OpenStudio y Energy Plus para relacionarlo con la contribución a la eficiencia energética que podría derivarse del uso de estos cementantes.

2 Antecedentes

2.1 Propiedades térmicas de los materiales

La respuesta de un material al ser calentado es llamada propiedad térmica [29]. Tanto el calor específico, la conductividad térmica, la difusividad térmica y la efusividad térmica son atributos que tienen un impacto directo en la inercia térmica de los materiales de construcción. De estos depende la cantidad, velocidad y facilidad con la que el calor fluirá a través de los materiales [8–10, 30, 31].

- Calor específico (C_p): Se define C_p como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un kilogramo de materia en un grado centígrado, sus unidades son Joules/ Kilogramo*Grado centígrado ($J/Kg^{\circ}C$) [32].
- Conductividad térmica (k): La k es la facilidad con que se transfiere el calor a través de un material durante un diferencial de temperatura y se mide en Watts/metro*Kelvin (W/mK) [33].
- Inercia térmica: Esta propiedad define la dificultad de que presenta un material para cambiar su temperatura, se pueden identificar 2 indicadores de esta característica: la difusividad y la efusividad [8, 9].
- Difusividad (α): La difusividad es un indicador de la velocidad con la que el calor fluye a través de determinado material, sus unidades son metros*segundo (m/s) [10].
- Efusividad (ϵ): La ϵ indica la sencillez con la que un determinado material puede intercambiar calor con su entorno y se cuantifica en Watts*segundo^{1/2}/Kelvin*metro cuadrado ($Ws^{1/2}/K \cdot m^2$) [10].

2.2 Materiales de Cambio de Fase (PCMs)

Los materiales de cambio de fase son aquellos capaces de almacenar calor de forma latente mediante un cambio en su estado de la materia ya sea sólido, líquido o gas. Este tipo de almacenamiento resulta el más eficaz ya que se sabe que estos materiales absorben mayor cantidad de calor en relación con su cambio de volumen [34]. Los PCMs han sido

ampliamente estudiados en materiales de construcción con el fin de mejorar el confort térmico al interior de las edificaciones [12, 18]. Con la incorporación de PCMs en materiales de construcción convencionales se ha encontrado que estos absorben una fracción del calor del ambiente cuando la temperatura exterior incrementa, este efecto disminuye el flujo de calor disponible para penetrar al interior [1, 3]. Después, cuando la temperatura exterior desciende, el calor almacenado en el PCM es liberado de vuelta a la intemperie. Este comportamiento está íntimamente ligado a la temperatura de cambio de fase (T_c) y al calor específico (C_p) del PCM, ya que de estas propiedades depende el calor latente y la temperatura a la que se presenta el fenómeno almacenamiento-liberación del mismo [20]. Existen 3 tipos de PCMs, los cuales se describen brevemente a continuación.

- **Orgánicos:** En su mayoría ceras y parafinas, se caracterizan por presentar un cambio de fase sólido a líquido, bajos puntos de fusión (de 20 a 32 °C) y baja conductividad térmica (<1 W/mK)[12].
- **Inorgánico:** Estos incluyen sales hidratadas, metales y cerámicos, destacan por tener temperaturas de transición mayores a las expuestas por los PCMs orgánicos y un cambio de fase sólido-sólido [18].
- **Eutécticos:** son materiales formados con dos o más compuestos, los cuales tienen puntos de transición semejantes, pueden ser combinación de PCMs orgánicos e inorgánicos [20].

2.2.1 Dióxido de Vanadio (VO_2)

El Dióxido de Vanadio (VO_2) es un semiconductor que tiene múltiples formas cristalinas, cada una de ellas cuenta con propiedades distintas [23]. Entre estas, destaca el dióxido de vanadio monoclinico (VO_2 (M)) por sus características como PCM [24]. La tabla 1 muestra algunas de las propiedades más características de este material, donde destacan una alta densidad y calor específico, lo que le permite al VO_2 almacenar una alta cantidad de calor respecto a su volumen [12]. Además, se observa una baja conductividad térmica característica de los PCMs y una baja difusividad térmica, la cual indica la capacidad de disminuir el flujo de calor a través del material [35].

Tabla 1. Propiedades físicas y térmicas del VO₂ (M)

Propiedad (a 25 °C)	Estimación	Referencia
Densidad (g/cm ³)	2.75	[36]
Calor específico (J/KgK)	1960	[37]
Conductividad térmica (W/mK)	0.6	[36]
Difusividad térmica (mm ² /s)	0.2	[36]

En su artículo Minsu y col. especifican que las propiedades térmicas del VO₂(M) dependen de su pureza, defectos cristalinos y proceso de sintetización. De igual forma, aclara que la temperatura de transición de aislante a conductor es alrededor de 68°C [38]. Al realizar esta transición modifica su estructura cristalina de monoclinica a tetragonal (figura 1). Durante este proceso de reorganización el compuesto almacena una cantidad de calor específica [23].

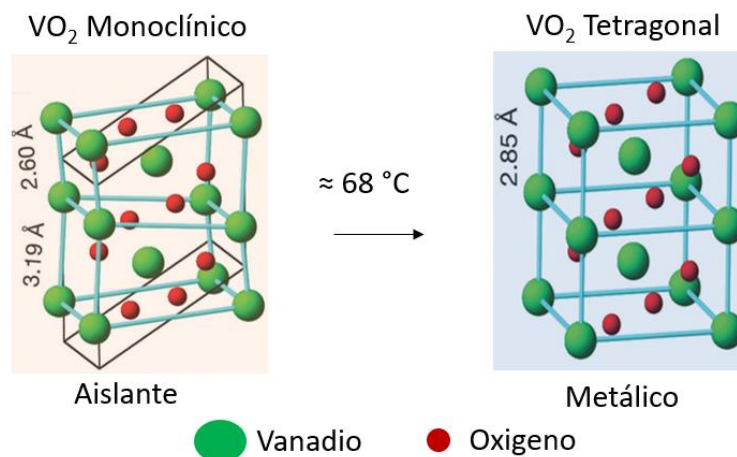


Figura 1. Cambio de fase del VO₂ (M) a VO₂ (T)

Nota. Adaptado de Schematic of cristal structure of VO₂ in the a) metallic and b) insulating states. V ions: larger and green balls; O ion: smaller and red balls. Reproduced with permission. Copyright 2015. Nature. Schematic of electronic band structure of c) VO₂ (R) and d) VO₂ (M) based on crystal-field model. Reproduced with permission. Copyright 2013, Nature (p. 4), por Ming Li y col., 2017 [23].

Por otra parte, Chen y col. analizaron el calor que puede absorber el VO₂(M) al ser sintetizado a distintas temperaturas: 240°C, 270°C, 300°C, 330°C y 390°C. Se obtuvieron

las siguientes cantidades de almacenamiento de calor: 13 J/g, 25.5 j/g, 40.1 J/g, 42.1 J/g y 43.0 J/g, respectivamente. Con ello se pudo definir que el proceso de sinterización del VO₂(M) tiene impacto en el calor latente del material [39].

2.2.2 Conductividad térmica de los PCM

A pesar de las destacables propiedades térmicas de los PCM como almacenadores de energía térmica, su utilización se ve limitada por su baja conductividad térmica [40]. En la tabla 2 se registran los rangos de conductividad de algunos tipos de PCMs, donde se observa en general que es menor a 5 W/mK. Esto afecta la dinámica de recepción y liberación de calor del PCM, puesto que, cuenta con una menor facilidad para absorber y desprender el calor de su entorno [21]. Por ello, se han realizado estudios relacionados con el mejoramiento de esta propiedad. Uno de los métodos aplicados, con resultados favorables, es la adición de materiales base carbono en la matriz del PCM [1, 21, 26]. En la sección 2.5 de este documento se presentarán algunos resultados obtenidos por investigaciones relacionadas con la mejora de la conductividad térmica de los PCM.

Tabla 2. *Conductividad térmica de los PCM orgánicos e inorgánicos.*

PCM	Conductividad térmica (W/mK)	Referencia
Orgánico	0.1 - 0.36	[18]
Inorgánico	0.32- 5	

2.2.3 Nanotubos de Carbono Multiparedes (MWCNT)

Los nanotubos de carbono son una forma alotrópica del carbono como lo son el diamante, grafito y grafeno. Estos son láminas de grafeno enrolladas en forma de tubos con diámetro dentro de la escala nanométrica y longitudes variables que van desde unas cuantas micras hasta milímetros [41]. Pueden sintetizarse con una sola lamina de grafeno (SWCNT) y de

múltiples laminas (MWCNT) [41]. Respecto a su conductividad térmica, De la Vega demostró que a temperatura ambiente los nanotubos tienen una conductividad de 6600 W/m.K [42]. Este valor destaca la viabilidad del material a ser utilizado como mejorador de conductividad térmica de PCMs.

2.3 Comportamiento térmico de la envolvente de una edificación

2.3.1 Perdidas de calor en las construcciones

Las edificaciones están continuamente expuestas a los cambios de temperatura externa durante su vida útil. Este fenómeno se torna un problema cuando estas no tienen la capacidad de mitigar el flujo de calor afectando directamente el confort térmico de sus habitantes [43]. La figura 2 ilustra los porcentajes de pérdida-ganancia de calor según el elemento constructivo de una determinada construcción, donde, gran parte de la energía es transferida por los muros y techos [43]. Estos porcentajes están íntimamente relacionados con el tipo de material utilizado para construir estos elementos. Por lo que es de gran importancia emplear materiales de construcción térmicamente adecuados para disminuir el flujo de calor a través de los muros y paredes.

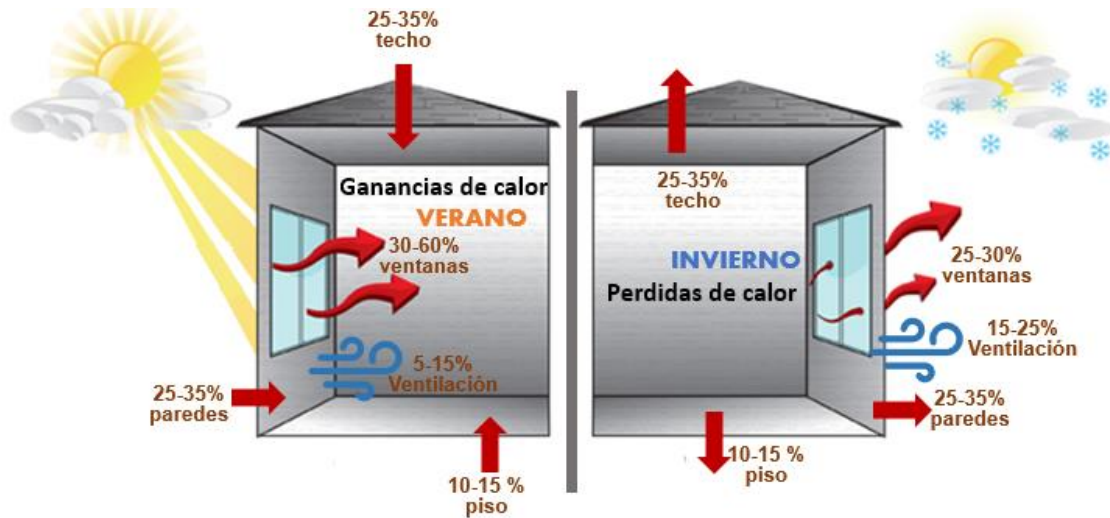


Figura 2. *Perdida de calor en una construcción durante el verano e invierno*

2.3.2 Materiales de construcción convencionales vs adicionados con PCM

La figura 3 a) ilustra el comportamiento térmico de un muro revestido con un material convencional. Donde, mediante el mecanismo de conducción térmica el calor fluye a través del revestimiento y bloques o tabiques hacia el interior de la construcción. Posteriormente, el aire del interior incrementa su temperatura a causa del flujo de calor [5]. Esta interacción depende, principalmente, de la inercia térmica de los materiales que integran la envolvente, donde, los más utilizados son: yeso, concreto y tabiques de arcilla cocida [44].

La tabla 3 contiene propiedades térmicas de algunos materiales de construcción convencionales. Se observa que la conductividad térmica es superior a la de los materiales aislantes (0.05 W/mK) [45]. Por ello, estos materiales no pueden disminuir el flujo de calor hacia al interior y su C_p es lo suficientemente baja para incrementar la temperatura de su entorno durante largos periodos de tiempo [46].

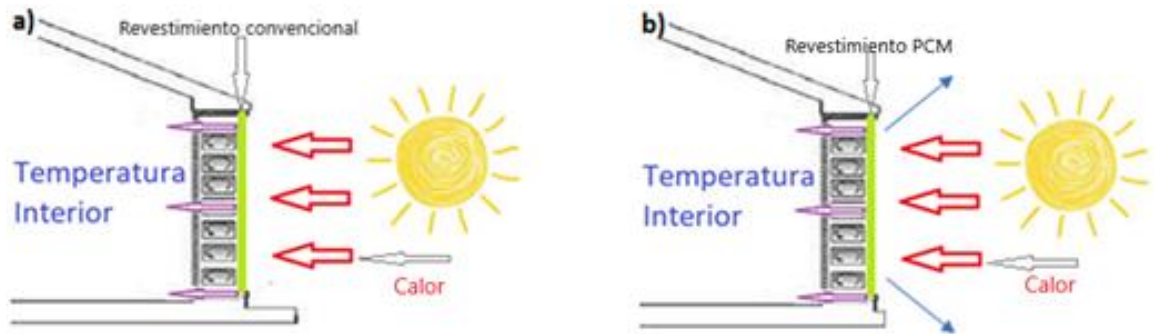


Figura 3. Comportamiento térmico de materiales de construcción convencionales vs materiales incorporados con PCM

Tabla 3. Propiedades térmicas de materiales de construcción convencionales

Material	Conductividad Térmica (W/mK)	Calor específico (J/KgK)	Referencia
Mortero	1.17	1263	[25]
Ladrillo de Arcilla	0.73	836	[3]
Yeso	0.47	850	[47]

Por otro lado, la figura 3 b) muestra el mecanismo de funcionamiento de un recubrimiento con PCM. El cual, recibe el calor de la radiación solar, luego almacena una fracción del mismo, después una parte es liberada de regreso a la intemperie y el resto es aprovechada para calentar la construcción cuando la temperatura exterior desciende [34]. El resto es transmitido por conducción a los materiales adyacentes hasta el interior de la construcción.

A pesar de las generalidades que presenta el mecanismo de respuesta de los PCM al ser incorporados a revestimientos cerámicos, se considera importante describir el funcionamiento esperado en los materiales bajo investigación en el presente proyecto.

La figura 4 ilustra los dos mecanismos de funcionamiento planteados para el recubrimiento incorporado con el nanocompuesto VO₂/MWCNT. En el primero (figura 4 a), cuando la temperatura exterior es mayor a la temperatura del revestimiento, el flujo de calor se dará por conducción a través de la cara expuesta del material, transmitiéndose hacia el nanocompuesto donde se almacenará una fracción del calor, reduciendo así la cantidad de energía térmica disponible para transmitir a la cara opuesta del recubrimiento.

En el segundo escenario (figura 4 b), cuando la temperatura exterior sea menor a la del revestimiento, el calor almacenado por el nanocompuesto será liberado al ambiente, a causa de la disminución de temperatura, manteniendo así el sistema en equilibrio térmico. Este mecanismo de respuesta tiene la versatilidad de ser implementado, por una parte, en verano para disminuir el flujo de calor hacia el interior de una edificación, y por la otra, en invierno para reducir las pérdidas de calor del interior de una construcción debido a las bajas temperaturas exteriores.

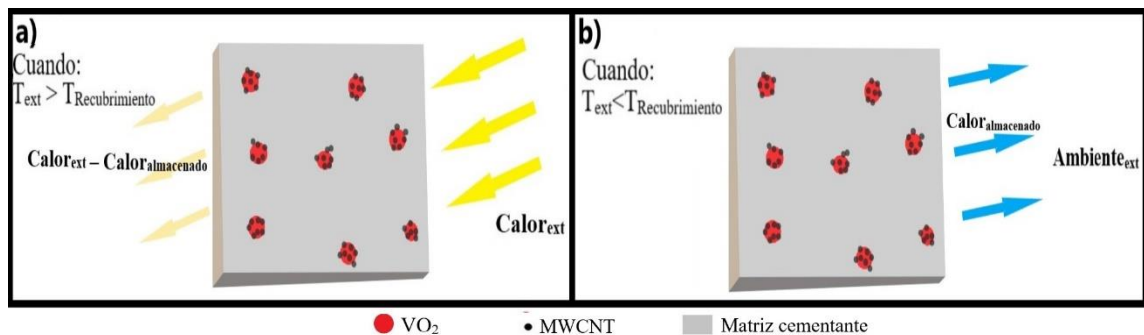


Figura 4. Comportamiento térmico de materiales de construcción con PCM

2.4 Utilización de nanomateriales en materiales cementantes

En la actualidad, los nanomateriales tienen un gran impacto en el desarrollo tecnológico a causa de las destacables propiedades físico-mecánicas con las que cuentan. En el sector de la construcción se ha implementado su uso en conjunto con materiales cementantes a fin de propiciar un mejor desempeño mecánico, especialmente en los concretos de cemento Portland. Tal es el caso de Silvestro y col. quienes compararon estudios relacionados con la adición de nanotubos de carbono en materiales a base de cemento Portland. En dicho estudio sobresalen las siguientes conclusiones: el contenido óptimo de adición de nanotubos que mejora la compresión, flexión y tensión de las pastas y morteros es de 0.1% de la masa total; la hidrofobia y enlaces físicos que se generan entre los nanotubos propician problemas de dispersión dentro de las pastas y morteros [48].

Por otro lado, Marcondes y col. en su artículo realizaron dos mezclas de concreto con adición del 0.3%p del cementante de nanotubos de carbono. A una mezcla le aplicaron 1 hora de ultrasonido para mejorar la dispersión del nanomaterial, mientras que la segunda se elaboró sin dispersión. En los resultados, se observó que la resistencia a la compresión de los especímenes con dispersión mejoró un 14% respecto a los especímenes sin dispersión. Además, se obtuvo un incremento del 12% en la absorción de agua en las muestras sin ultrasonificar. Concluyeron que la aplicación de ultrasonido mejora significativamente la dispersión de los nanotubos de carbono dentro de mezclas de concreto. [49].

En general, la revisión bibliográfica indica que la incorporación de nanocompuestos en los materiales cementantes genera una matriz más densa al ocupar vacíos dentro de la mezcla, este fenómeno se ve reflejado en el mejoramiento del desempeño mecánico del material, sin embargo, es necesaria una metodología de dispersión mediante el uso de aditivos dispersantes y aplicación de ultrasonido [50–52].

2.5 Investigaciones previas de la utilización de PCMs

El principal reto a la hora de utilizar PCMs es su conductividad térmica que afecta la dinámica de recepción-almacenamiento de calor. Diversos autores han desarrollado investigaciones donde correlacionan la utilización de un material de cambio de fase y un material base carbono para mejorar su conductividad térmica [1, 21, 22]. La tabla 4 reporta estudios relacionados con la incorporación de PCM a matrices cerámicas, además, se mencionan los materiales utilizados, porcentajes de adición, calor latente, conductividad térmica y resistencia a la compresión de las mezclas investigadas. Como se puede observar, la integración de PCM sólido-líquido exhibe un almacenamiento de calor solo al incorporar un porcentaje en peso de la mezcla mayor al 5 %. Sin embargo, esta mejora está ligada a la reducción de la resistencia a la compresión de las muestras hasta un 75% respecto a un espécimen sin adiciones. Por otra parte, la conductividad térmica se logra mejorar hasta un 50% al integrar materiales base carbono en conjunto con PCM a materiales cerámicos.

Tabla 4. Estudios realizados a mezclas de cementantes adicionados con materiales de cambio de fase (PCM)

Autor	PCM	% PCM	Material base carbono	%MBC	C	A.T. (J/g)	C. T. (W/mK)	f _c
Luigi C. y col. [53]	Parafina comercial	5	N/A	--	C.P.O.	--	--	-20%
Sandra C. y col. [54]	Parafina comercial	20	N/A	--	Yeso	3.2	0.41	--
Farid Boudali	Parafina encapsulada	10	N/A	--	Yeso	11.8	0.17	--
Errebai y col. [10]	Parafina comercial	50	N/A	--	Yeso	146.7	0.199	--
Seulgi y col. [26]	Aceite vegetal comercial	N/A	Nanotubos de Carbono	5	N/A	146.6	0.671	--
Young Uk y col. [22]	n-octadecano (241 J/g)	IMP	Carbón activado Nano plaquetas de grafito	0.03	C.P.O.	12	0.56	-10%
Cynthia G. y col. [15]	Parafina comercial	10	Fibras de celulosa	1.5	Cemento Blanco	17	0.26	-50%
Andrea F. y col. [14]	Parafina comercial	5	N/A	--	Estuco base	4	--	-12%
S.S. Lucas y col. [55]	Parafina comercial	15	N/A	--	C.P.	12	--	-25%
		30			C.P.	N/E		-40%

PCM: Material de cambio de fase, **%PCM:** Porcentaje en peso total de materiales solidos de PCM adicionado, **%MBC:** Porcentaje de material base carbono adicionado, **C:** material cementante utilizado en la investigación, **A.T.:** Almacenamiento térmico registrado en la investigación en Joules/gramos, **C. T.:** Conductividad térmica registrada en la investigación en Watts/metro*Kelvin, **f_c**= Porcentaje de resistencia a la compresión de las mezclas PCM respecto a la mezcla base sin adiciones, **IMP.:** Impregnación del PCM en el agregado fino, **N/A:** no aplica, **N/E:** No especificado.

2.5.1 Aporte al ahorro energético al utilizar PCMs

A pesar del amplio estudio de los PCMs en materiales de construcción, solo algunos investigadores ilustran o ejemplifican el impacto en el ahorro energético que podría tener la utilización de estos materiales. Para cuantificar este impacto se realizan simulaciones físicas o virtuales de un sistema constructivo, donde se compara los incrementos en la temperatura interior durante un periodo de tiempo de un sistema elaborado con un material convencional y otro con incorporación de PCM. Después, se estima la variación de la temperatura interna del modelo experimental al comparar el historial de temperaturas de ambos sistemas. A continuación, la tabla 5 describe la variación en la temperatura interior de diversos sistemas con PCM respecto a otro con materiales convencionales.

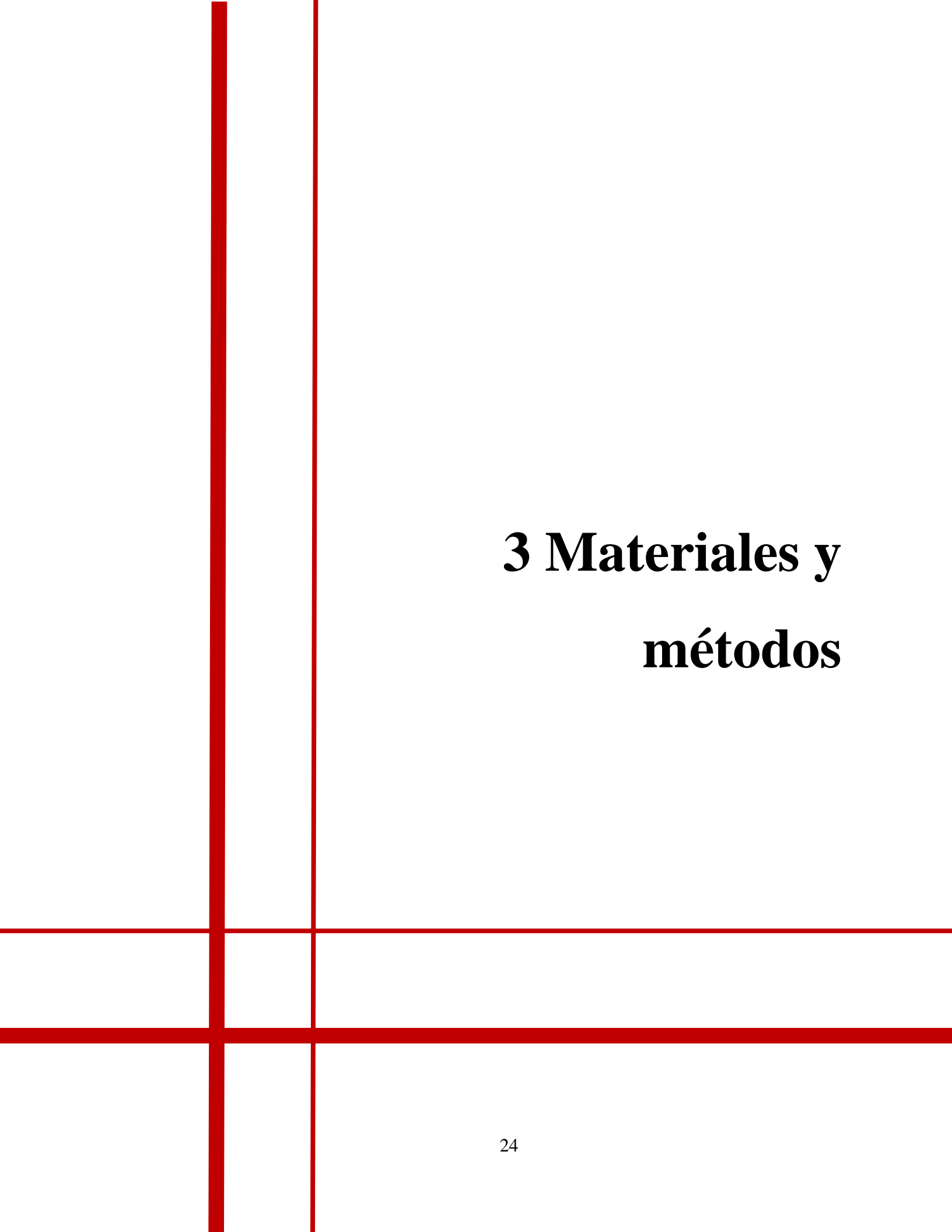
Tabla 5. *Aportación al confort térmico de materiales de construcción integrados con PCM*

Autor	PCM	%adición	Material	Simulación	ΔT (°C)	Ref.
S.S.	Parafina	20	Pasta	Física	3	[55]
Lucas y col.		30	cemento		3.5	
Luisa F. y col.	Comercial	5	Concreto	Física	2	[56]
Chaoen Li y col.	Comercial	30	Placas de yeso	Virtual	0.5	[57]
Du Yinfei y col.	Polietilenglicol	30	Pasta cemento	Física	2	[58]
Chaoen Li y col.	Comercial	31	Placas de yeso	Física	1.4	[59]

Nota: %adicion= porcentaje de adición del PCM en relación al peso total de la mezcla, ΔT = reducción en la temperatura interior del inmueble y Ref.= referencia

De la tabla 5 se puede definir que la incorporación de PCMs en materiales de construcción tiene un impacto directo en la regulación de la temperatura interior de un determinado sistema de construcción. No obstante, se distingue el requerimiento de utilizar adiciones mayores al 5 % de PCM para propiciar una disminución de la temperatura interior, lo que

desemboca en la afectación de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales como se observó en la tabla 3. La revisión de la literatura de investigaciones relacionadas con la utilización de PCMs, evidencia la necesidad de ahondar en el estudio materiales que propicien la termorregulación de las construcciones sin afectar la integridad de los materiales convencionales, tal podría ser el caso de los PCMs sólido-sólido.

A red grid consisting of three vertical lines and three horizontal lines, creating a 2x2 grid of large squares. The lines are thick and red.

3 Materiales y métodos

La metodología del presente trabajo será abordada en diferentes etapas las cuales indican detalladamente los procesos, las técnicas y especificaciones que serán utilizados, dichas etapas se presentan a continuación (figura 5).

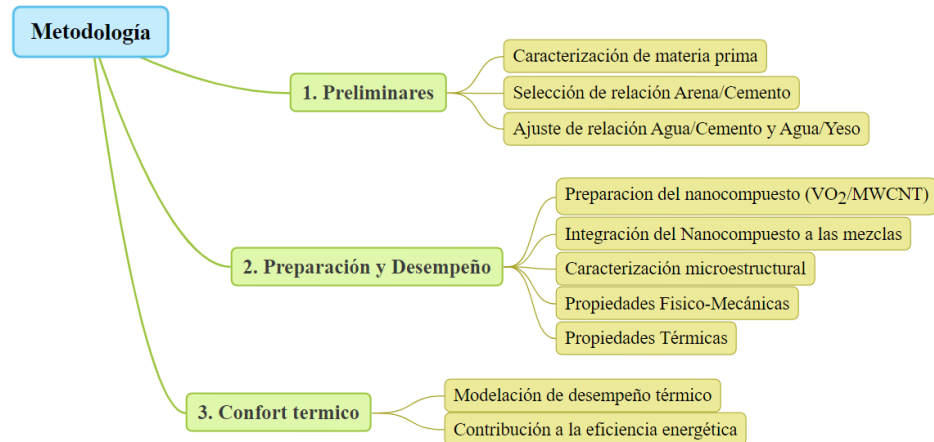


Figura 5. *Etapas del trabajo de investigación*

3.1 Materiales de Partida

La materia prima utilizada en esta investigación es la siguiente:

- Dióxido de Vanadio (VO₂) con 99 % de pureza marca Alfa Aesar™
- Nanotubos de carbono multiparedes (MWCNT) funcionalizados con radicales OH de 20 – 30 nm de diámetro y de 10 a 30 micrómetros de longitud con pureza del 95 % marca US Research Nanomaterials Inc.
- Alcohol Isopropílico con pureza del 99 % marca CTR Scientific
- Cemento Portland Compuesto (CPC) 30R marca CEMEX
- Arena caliza #4 marca Tecno Arenas Monterrey
- Yeso marca MAXIMO
- Aditivo dispersante (AD) etilenglicol (C₂H₆O₂) con pureza del 99.91 % marca CTR Scientific
- Agua potable

3.2 Caracterización microestructural

La caracterización microestructural se llevó a cabo aplicando diferentes técnicas ya establecidas, las cuales a continuación se describen.

- Fluorescencia de rayos X (FRX): Con esta técnica se cuantificaron los porcentajes en peso (%p) de los compuestos químicos que constituyen a los cementantes (CPC y yeso), para ello se analizaron pastillas de 40 mm de diámetro y 4 mm de espesor de cada material en un espectrómetro Epsilon3-XL marca PANalytical.
- Difracción de rayos X (DRX): La identificación de las fases cristalinas presentes se llevó a cabo mediante DRX utilizando muestras en polvo en un difractómetro Empréan marca PANalytical en un rango 2θ de 10° a 60° con un incremento de 0.05° y una velocidad de barrido de $5^\circ/\text{min}$ utilizando radiación $K\alpha$ de cobre. La identificación de los compuestos se realizó utilizando la base de datos International Centre for Diffraction Data (ICDD).
- Microscopia electrónica de barrido (SEM) y Espectroscopia de energía dispersiva (EDS): Se utilizó esta técnica para observar la morfología de las muestras y la distribución del nanocompuesto híbrido en las mezclas elaboradas, por lo que se analizaron muestras con un recubrimiento oro-paladio en un microscopio JSM-6510LV marca JEOL.
- Dispersión de luz dinámica (DLS): Con este análisis se obtuvo la distribución de tamaños en el nanocompuesto utilizando un medio de alcohol isopropílico en un equipo MalvernPanalytical modelo Zetasizer.
- Determinación de tamaño de partícula (DTP): Se obtuvo la distribución del tamaño de partícula y diámetro promedio de los materiales en un medio de alcohol isopropílico utilizando un equipo Microtac modelo S3500.

3.3 Caracterización del agregado fino

La caracterización de la arena caliza se realizó respecto a diversas normativas establecidas por la ASTM (American Society for Testing and Materials). Por un lado, se comprobó la distribución de tamaños de partícula mediante granulometría, por el otro, se obtuvieron los valores de peso específico, absorción y humedad, valores necesarios para la dosificación de los morteros.

3.3.1 Granulometría

Esta técnica se llevó a cabo respecto a lo establecido en la norma ASTM C 144 [60]. Primero, se tomó una muestra de 300 g de arena caliza. Posteriormente, se realizó el tamizado del agregado fino utilizando las mallas mencionadas en la tabla 6 en orden descendente.

Tabla 6. Límites de material que pasa por tamaño de malla

Tamaño de malla	Material que pasa (%)
4.75 mm (No. 4)	100
2.36 mm (No. 8)	95 a 100
1.18 mm (No. 16)	70 a 100
600 μm (No. 30)	40 a 75
300 μm (No. 50)	20 a 40
150 μm (No. 100)	10 a 25
75 μm (No. 200)	0 a 10

Durante el tamizado del material se registró la cantidad en gramos de agregado fino retenido en cada malla. Al finalizar, se determinó la cantidad de material que pasaba por cada tamiz utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuacion 1.} - \% \text{ que pasa} = 100 - \frac{\text{Material retenido} * 100}{\text{Material total}}$$

Donde:

% que pasa = cantidad de material que pasa determinado tamiz (%)

Material retenido = cantidad de agregado fino que es retenido por el tamiz (g)

Material total = cantidad total de material utilizado en el proceso (g)

Por último, se graficó el porcentaje de material que pasa respecto a cada tamiz utilizado y se verificó cumplieran los límites establecidos.

3.3.2 Humedad, absorción y densidad

Los valores de la humedad, absorción y densidad de la arena caliza fueron determinados según lo establecido en la norma ASTM C 128 [61], para la cual se utilizó 1 kg de arena caliza. Primero, se determinó el contenido de humedad, para ello se secó el material en un horno a una temperatura de $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Después, se retiró la muestra del horno y se enfrió a temperatura ambiente por aproximadamente 2 horas. Luego, se pesó el material y aplicó la siguiente ecuación.

$$\text{Ecuacion 2.} - \% H = \frac{P_{\text{Inicial}} - P_{\text{Seco}}}{P_{\text{Inicial}}} * 100$$

Donde:

%H = Humedad de la arena (%)

P_{Inicial} = Peso de la muestra antes de secar a $110 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas (g)

P_{Seco} = Peso de la muestra después de secar a $110 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas (g)

Enseguida, se realizó el procedimiento para determinar la absorción y densidad. Primero, se colocó la muestra de arena seca en un recipiente y se saturó con agua por 24 horas. Después, se retiró el exceso de agua del recipiente y se vació la arena saturada en un paño

seco. Luego, se retiraron los excedentes de agua de la muestra con ayuda del paño hasta obtener una arena saturada superficialmente seca (sss). Para comprobar esta condición se utilizó un cono troncocónico, el cual fue relleno en 3 capas con el material procurando apisonar 25 veces entre cada estrato. Si al retirar el molde la arena mantenía un pequeño pico al centro, se cumplía la condición sss. En caso de que el material mantuviera la forma cónica integra, se seguía secando la arena y se aplicaba nuevamente el procedimiento. Por el caso contrario, si la muestra no mantenía ninguna forma, se agregaba agua a la arena hasta que cumpliera con la prueba del cono.

Después, se utilizó un picnómetro, el cual fue pesado vacío y con agua hasta la marca de calibración. En dicho recipiente se introdujeron 500 g de arena sss, posteriormente se llenó con agua hasta el 90 % de su capacidad. Luego, se agitó ligeramente hasta eliminar las burbujas de aire atrapadas. Enseguida, se sumergió el picnómetro en agua a 23 ± 2 °C hasta obtener una temperatura constante y se procedió a registrar su peso. Finalmente, se retiró el material del recipiente, se secó a 110 ± 5 °C hasta una masa constante y se registró su peso. Los valores de absorción y densidad fueron determinados de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$\text{Ecuacion 3. - \%ABS} = \frac{P_{sss} - P_{seco}}{P_{seco}} * 100$$

Donde:

%ABS = Cantidad de agua que absorbe el material (%)

P_{sss} = Peso del material en estado saturado superficialmente seco introducido al picnómetro (g)

P_{seco} = Peso del material seco extraído del picnómetro (g)

$$\text{Ecuacion 4. - Densidad} = \frac{997.5P_{seco}}{P_{P+a} + P_{sss} - P_{P+a+m}}$$

Donde:

Densidad = Valor de densidad (Kg/m³)

P_{P+a} = Peso del picnómetro con agua hasta la marca de calibración (g)

P_{P+a+m} = Peso del picnómetro con el agua y el material a 23 ± 2 °C (g)

3.4 Preparación del nanocompuesto híbrido VO₂/MWCNT

A fin de determinar la combinación más adecuada para ser integrada en el mortero y el yeso, se elaboraron 3 proporciones VO₂/MWCNT: 99 %/1 %, 95 %/5 % y 90 %/10 %.

Para la síntesis del nanocompuesto se utilizó la técnica de impregnación en húmedo, puesto que se considera un método simple y versátil al impregnar nanomateriales sobre otros compuestos de tamaño macrométrico [62]. La efectividad de este proceso se ha confirmado en investigaciones relacionadas con la síntesis de óxidos metálicos y nanomateriales [63, 64]. Dicho proceso se llevó a cabo en un medio de alcohol isopropílico con una relación de 100 mL por gramo de nanocompuesto. Se realizaron mezclas es un %p VO₂/MWCNT de: 99/1, 95/5 y 90/10. Para este proceso, primero se colocó la solución de los compuestos con el alcohol en ultrasonido por una hora. Seguido de esto, la mezcla se evaporó a 90 °C con agitación magnética. Por último, la muestra se sometió a 150 °C por 3 horas en ambiente de aire para eliminar cualquier residuo orgánico.

Se evaluaron las propiedades microestructurales y capacidad de almacenamiento de calor de las 3 mezclas de VO₂/MWCNT a fin de determinar cuál de ellas mantenía un equilibrio entre su calidad de dispersión y capacidad de almacenamiento de calor.

- Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC): Con este análisis se midió la capacidad de almacenamiento de calor y la temperatura de transición del nanocompuesto utilizando un calorímetro marca TA Instruments modelo SDTQ600 en el rango de temperatura de 30 °C a 100 °C con una velocidad de calentamiento/enfriamiento de 2 °C/min en atmosfera de nitrógeno.
- Espectroscopia infrarroja por la transformada de Fourier (FTIR): Esta técnica se usó para identificar los enlaces el VO₂ en las mezclas empleando un espectrofotómetro marca Shimadzu modelo IRtracer-100.
- Evaluación microestructural: Se aplicaron las técnicas de DRX, EDS y DTP con los parámetros indicados en el apartado 3.2. Con ello, se evaluó: la presencia de

fases cristalinas, la dispersión de los MWCNT en el VO₂ y la distribución del tamaño de partícula del nanocompuesto.

3.5 Especímenes de prueba con y sin adición del nanocompuesto híbrido VO₂/MWCNT

Antes de elaborar los especímenes de prueba fue necesario establecer parámetros de las mezclas como lo son la relación agua/material cementante, dosificaciones y metodología de elaboración. Dichas particularidades se describen a continuación.

3.5.1 Determinación de la relación agua/cemento

La relación agua/CPC fue determinada utilizando la prueba de fluidez según lo establecido en la norma ASTM C 1437 [65]. Este procedimiento se basó en el uso de la mesa de fluidez, en la cual se colocó un molde cónico y se llenó en capas de 25 mm con el mortero procurando apisonar 20 veces entre cada estrato de material. Seguido de llenar y enrazar el cono, se retiró el molde e inmediatamente se aplicaron 25 caídas de la mesa en un tiempo de 15 segundos. Finalmente, se midió el diámetro del mortero esparcido sobre la mesa en las 4 direcciones marcadas sobre la plancha. El valor de la fluidez se calculó utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Ecuacion 5. - Fluidez} = \frac{D_{Final}}{D_{Inicial}} * 100$$

Donde:

Fluidez = Valor de la fluidez del mortero (%)

D_{Final} = Promedio del diámetro medido en las 4 direcciones (cm)

D_{Inicial} = Diámetro inicial del cono de mortero (cm)

3.5.2 Determinación de la relación agua/yeso

Para establecer la relación agua/yeso de las pastas se aplicó el método del vaso de saturación como lo establece la norma UNE EN 13279-1 [66]. Para ello, se utilizó un vaso de precipitado de 250 mL con marcas a los 50 y 100 mL de capacidad con peso conocido. Primero, se vertían 100 mL de agua en el recipiente y se registraba su peso. Después, se espolvoreaba el yeso al interior del vaso procurando alcanzar la primera marca (50 mL) a los 30 s y la segunda (100 mL) a los 60 s. Se continuó espolvoreando yeso hasta lograr que transcurridos 90 ± 10 s el material estuviera 2 mm por debajo de la superficie del agua y se registró su peso. La relación agua/yeso se determinó según la siguiente operación matemática.

$$\text{Ecuacion 6.} \quad - \frac{A}{Y} = \frac{m_{a+v} - m_v}{m_{y+a+v} - m_{a+v}}$$

Donde:

A/Y = relación agua/yeso

m_{a+v} = masa del vaso de precipitado con el agua (g)

m_v = masa del vaso de precipitado (g)

m_{y+a+v} = masa del vaso de precipitado con el agua y el yeso espolvoreado total (g)

3.5.3 Dosificación y elaboración de los morteros de CPC

La dosificación de los morteros de CPC fue diseñada de acuerdo los pesos volumétricos del CPC, arena caliza y agua y una relación a/c = 0.74. Además, la relación arena:CPC fue de 3:1 respecto a su volumen y el porcentaje de adición del nanocompuesto híbrido VO₂/MWCNT se fijó en 0.5 %, 1 %, 2 % y 3 %p del cementante, ambos parámetros establecidos siguiendo recomendaciones de bibliografía relacionada con trabajos de investigación similares [1, 11, 48]. De igual manera, se reemplazó el 1.5 %v del agua de mezcla con aditivo dispersante etilenglicol (AD) a fin de dispersar el NH en la solución,

dicho porcentaje se determinó respecto a la literatura de investigaciones relacionadas con la utilización de nanocompuestos en materiales cementantes [48]. La tabla 7 muestra los códigos de identificación para cada mortero respecto a la cantidad de NH adicionado y la dosificación en kilogramos por metro cubico de mezcla.

Tabla 7. *Dosificación de los morteros de CPC*

a/c= 0.74	M0	M05	M1	M2	M3
Cemento (Kg/m ³)	334.94	334.94	334.94	334.94	334.94
Agua (Kg/m ³)	247.84	243.71	243.71	243.71	243.71
Arena (Kg/m ³)	1580.11	1580.11	1580.11	1580.11	1580.11
AD (L/m ³)	0	3.71	3.71	3.71	3.71
NH (%p cementante)	0	0.5	1	2	3

Para la elaboración de las mezclas con adición, primero se realizó la dispersión del NH en el agua de mezcla. Se colocó el nanocompuesto en un recipiente seguido del AD y el agua de mezcla. Posteriormente, se ultrasonificó la solución por 1 hora. Seguido, se aplicó lo establecido en la norma ASTM C 305 [67]. Para ello se utilizó una mezcladora de dos velocidades. El procedimiento comenzó con la colocación del agua de mezclado en la mezcladora, seguido de agregar la cantidad de CPC correspondiente y encender el dispositivo en primera velocidad por 30 s. Luego, se agregó la arena en un periodo de 30 s, enseguida se cambió a segunda velocidad durante 30 s. Después, se apagó la mezcladora y se dejó reposar la mezcla por 1 min 30 s cubierta con una tela húmeda (en los primero 15 s de reposo se limpiaron las paredes del recipiente). Finalmente, se batió nuevamente en segunda velocidad por 1 min. Al terminar, se procedió a cimbrar los especímenes, los cuales fueron cilindros de 25 mm de diámetro y 50 mm de altura, cubos de 50 mm por lado y un prisma cuadrangular de 40 mm por lado y 80 mm de largo. Se cubrieron con una capa de plástico delgado y se descimbraron 24 horas después para ser colocados en una cámara de curado indirecto hasta sus respectivas edades de ensaye.

3.5.4 Dosificación y elaboración de las pastas de yeso

Las pastas de yeso fueron dosificadas respecto a las densidades del yeso y agua de mezclado con una relación agua/yeso = 0.64. Respecto a la adición del nanocompuesto VO₂/MWCNT y AD fue determinado de igual forma que para el mortero. La tabla 8 especifica la nomenclatura utilizada para cada pasta y su dosificación en kilogramos por cada metro cubico de mezcla.

Tabla 8. *Dosificación de las pastas de yeso*

a/c = 0.625	Y0	Y05	Y1	Y2
Yeso (kg/m ³)	943.58	943.58	943.58	943.58
Agua (kg/m ³)	589.74	579.92	579.92	579.92
Aditivo dispersante (L/m ³)	0	8.84	8.84	8.84
NH (%p cementante)	0	0.5	1	2

En primer lugar, se llevó a cabo la dispersión del NH en el agua de mezcla de forma idéntica a lo efectuado en la elaboración de los morteros. La elaboración de las pastas fue de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C 305 [67]. Donde, de igual forma se utilizó una mezcladora de 2 velocidades. Primero, se vertió el agua de mezcla en la batidora, seguido se colocó la cantidad de yeso correspondiente y se dejó reposar la solución por 30 s. Posteriormente, se encendió la batidora en primera velocidad por 30 s. Luego, se detuvo mezcladora y se retiraron los conglomerados de las paredes del contenedor en un máximo de 15 s. Finalmente, se encendió el aparato en segunda velocidad por 1 min. Inmediatamente después, la pasta se vertió en los moldes de los especímenes correspondientes, dichas muestras tuvieron forma cilíndrica de 25 mm de diámetro y 50 mm de altura y cubos de 50 mm por lado. Se cubrieron las muestras con una capa delgada de plástico y se descimbraron 24 horas después de su elaboración para ser almacenados a condiciones de laboratorio hasta su respectiva edad de ensaye.

3.6 Caracterización microestructural y física de los morteros y pastas con y sin adición del nanocompuesto híbrido VO₂/MWCNT

3.6.1 Densidad

La estimación de la densidad de los morteros de CPC y las pastas de yeso se llevó a cabo respecto a lo establecido en las normas ASTM C 1329 y ASTM C 472 [68, 69]. Se pesaron 6 especímenes cilíndricos de cada mezcla y se midieron sus dimensiones. Los datos fueron empleados para determinar el valor de la densidad de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\text{Ecuacion 7. -Densidad} = \frac{P_m}{V_m}$$

Donde:

Densidad = Densidad de la mezcla (Kg/m³)

P_m = Peso de la muestra (kg)

V_m = Volumen de la muestra (m³)

3.6.2 Caracterización microestructural

Los morteros y las pastas elaboradas con y sin adición del NH fueron caracterizadas aplicando técnicas específicas tales como: DRX para la identificación de las fases cristalinas presentes en las mezclas, FTIR a fin de determinar y comparar los enlaces químicos de las muestras, SEM con la finalidad de observar la morfología de los productos hidratados de las mezclas y EDS para evaluar la dispersión del NH en los morteros y pastas.

También, se aplicó Termogravimetría y Análisis térmico diferencial (TGA/DTA) con una rampa de 25 a 950 °C a una velocidad de calentamiento de 5 °C/min en atmosfera de nitrógeno en un equipo PerkinElmer modelo STA 600. De este análisis se obtuvo la

gráfica del porcentaje de masa de las muestras respecto a la temperatura, con la cual se cuantificaron las fases presentes en las pastas de yeso.

3.6.3 Estudio de la cinética de hidratación

Se le dio seguimiento a la cinética de hidratación de los morteros y las pastas con y sin NH a fin de distinguir cambios durante este proceso exotérmico, se analizaron muestras de 50 g de cada mezcla en un calorímetro marca Calmetrix modelo I-Cal 4000 HPC. El estudio de este desarrollo ha sido poco estudiado en materiales cementantes incorporados con PCMs, sin embargo, se consideró importante llevarlo a cabo en esta investigación considerando que el NH podría funcionar como regulador del calor liberado durante la hidratación de los cementantes debido a su capacidad de almacenar calor y determinar si la presencia del nanocompuesto tiene alguna influencia sobre la cinética de hidratación de los cementantes.

3.6.4 Angulo de contacto del agua

Mediante esta técnica se determinó la mojabilidad de las muestras cúbicas secadas a un peso constante a una temperatura de 65 °C y de 45 °C para los morteros y las pastas, respectivamente. Utilizando un equipo marca Krüss modelo DSA25E.

3.6.5 Resistencia al agua

Se evaluó la resistencia al agua utilizando el método humedad-secado, el cual se adaptó al tipo de material bajo análisis basado en lo establecido en la norma UNE 22190-2 y ASTM D 4843 [70, 71]. Se utilizaron muestras cilíndricas de cada material, las cuales se secaron a un peso constante a una temperatura de 110 ± 5 °C y 45 ± 5 °C para los morteros y las pastas de yeso, respectivamente. Este método comenzó con la colocación de cada

espécimen en frascos cilíndrico de vidrio con medidas de 50 mm de diámetro por 120 mm de alto, procurando que la muestra no tocara el fondo. Posteriormente, se vertieron 100 ml de agua destilada. Después de 24 horas para los morteros y 6 horas en el caso de las pastas, se retiraron del agua y se procedió a secarlas en un horno a 110 ± 5 °C o 45 ± 5 °C, de acuerdo al material bajo estudio, hasta un peso constante.

Este proceso se realizó en un total de 16 ciclos para las muestras de mortero y de 6 ciclos para las pastas de yeso, en los cuales se registraron los pesos secos y saturados de agua de los especímenes. La pérdida total de masa y absorción de agua se calculó con la ecuación 8 y 9, respectivamente.

$$\text{Ecuacion 8. } P_m = \frac{P_{Inicial s} - P_{x s}}{P_{Inical s}} * 100$$

Donde:

P_m = Pérdida de masa (%)

$P_{Inical s}$ = Peso inicial de la muestra seca (g)

$P_{x s}$ = Peso del espécimen después del último ciclo seco (g)

$$\text{Ecuacion 9. } ABS_x = \frac{P_{Saturado x siguiente} - P_{Seco x}}{P_{Seco x}} * 100$$

Donde:

ABS_x = Absorción de agua del espécimen para determinado ciclo (%)

$P_{Saturado x siguiente}$ = Peso del espécimen saturado de agua al siguiente ciclo respecto al calculado (g)

$P_{Seco x}$ = Peso de la muestra seca del ciclo a calcular (g)

3.6.6 Prueba de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se determinó respecto a lo establecido en la norma ASTM C 109 y ASTM C 472 [69, 72]. Se utilizó una prensa hidráulica marca Instron modelo 600DX. Para el ensaye se emplearon 3 muestras de cada mezcla en forma cilíndrica de 25 mm de diámetro y 50 de alto. Para el caso de los morteros, los especímenes se curaron indirectamente y se ensayaron a los 3, 7, 14 y 28 días de edad, mientras que, las pastas de yeso fueron almacenadas y utilizadas a los 7 días de edad. La prueba consistió en someter las muestras a una carga de compresión uniaxial hasta su fractura, utilizando una velocidad de carga de 40 psi/s. Después, se registró la carga máxima resistente y se calculó la resistencia a la compresión de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\text{Ecuacion 10.} - f'c = \frac{C_{max}}{A} * 0.0980665$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a la compresión (Mpa)

C_{max} = Carga máxima resistente (kg)

A = Área sobre la cual se aplicó la compresión (cm²)

Finalmente se promedió y se obtuvo su desviación estándar de los valores obtenidos.

3.6.7 Propiedades térmicas

La evaluación de las propiedades térmicas consistió en la determinación del calor específico y conductividad térmica. Posteriormente, se valoró el comportamiento térmico de los materiales para ser utilizados como termorreguladores. Las técnicas empleadas para definir estas características se detallan a continuación.

3.6.7.1 Calor específico mediante calorimetría isotérmica

El procedimiento utilizado se estableció respecto a lo reportado por V.-P. Lehto y col. [73], para el cual se utilizó un calorímetro marca Calmetrix modelo I-Cal 4000 HPC. El método comenzaba con el empleo de muestras cilíndricas de 25 mm de espesor y 10 mm de altura, las cuales eran secadas a un peso constante a 110 ± 5 °C y 45 ± 5 °C para el mortero y el yeso, respectivamente. Seguido se registraba su peso y se calentaban en el rango de temperatura de 18 a 55 °C por 24 horas. Después, se verificaba la temperatura de las pastillas con un termómetro infrarrojo marca FLIR modelo TG165. Inmediatamente después, las pastillas fueron colocadas en el interior del calorímetro para comenzar la medición del flujo de calor proporcionado o liberado hasta llegar a una temperatura de 23 °C (aprox. 1 hora). En seguida, se calculó el área bajo la curva de la gráfica de flujo de calor (Watts) contra tiempo (s). El Cp se determinó utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Ecuacion 11.} -Cp = \frac{A_c}{|(T_i - T_c)P_{ms}|}$$

Donde:

Cp = Calor específico (J/kg°C)

A_c = Área bajo la curva de la gráfica de flujo de calor para la temperatura bajo determinación (J)

T_i = Temperatura inicial de la muestra (°C)

T_c = Temperatura del calorímetro (°C)

P_{ms} = Peso de la pastilla seca (kg)

3.6.7.2 Conductividad térmica

Se midió la conductividad térmica de los materiales bajo análisis empleando un conductímetro marca METER modelo TEMPOS, el cual basa sus mediciones en la técnica

del hilo caliente [74] de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D 5334. Se aplicaron mediciones de este valor en los rangos de temperatura de 20 a 50 °C utilizando el sensor SH-3.

3.6.7.3 Difusividad y efusividad

Se estimó el valor de difusividad y efusividad según lo establece Errebai y col. en su artículo [10]. Donde, se calcularon estos valores respecto a la densidad, calor específico y conductividad térmica. Se utilizaron los siguientes arreglos matemáticos [10].

$$\text{Ecuacion 12.} - \alpha = \frac{k}{\text{Densidad} * C_p}$$

$$\text{Ecuacion 13.} - \varepsilon = \sqrt{k * C_p * \text{Densidad}}$$

Donde:

α = Difusividad del material (m/s)

ε = Efusividad del material (Ws^{1/2}/Km²)

k = Conductividad térmica (W/mK)

Densidad = Densidad de la mezcla (kg/m³)

C_p = Calor específico del material (J/kg°C)

Dichos valores fueron evaluados como indicadores de la dinámica térmica del material, es decir, la facilidad con que el calor fluye a través del material y que tan propenso es el mismo a transferir calor con otros materiales.

3.6.7.4 Caja de temperatura

El desempeño de los morteros y pastas como termorreguladores fue evaluado en base a la literatura relacionada con el estudio de PCMs [58, 75, 76]. Para el experimento se usó una caja de madera con forma de prisma rectangular con medidas de 38 cm X 38 cm X 53 cm, con aislamiento térmico en sus caras internas (figura 6). Al interior se colocó un calentador eléctrico de 300 watts a una distancia de 34 cm de la cara inferior interna de la caja.

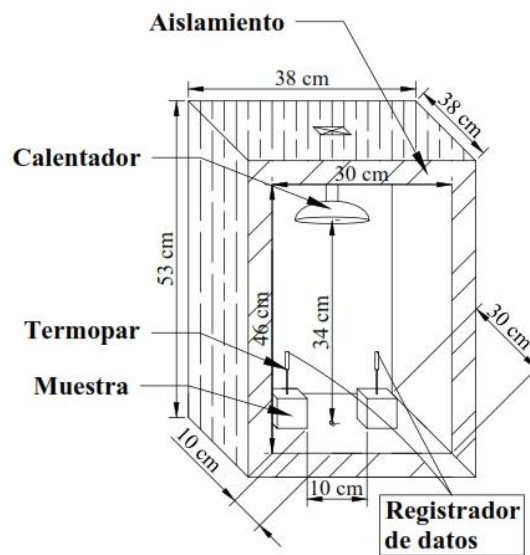


Figura 6. Arreglo experimental para la evaluación del desempeño de los morteros y pastas como termorreguladores.

A las muestras cúbicas de 50 mm por lado se le introdujo al centro un termopar conectado a un termómetro de 4 canales marca Perfect Prime modelo TC0309 a fin de monitorear y registrar los cambios en la temperatura interna de los especímenes bajo análisis. Primeramente, se calentó la caja vacía y una vez que la temperatura se mantuvo constante a 40 ± 5 °C se introdujeron las muestras, las cuales se encontraban a una temperatura ambiente de 25 ± 1 °C. Luego, se registraron las temperaturas de calentamiento durante 2 horas seguido de 3 horas de enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

3.7 Modelación del comportamiento térmico de los morteros y pastas al utilizarse como recubrimientos

A fin de conocer el aporte al ahorro energético del uso de los materiales desarrollados en esta investigación se realizó el diseño y simulación energética de una edificación utilizando los morteros y las pastas con y sin adición del VO₂/MWCNT como recubrimiento de su envolvente. Primero, se emplearon los programas Sketchup y OpenStudio para diseñar una unidad habitacional, la figura 7 y 8 ilustran la superficie de dicha construcción, la cual cuenta con una planta de 3 metros de altura sin construcciones adyacentes. Respecto a los muros exteriores e interiores, se planteó un espesor de 20 cm, contruidos a base de blocks de concreto de 15 cm de ancho, recubiertos con 2.5 cm de yeso en la cara en contacto con el interior de la construcción y 2.5 cm de mortero de CPC en su cara expuesta a la intemperie. En cuanto al techo, fue elaborado a base de concreto armado con un espesor de 10 cm, un recubrimiento de 2.5 cm en su cara inferior con yeso y en la cara superior con una plantilla de mortero CPC de 2.5 cm. Además, se ubicaron 2 dormitorios, un baño y una cocina/comedor; en los cuales se encuentran un total de 3 ventanas, 3 puertas interiores y una de acceso.

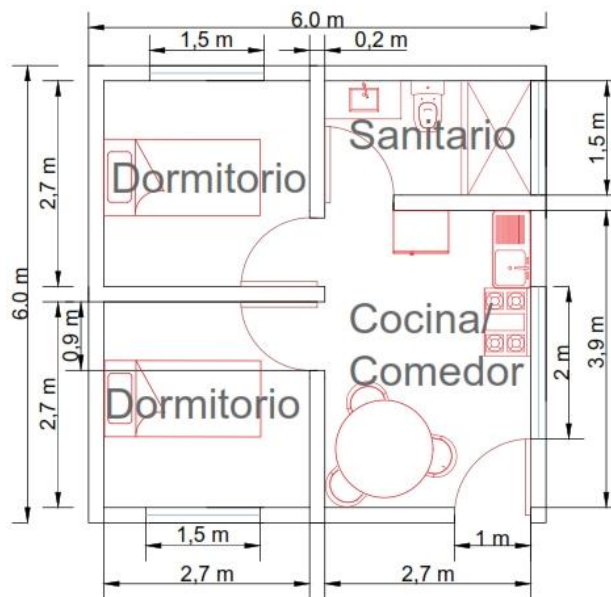


Figura 7. Vista de planta de la unidad habitacional bajo simulación energética

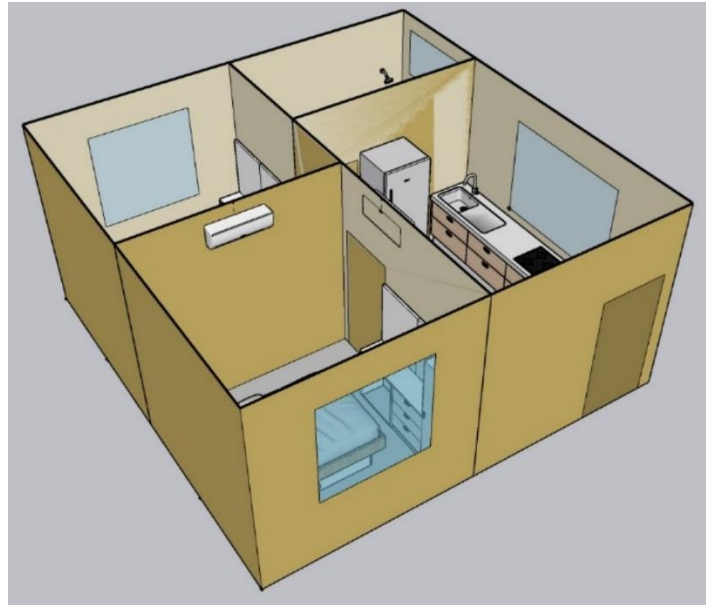


Figura 8. Vista 3D de la unidad habitacional a simular

3.7.1 Contribución al ahorro energético derivado del uso del recubrimiento de los morteros y las pastas adicionados con 95 % VO₂/5 % MWCNT

Para la simulación energética de la edificación se utilizó el software Energy Plus. Dicha herramienta informática tiene como base de análisis el método del elemento finito utilizando una serie de módulos que en conjunto calculan la energía de funcionamiento de algún equipo de regulación térmica específico para mantener a una temperatura cualquiera el interior de una edificación determinada [77]. Para llevar a cabo este cálculo, el software utiliza diversos parámetros físicos, térmicos y climáticos; algunos de estos son: la zona climática y diseño horario de la locación donde se realiza la simulación, dimensiones y uso de la edificación bajo análisis, espesores de los muros y recubrimientos, densidad y propiedades térmicas (conductividad térmica y calor específico) de los materiales de construcción a implementar [77].

A pesar del gran número de parámetros necesarios para la simulación, se considera es la mejor opción para implementar, a causa de su versatilidad al ser un software de código libre y la fiabilidad de sus resultados. [3, 5, 12].

El diseño energético se llevó a cabo en 3 zonas climáticas diferentes dentro del país de México: uno con registro de altas temperaturas (Monterrey, Nuevo León), otro con temperaturas bajas (Temosachic, Chihuahua) y un tercero con un clima templado (Ciudad de México, México). Los archivos de zona climática y el diseño horario de dichas ciudades se obtuvieron de la página web climate.onebuilding.org [78], la cual basa su información en la ISD (US NOAA's Integrated Surface Database).

Respecto al uso del inmueble, se propuso una ocupación de 2 personas con horario laboral de 9:00 am a 6:00 pm de lunes a viernes, con días inhábiles y vacaciones. Además, se implementó un sistema de climatización ideal que mantuviera una temperatura de 23 °C para el calentamiento y de 25 °C para el enfriamiento, ambos parámetros establecidos según la temperatura ideal para el confort térmico en edificaciones [5]. Finalmente, se utilizaron las propiedades físicas y térmicas de los materiales de recubrimiento según los presentados en los materiales bajo estudio en este trabajo de investigación como parámetros para la simulación.

Con la simulación energética de Energy Plus se obtuvieron reportes de la cantidad de energía necesaria para calentar y enfriar (según sea el caso) la edificación durante cada mes en un lapso de 1 año respecto a cada sistema de recubrimiento. Adicionalmente se comparó la temperatura interna de la construcción durante el día más caliente y frío del año a fin de evaluar cambios respecto al tipo de recubrimiento utilizado.

4 Resultados y discusiones

4.1 Materiales de partida

4.1.1 Caracterización microestructural

Se realizó el análisis FRX en el CPC 30R y el yeso con la finalidad de comprobar su composición química respecto a la normativa ASTM. La tabla 9 muestra los compuestos químicos obtenidos (cuantificados en porcentaje del peso de la muestra). Los resultados determinaron que estos materiales cumplen con una composición química adecuada para ser utilizados según lo establecido en las normas ASTM C 150 y C 22 para el CPC y el yeso, respectivamente [79, 80].

Tabla 9. *Composición química del CPC y yeso*

Compuesto	CPC 30R (%p)	ASTM C 150 (%p)	Yeso (%p)	ASTM C 22 (%p)
SiO ₂	31.35	>20.0	1.46	N/A
Al ₂ O ₃	3.92	<6.0	0.35	N/A
Fe ₂ O ₃	2.49	<6.0	-	-
CaO	57.78	N/A	32.34	>70.0
SO ₃	2.36	<3.0	65.19	
MgO	0.62	<6.0	0.16	N/A
K ₂ O	0.97	N/A	0.17	N/A
TiO ₂	0.191	N/A	-	-
Ag ₂ O	0.11	N/A	-	-

Se aplicó la técnica de DRX en el CPC, yeso, VO₂ y MWCNT para la identificación de sus fases cristalinas. Primero, la Figura 9 a) ilustra el difractograma del CPC, donde se identificaron las fases de: alita (C₃S) con PDF No.: 01-070-0388, belita (C₂S) de PDF No.: 01-086-0402, celita (C₃A) con PDF (Powder Diffraction File) No.: 00-038-1429, felita (C₄AF) de PDF No.: 00-030-0226 y sulfato de calcio hemihidratado (CaSO₄•0.5H₂O) con PDF No.: 00-033-0310. Estas fases corresponden a las esperadas para este tipo de material [51, 81].

El difractograma del yeso (Figura 9 b) muestra los siguientes compuestos: sulfato de calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) de PDF No.: 00-033-0310 y carbonato de calcio (CaCO_3) con PDF No.: 01-076-2713; los cuales pertenecen a la composición química esperada para un yeso [82].

Por otro lado, la Figura 9 c) corresponde al difractograma del VO_2 , en el cual se identificó la fase de dióxido de vanadio (VO_2) con estructura cristalina monoclinica de PDF No.: 00-009-0142; con ello se comprueba la cristalinidad y presencia de la fase con propiedades de PCM. Finalmente, con el difractograma de los MWCNT (Figura 9 d) se determinó que se cuenta con la fase de carbono con estructura cristalina hexagonal con PDF No.: 00-001-0640.

La identificación de las fases en el CPC y el yeso reafirman la veracidad de la composición química encontrada mediante análisis FRX.

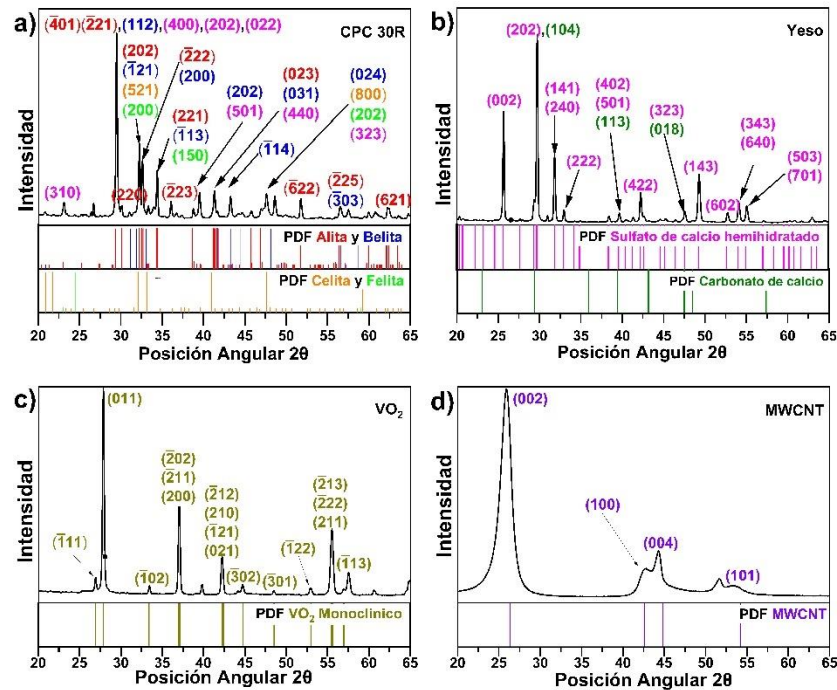


Figura 9. Difractogramas realizados al material de partida: a) Difractograma del CPC 30R, b) Difractograma del Yeso con fichas PDF, c) Difractograma del VO_2 con fichas PDF y d) Difractograma de los MWCNT con fichas.

Se observó la morfología microestructural de la materia prima mediante SEM. Por un lado, el CPC (Figura 10 a) presenta partículas de 5 a 12 micras con formas irregulares señaladas en la imagen con la letra A, las cuales se atribuyen a la presencia de la fase alita [83]. También, se observan granos de 1 a 5 micras con formas redondeadas correspondientes con la fase belita (letra B) [83]. Igualmente, se distinguen partículas con formas alargadas de hasta 6 micras asignadas a la presencia de la fase celita (letra C) [83]. Por lo tanto, se reafirma la presencia de las fases identificadas en la figura 9 a).

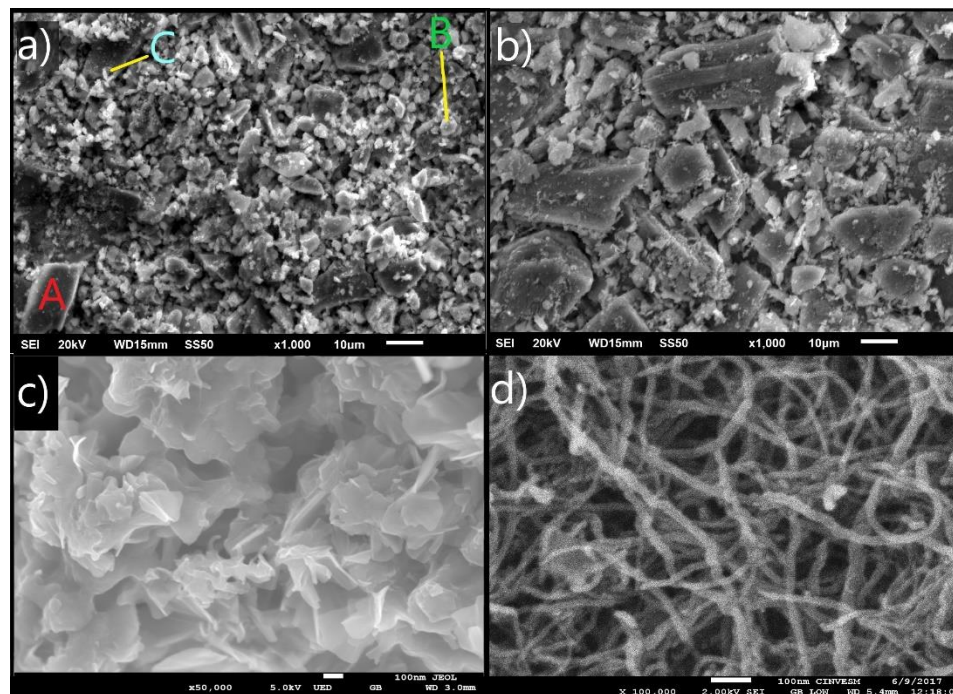


Figura 10. Microscopias del material de partida, donde: a) CPC 30R, A: alita B: belita C: celita; b) Yeso, c) VO_2 (M) y d) MWCNT

Por otro lado, el yeso (Figura 10 b) tiene partículas de un tamaño de entre 1 y 13 micras con geometría irregular, las cuales corresponden a la presencia del compuesto sulfato de calcio hemihidratado [84]. Esto corrobora la presencia de la fase en este material (figura 9 b). También, se observó la morfología del VO_2 (Figura 10 c) el cual muestra partículas con forma de hojuelas con longitudes de entre 100 y 500 micras y espesores variables. Por último, la Figura 10 d) presenta las partículas tubulares de los MWCNT con un diámetro aproximado de 20 nm.

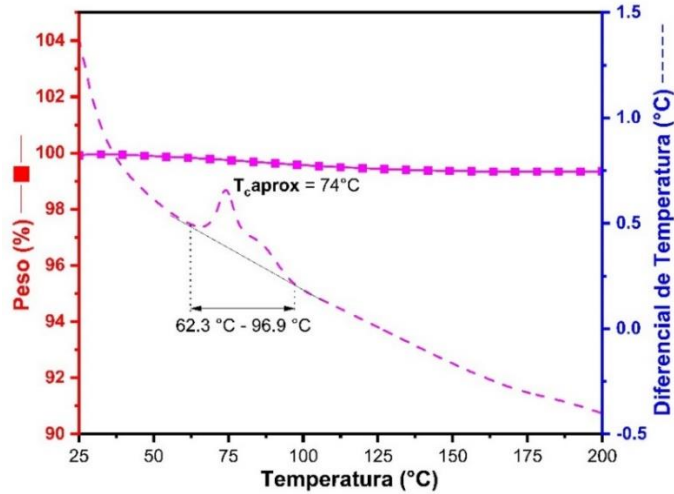


Figura 11. Análisis TGA/DTA al VO_2

Mediante el análisis TGA/DTA se evaluó la estabilidad térmica del VO_2 (figura11). Se observa que el material mantiene su estequiometria entre los 25 °C y 200 °C ya que en este rango de temperaturas no se presentan ganancias de peso por oxidación ni pérdidas del mismo por reducción [24]. La pérdida del 0.7 % del peso de la muestra entre los 60 °C y 200 °C, se debe a la evaporación del agua presente en la muestra.[85]. Además, el incremento del diferencial de temperatura entre 62.3 °C y 96.9 °C es representativo del almacenamiento de calor del VO_2 , en base a esto se puede definir un T_c aproximado a los 74 °C [24].

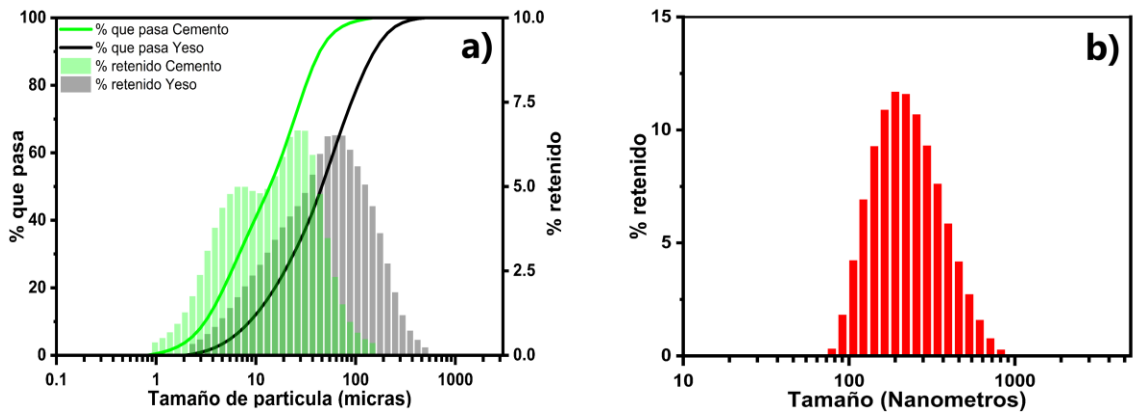


Figura 12. Comparación de las gráficas de distribución de tamaño de partícula: a) CPC 30R y yeso y b) VO_2

Se determinó el tamaño de partícula para el CPC, yeso y VO₂. Con el reporte de resultados se elaboró la figura 12 y tabla 10. Se observa que el tamaño de partícula del VO₂ es menor al del CPC 30R y del yeso lo cual se traduce en una mejor compatibilidad del PCM para ocupar vacíos dentro de las mezclas cerámicas lo cual podría propiciar la densificación de las mezclas con adición del NH [86].

Tabla 10. *Tamaño medio de partícula y desviación estándar del CPC 30R, yeso y VO₂*

Material	Tamaño medio de partícula	Desviación estándar
CPC 30R (micras)	13.76	15.65
Yeso (micras)	45.85	54.26
VO ₂ (nanómetros)	234	127

4.1.2 Caracterización del agregado fino

Para la caracterización de la arena caliza #4, primero se determinó su granulometría (figura 13), la cual cumple con lo establecido la norma ASTM C 144. Además, se calculó su humedad (ecuación 14) absorción (ecuación 15) y densidad (ecuación 16), estos valores fueron utilizados para la elaboración de las dosificaciones de los morteros.

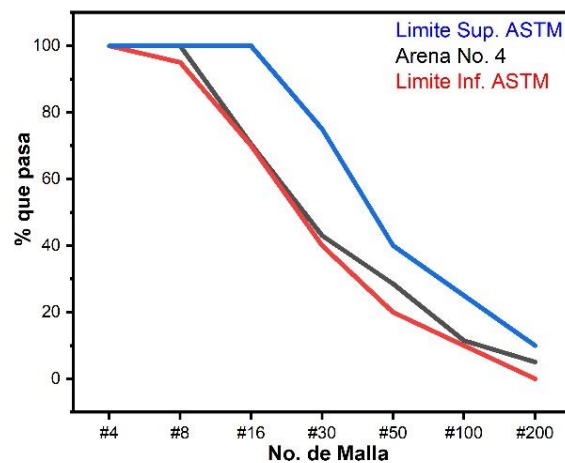


Figura 13. *Granulometría realizada a la arena caliza #4*

$$\text{Ecuación. 14.} - \%H = \frac{P_{Inicial} - P_{Seco}}{P_{Inicial}} * 100 = \frac{500 \text{ g} - 498 \text{ g}}{498 \text{ g}} * 100 = 0.4\%$$

$$\text{Ecuación. 15.} - \%ABS = \frac{P_{SSS} - P_{Seco}}{P_{Seco}} * 100 = \frac{500 \text{ g} - 478 \text{ g}}{500 \text{ g}} * 100 = 4.44\%$$

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 16.} - \text{Densidad} &= \frac{997.5P_{Seco}}{P_{p+a} + P_{SSS} - P_{p+a+m}} = \frac{997.5(478 \text{ g})}{703.8 \text{ g} + 500 \text{ g} - 1493.47 \text{ g}} \\ &= \frac{476805 \text{ g}}{289.67 \text{ g}} = 1646 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

4.2 Nanocompuesto híbrido VO₂/MWCNT

Se realizó la evaluación térmica y microestructural del VO₂ y de las 3 relaciones en peso del nanocompuesto híbrido VO₂/MWCNT: 99 %/1 %, 95 %/5 % y 90 %/10 %, con el objetivo de definir la relación adecuada para la adición a las mezclas. En primer lugar, se aplicó la técnica DSC, de donde se obtuvo la gráfica de flujo de calor mostrada en la Figura 14. Con ella, se afirma que tanto el VO₂ como las 3 relaciones VO₂/MWCNT tienen la propiedad de almacenar calor de forma latente, ya que su análisis de flujo de calor presenta los picos exotérmicos y endotérmicos característicos de los PCMs [12, 18, 19]. Este comportamiento térmico se relaciona de igual manera con los resultados obtenidos por la técnica TGA/DTA ilustrados en la figura 11.

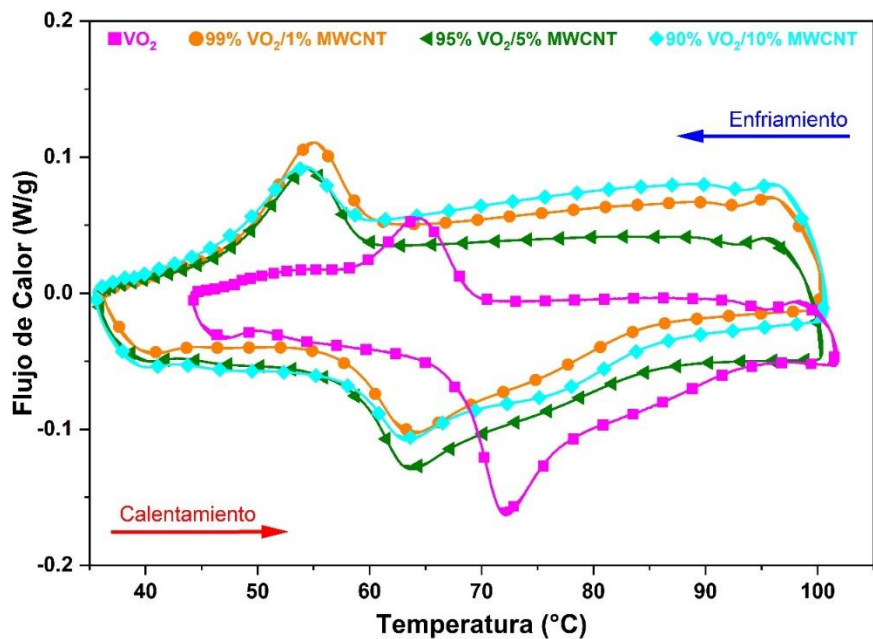


Figura 14. Diagrama de flujo de calor del VO₂ y mezclas de VO₂/MWCNT

Además, al calcular la integral del área bajo la curva del proceso exotérmico y endotérmico y los picos máximos de temperatura respecto al tiempo, se obtuvieron las entalpías y temperaturas de transición (T_c) del VO₂ y las 3 relaciones VO₂/MWCNT mostradas en la tabla 11. Con esta información, se comprobó que el VO₂ tiene un calor latente de 40.51 J/g a una T_c de 72.41 °C. Igualmente, se observa que el calor almacenado por las 3 relaciones VO₂/MWCNT es inferior respecto al VO₂ debido a la disminución del contenido de PCM. También, se presenta una reducción en el T_c de las relaciones 99 %/1 %, 95 %/5 % y 90 %/10 %, lo cual se atribuye a la mejora de la dinámica de absorción-liberación del nanocompuesto por la integración de los MWCNTs. Respecto a estas observaciones se define como mejor opción el uso de la relación 95 % VO₂/5 % MWCNT puesto que presenta una reducción en su T_c sin reflejar una marcada disminución en su calor latente respecto al VO₂ puro.

Tabla 11. Entalpías del VO₂ y mezclas VO₂/MWCNT

Material	Calor Almacenado (J/g)	Temperatura de Almacenamiento (°C)	Calor Liberado (J/g)	Temperatura de Liberación (°C)
VO ₂	40.51 ± 0.41	72.41 ± 0.37	22.84 ± 1.14	64.15 ± 0.16
99% VO ₂ / 1% MWCNT	29.54 ± 1.79	63.86 ± 1.11	20.78 ± 0.06	55.03 ± 0.05
95% VO ₂ / 5% MWCNT	32.06 ± 0.53	63.73 ± 0.59	19.35 ± 0.84	54.53 ± 0.12
90% VO ₂ / 10% MWCNT	25.07 ± 0.045	63.44 ± 0.88	13.96 ± 0.98	54.02 ± 0.11

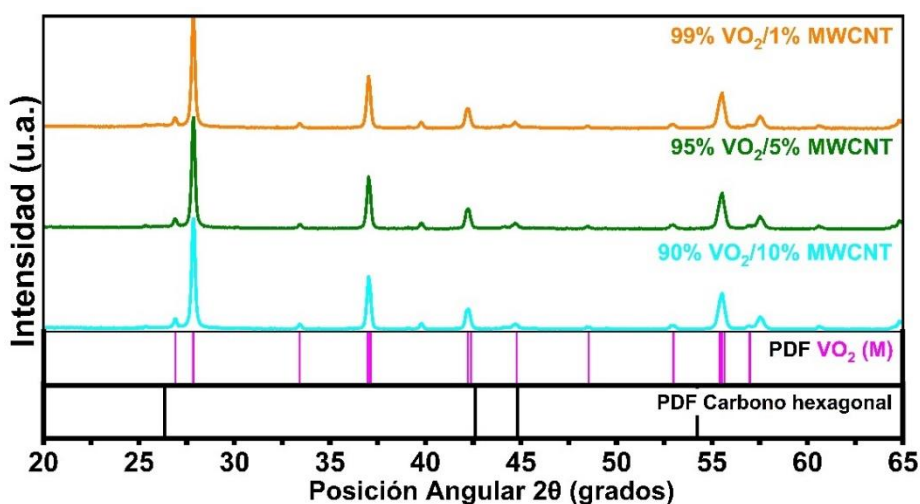


Figura 15. Comparación de los difractogramas de las mezclas del nanocompuesto

En adición, se evaluó la microestructura de las 3 relaciones de VO₂/MWCNT. Por una parte, con la técnica DRX (figura 15) se comprobó que la impregnación de MWCNT no modifica la fase de VO₂ monoclinico ni genera nuevas fases cristalinas. Por el otro, con el análisis FTIR se identificaron los enlaces mostrados en la figura 16 con numero de onda de 495 cm⁻¹ y 586 cm⁻¹ correspondientes a la flexión del enlace V-O-V con arreglo octaédrico y a 981 cm⁻¹ atribuible al estiramiento del enlace V=O [87, 88]. Los resultados del análisis DRX y FTIR aseguran que la síntesis del NH no perturba la estructura cristalina del VO₂ ni propicia la aparición de nuevos compuestos químicos.

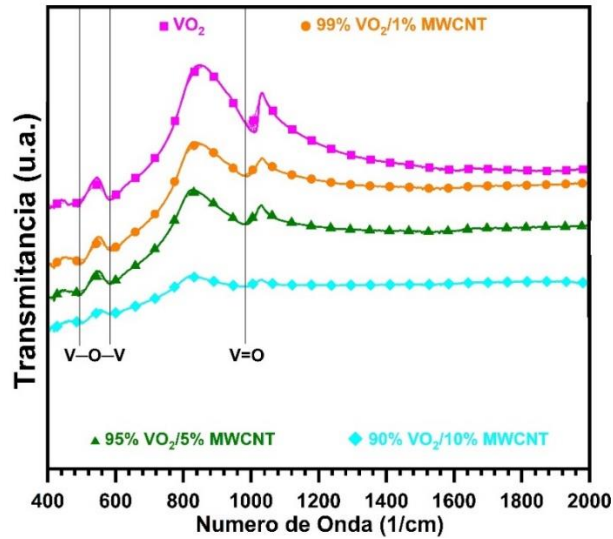


Figura 16. Espectrogramas del VO₂ puro y las mezclas 99 %/1 %, 95 %/5 % y 90 %/10 %

Adicionalmente, mediante análisis EDS elemental se cuantificó en %p el contenido de los elementos oxígeno, carbono y vanadio en las 3 relaciones VO₂/MWCNT (Figura 17). Se observó que en la relación 99 %/1 % las partículas de VO₂ no se impregnan en su totalidad, mientras que, al agregar un 10 % MWCNT y 90 % VO₂ las partículas del PCM se saturan y se generan cúmulos de MWCNT dentro de la mezcla. Tomando en cuenta estos dos casos, se consideró que la mezcla 95 % VO₂/5 % MWCNT mantiene un nivel adecuado de impregnación por lo cual se consideró la relación adecuada para posteriormente adicionarla a los morteros y las pastas de yeso.

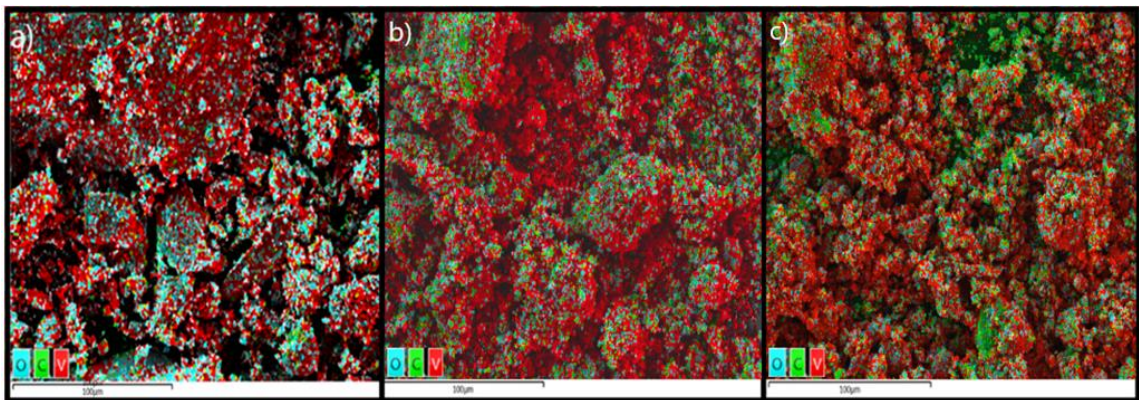


Figura 17. Análisis EDS elemental de las mezclas VO₂/MWCNT, donde a) 99 % VO₂/1 % MWCNT, b) 95 % VO₂/5 % MWCNT y c) 90 % VO₂/10 % MWCNT

Se comparó la morfología del VO₂ puro con la de la mezcla 95 % VO₂/5 % MWCNT (figura 18). Se observa que las partículas de VO₂ tienen forma de hojuelas con longitudes de alrededor de los 200 nm similar a la longitud promedio mencionada en la tabla 10. Además, la figura 18 b) ilustra el acoplamiento de los MWCNTs sobre las partículas de VO₂, este acomodo es el responsable de mejorar la recepción/liberación de calor del ambiente por parte del PCM reflejado en los resultados de la técnica DSC aplicada con antelación (figura 14).

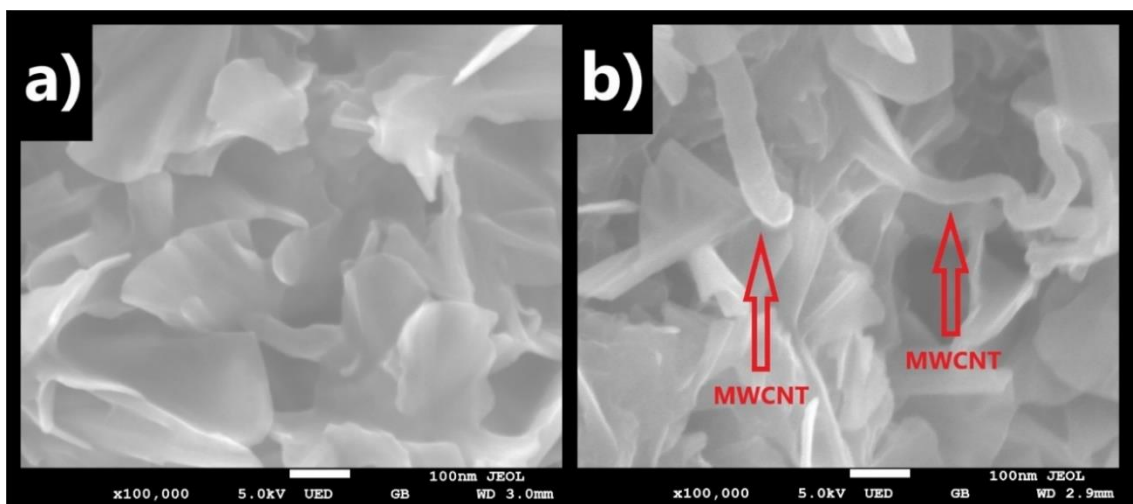


Figura 18. Micrografías de: a) Dióxido de vanadio puro y b) 95 % VO₂/5 % MWCNT

Se aplicó la prueba de conductividad térmica en pastillas sin comprimir del VO₂ y el NH a fin de comprar ambos valores. La tabla 12 indica los valores de conductividad térmica del VO₂ puro y la mezcla 95 % VO₂/5 % MWCNT. Se confirmó que la presencia de los MWCNT en el VO₂ triplica la conductividad térmica del PCM. Este resultado comprueba la capacidad mejorar de conductividad térmica de los materiales base carbono sobre los PCMs.

Tabla 12. Conductividad térmica del VO₂ puro y de la mezcla 95 % VO₂/ 5 % MWCNT

Material	Conductividad térmica (W/mk)
VO ₂	0.049
95 % VO ₂ /5 % MWCNT	0.17

4.3 Especímenes de prueba con y sin adición del nanocompuesto híbrido VO₂/MWCNT

4.3.1 Determinación de la relación agua/material cementante

Los resultados de la prueba de fluidez se muestran en la tabla 13. Cabe mencionar que se agregaron porcentajes de aditivo Etilenglicol RA en un 0.5, 1.0 y 1.5 % en volumen de remplazo del agua de mezclado para evaluar el efecto del aditivo dispersante en la mezcla.

Tabla 13. Resultados de prueba de fluidez

Muestra	Relación A/C	Cemento (gr)	Arena (gr)	Agua (ml)	Aditivo Dispersante (ml)	Fluencia (%)
CPC 0.70	0.70	139.6	658.4	97.72	0	90
CPC 0.74	0.74	139.6	658.4	103.3	0	100
CPC 0.7405	0.74	139.6	658.4	102.78	0.5165	105
CPC 0.7410	0.74	139.6	658.4	102.267	1.033	105
CPC 0.7415	0.74	139.6	658.4	101.75	1.5495	106
CPC 0.7420	0.74	139.6	658.4	101.234	2.066	107

La prueba comenzó con una relación a/c de 0.70 donde la fluidez fue muy baja. Posteriormente, se aumentó a 0.74 donde la fluidez fue del 100 % y al realizar la adición del dispersante este valor se mantuvo en el rango de 110 ± 5 %, como lo establece la

norma ASTM correspondiente. Se optó por seleccionar la relación del 0.74 y 1.5 %v de dispersante como parámetros para la elaboración de los morteros de CPC.

La relación agua/yeso se determinó respecto a la prueba del vaso de saturación. Al igual que con las pruebas de fluidez del mortero se utilizaron los mismos porcentajes de adición de aditivo dispersante. Con dicha técnica se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados de la prueba de vaso de saturación

Muestra	Yeso (gr)	Agua (ml)	Dispersante (ml)	Relación A/Y
Yeso 0	161.8	100	0	0.618
Yeso 05	159.5	99.5	0.5	0.626
Yeso 10	161.9	99	1.0	0.617
Yeso 15	160.9	98.5	1.5	0.621
Yeso 20	166.5	98	2.0	0.638

Se observó que el aditivo no modifica en gran medida la fluidez sino más bien la consistencia del yeso, por lo que, se eligió una relación agua/yeso promedio igual a 0.625 usando 1.5 %v de aditivo.

4.4 Densidad de los morteros

La figura 19 muestra los valores de las densidades de los morteros con y sin adición. Se observó un incremento en las densidades de las muestras con adición respecto a la M0 del 0.32 %, 0.73 %, 2.56 % y 2.72 % para M05, M1, M2 y M3, respectivamente. Estos datos evidencian el acoplamiento de las partículas del NH en los vacíos de la matriz del mortero, lo cual propicia la formación de mezclas más densas conforme incrementa la cantidad de VO₂/MWCNT. Sin embargo, se considera que la matriz del mortero se satura con el NH en adiciones mayores al 2 %, puesto que la diferencia entre el incremento de las

densidades de las muestras M2 y M3 es menor a la que se presenta entre las muestras M05, M1 y M2.

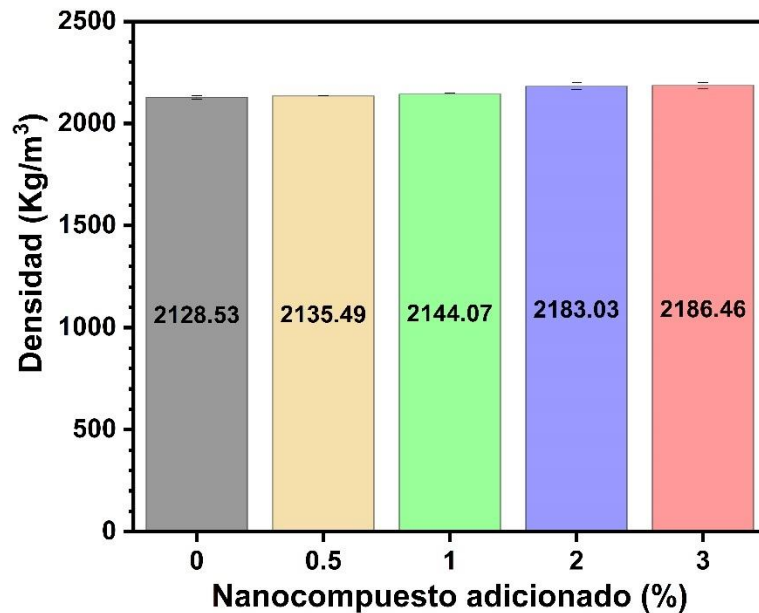


Figura 19. Densidades de los morteros de CPC con y sin incorporación del NH

4.5 Caracterización microestructural de los morteros

Con la técnica de DRX en los morteros se le dio seguimiento al desarrollo de fases hidratadas a la edad de 3, 7, 14 y 28 días. Las figuras 20 y 21 ilustran los difractogramas de las mezclas M0, M1, M2 y M3. La identificación de las fases fue similar para todas las muestras a todas las edades, los compuestos encontrados fueron: tobermorita ($\text{Ca}_5\text{H}_{10}\text{O}_{23}\text{Si}_6$) con PDF No.: 00-045-1480, portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) de PDF No.: 01-084-1265, cuarzo (SiO_2) con PDF No.: 01-085-0335, calcita, belita y etringita ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_4\text{S}_6\text{O}_{100}\text{H}_{128}$) de PDF No.: 96-901-5085. Estas fases corresponden a los productos de hidratación del CPC reportados por Scrivener, Garcia y Bach [85, 89, 90]. Con esta identificación se concluye que la presencia del NH en un mortero de CPC no afecta en la formación de compuestos hidratados.

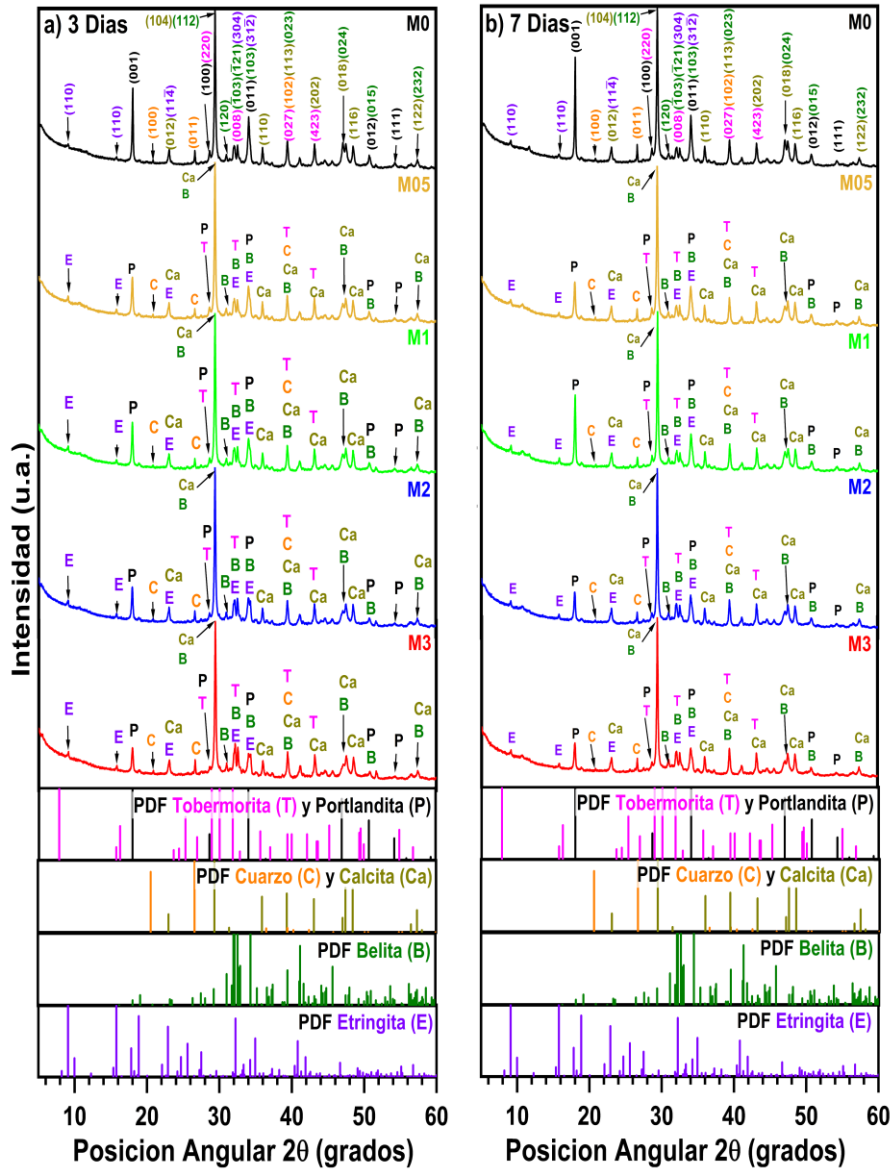


Figura 20, Difractogramas de los morteros: a) 3 días de edad y b) 7 días de edad

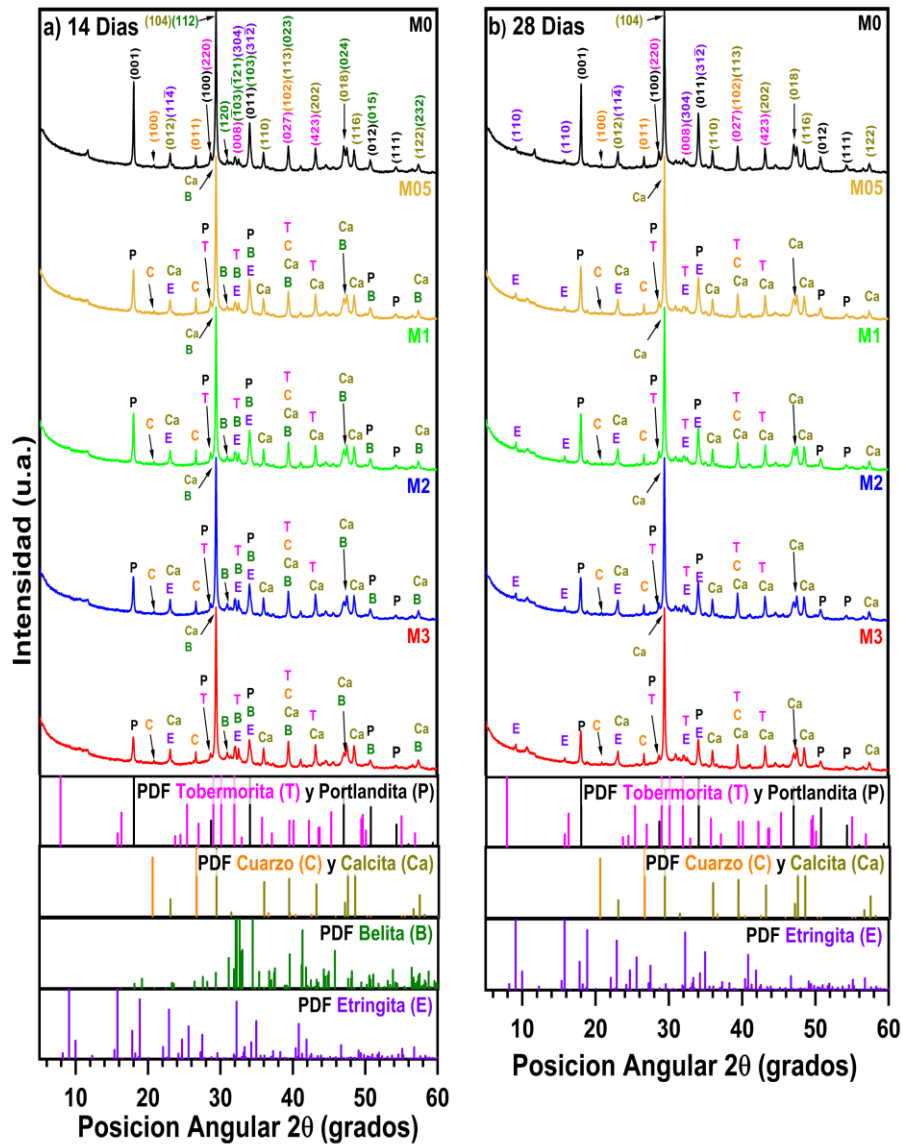


Figura 21. Difractogramas de los morteros: a) 14 días e edad y b) 28 días de edad

La figura 22 muestra los espectrogramas de los especímenes M0, M05, M1, M2 y M3 obtenidos mediante FTIR a los 3, 7, 14 y 28 días de edad. Se identificaron los picos de transmitancia asignados a la excitación de los enlaces de los compuestos que integran los morteros bajo estudio. Para todos los casos, se presentó el pico con número de onda de 3637 cm^{-1} correspondiente a la excitación de los enlaces de la portlandita [91]. Además, se identificó una señal a 3450 cm^{-1} asignada al movimiento simétrico y asimétrico del enlace O-H y otra a 1664 cm^{-1} causado por la deformación del arreglo H-O-H, ambas señales corresponden a la presencia de moléculas de agua en las muestras [92]. Por otro

lado, se tienen registros a 1413 cm^{-1} , 877 cm^{-1} y 77 cm^{-1} propios de la vibración del enlace entre el CO_3 de la fase de calcita [93]. El pico a 1109 cm^{-1} corresponde a la excitación del enlace del SO_4 propio de la fase etringita [94]. Igualmente, se obtuvo un pico a 974 cm^{-1} por las fluctuaciones en el enlace Si-O con estructura tetragonal la cual es característica de la fase de tobermorita [91]. La identificación de estas fases respalda los resultados obtenidos por análisis DRX mostrados en las figuras 20 y 21.

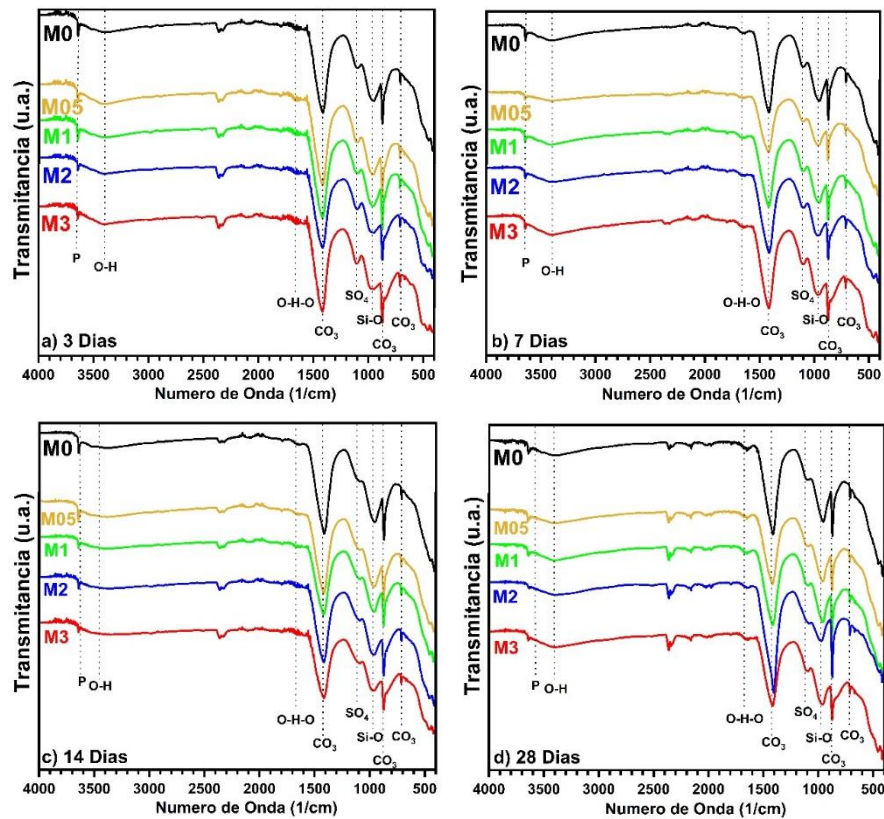


Figura 22. Espectrogramas de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3, donde: a) 3 días de edad, b) 7 días de edad, c) 14 días de esas y d) 28 días de edad

Se aplicó la técnica SEM en las mezclas de mortero para dar un seguimiento al desarrollo del tamaño de partícula a las edades de 3, 7, 14 y 28 días. Para los 3 días de edad se tienen partículas con diámetros de 1 a 5 micras en todas las mezclas (figura 23). A 7 días de curado, los especímenes exhibieron un incremento en el tamaño promedio con partículas de hasta 7 micras (figura 24).

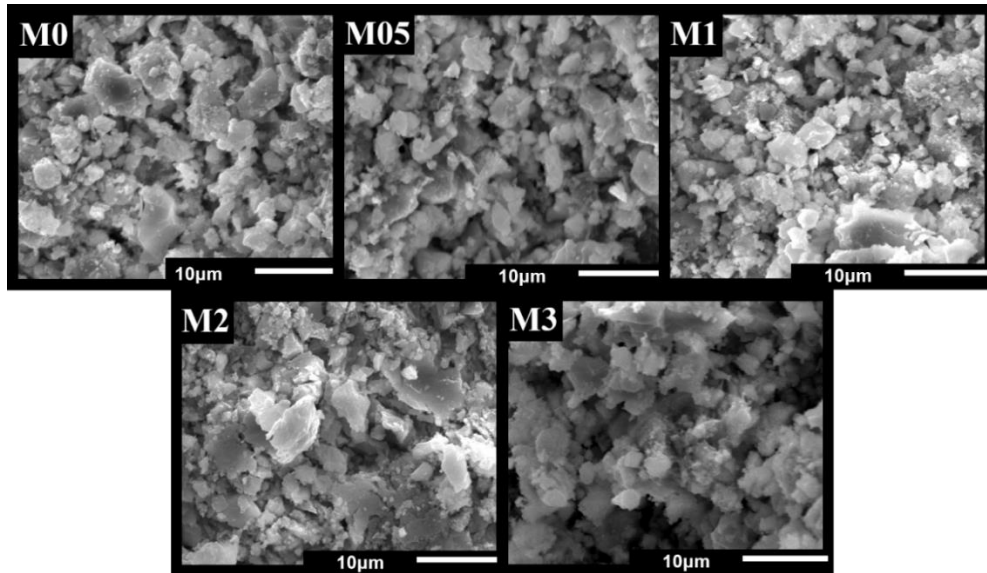


Figura 23. Microscopias de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3 a 3 días de edad

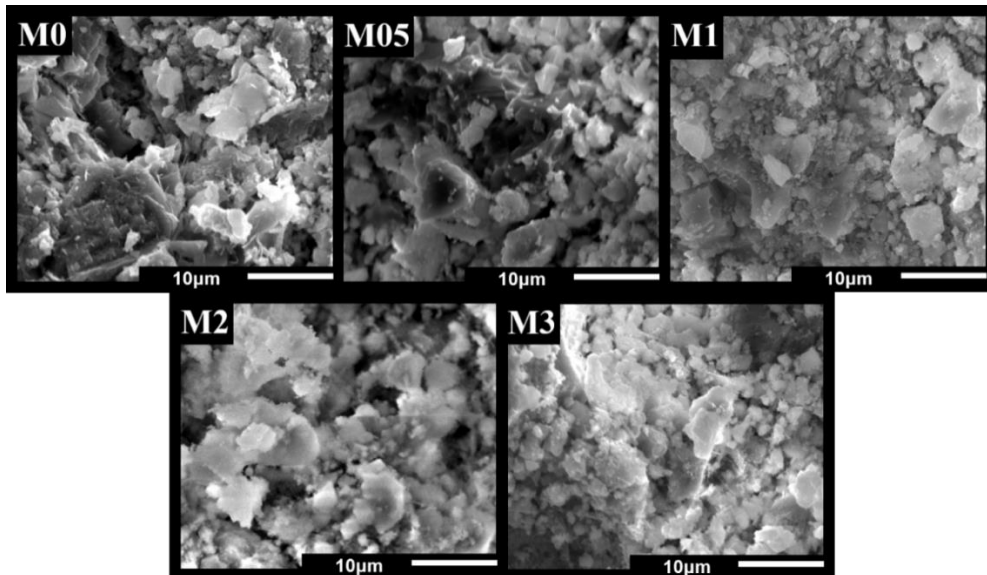


Figura 24. Microscopias de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3 a 7 días de edad

El seguimiento del tamaño de partícula para los 14 días mostró tamaños de hasta 12 micras en todas las mezclas (figura 25). Para los 28 días, se observa un tamaño de hasta 15 micras en las partículas de las muestras M0, M05 y M1, mientras que, las muestras M2 y M3 presentaron tamaños de máximo 10 micras (figura 26). El incremento en el tamaño de

partícula durante los 3, 7, 14 y 28 días es representativo de la formación de gel de tobermorita, uno de los principales productos de hidratación del CPC [95]. La detección de este compuesto mediante SEM se relaciona con las fases identificadas por DRX y los enlaces interpretados por la técnica FTIR en las figuras 20-22.

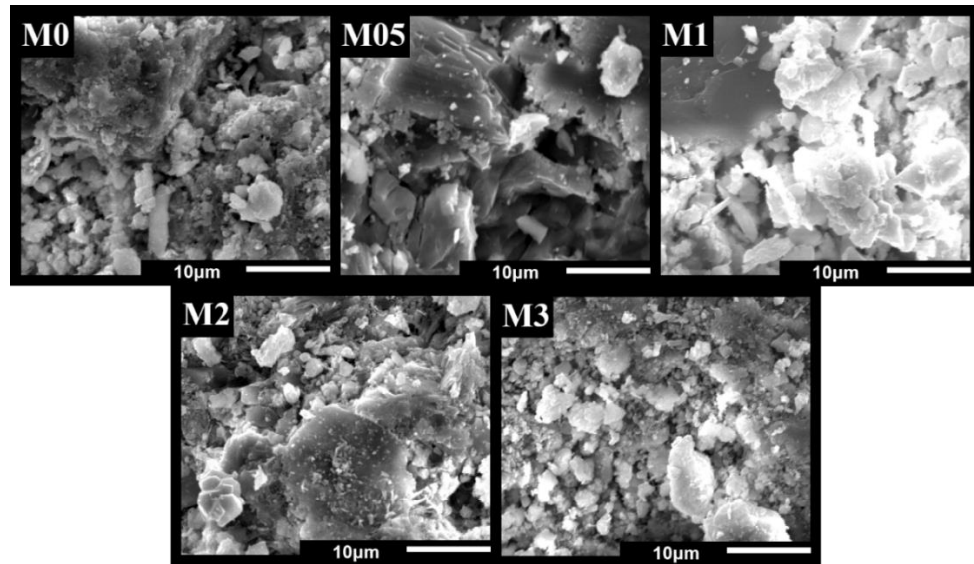


Figura 25. Microscopias de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3 a 14 días de edad

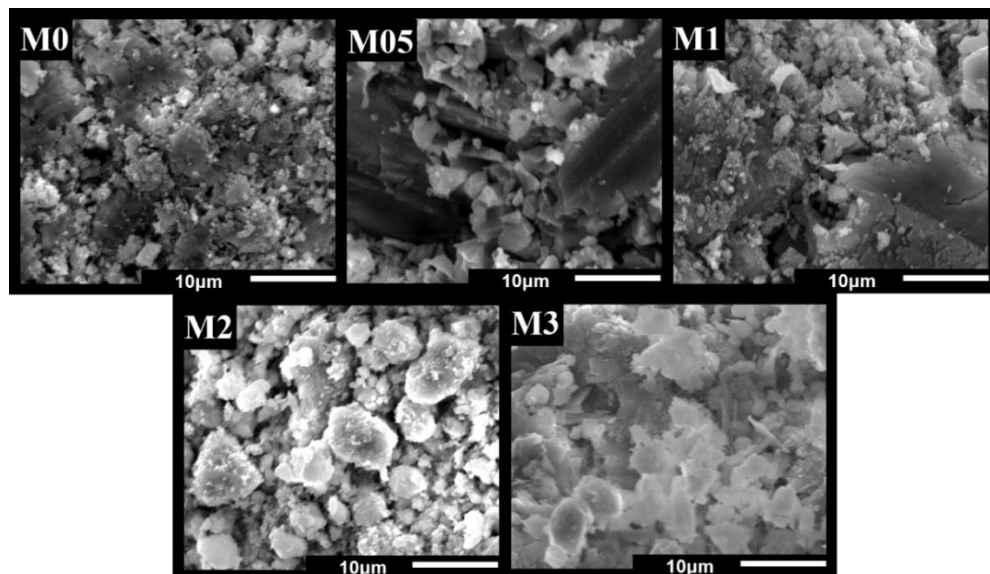


Figura 26. Microscopias de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3 a 28 días de edad

Adicionalmente, con la técnica EDS se cuantificó el %p del elemento vanadio en las muestras M0, M05, M1, M2 y M3 (figura 27). Se comprobó que el uso de ultrasonido y AD dio como resultado una buena dispersión del nanocompuesto en los morteros de CPC, puesto que se observa el incremento en la presencia del elemento vanadio perteneciente al NH.

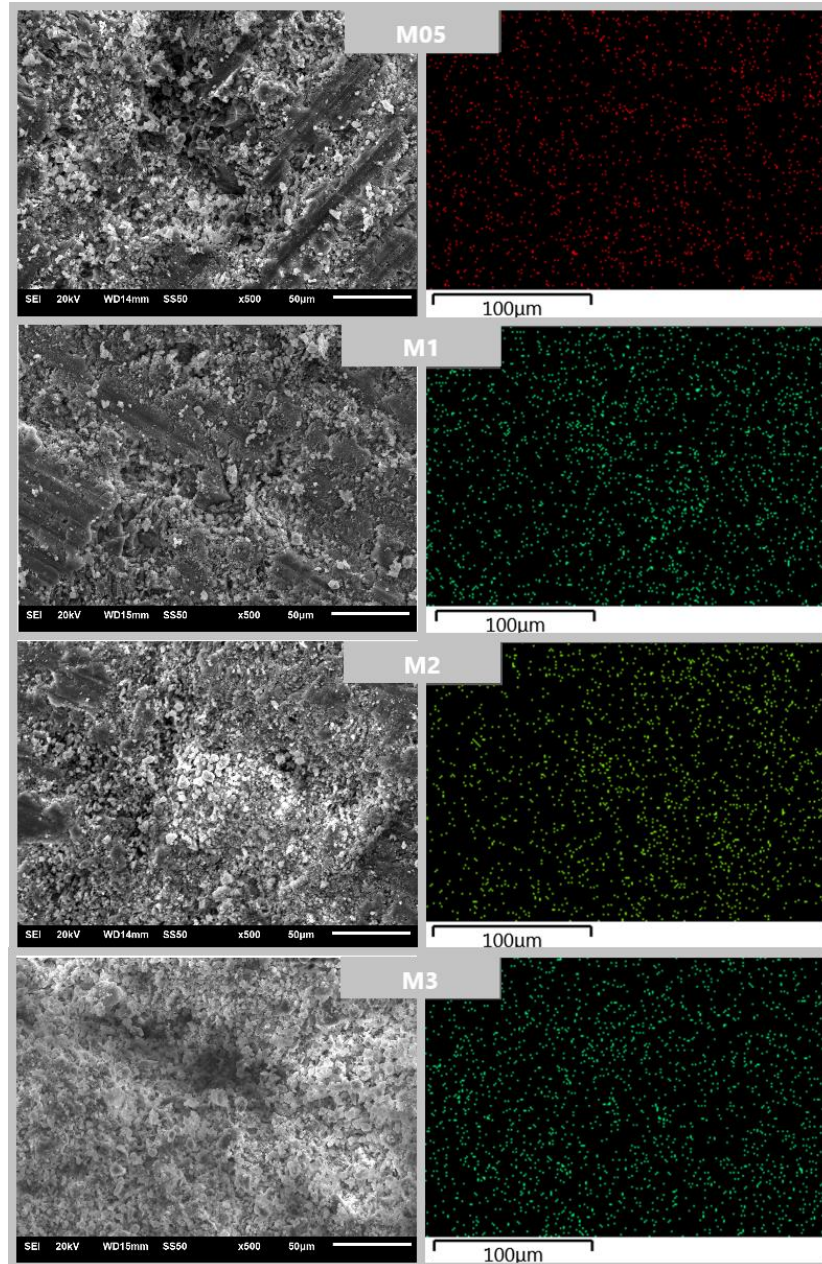


Figura 27. Microscopias (izquierda) y análisis EDS (derecha) a los morteros M05, M1, M2 y M3 con enfoque en el elemento vanadio

La tabla 15 muestra la cuantificación del elemento vanadio presente en los morteros, los porcentajes expuestos son los valores reales del NH dado que se toma en cuenta el peso total del mortero, el cual incluye: el peso del cemento hidratado, arena y NH. De igual forma, se observa un incremento proporcional en las muestras respecto al porcentaje de nanocompuesto adicionado.

Tabla 15. Cuantificación en %p del elemento vanadio en los morteros M0, M05, M1, M2 y M3

Mezcla	Vanadio (%p)
M0	0
M05	0.125 ± 0.04
M1	0.275 ± 0.08
M2	0.436 ± 0.20
M3	0.858 ± 0.6

4.6 Estudio de la cinética de hidratación de los morteros

Mediante calorimetría isotérmica se le dio seguimiento a la cinética de hidratación de los morteros con y sin adiciones del NH. Se obtuvieron las gráficas de flujo de calor y calor acumulado ilustradas en la figura 28. Por un lado, se puede observar en la figura 28 a) que la incorporación del nanocompuesto en el mortero propicia la disminución del pico máximo de liberación de calor conforme mayor es la cantidad de adición, reduciendo el pico exotérmico respecto a M0 en un 10%, 36%, 54% y 70% para M05, M1, M2 y M3 respectivamente. Además, se percibe un retardo en el comienzo de la liberación de calor, donde, M0 inicio 2 horas después de hidratarse, mientras que, las mezclas con nanocompuesto liberaron calor a partir de las 3.5, 5, 6 y 9 horas para M05, M1, M2 y M3 respectivamente. Por otro lado, la Figura 28 b) ilustra la gráfica del calor liberado acumulado, las muestras M05, M1, M2 y M3 liberaron 6 %, 5 %, 9.4 % y 12.5 % más calor que la muestra M0, respectivamente. Este fenómeno se debe al efecto filler que tiene

el NH dentro de las mezclas, puesto que actúan como puntos de nucleación para la reacción de hidratación del CPC [85].

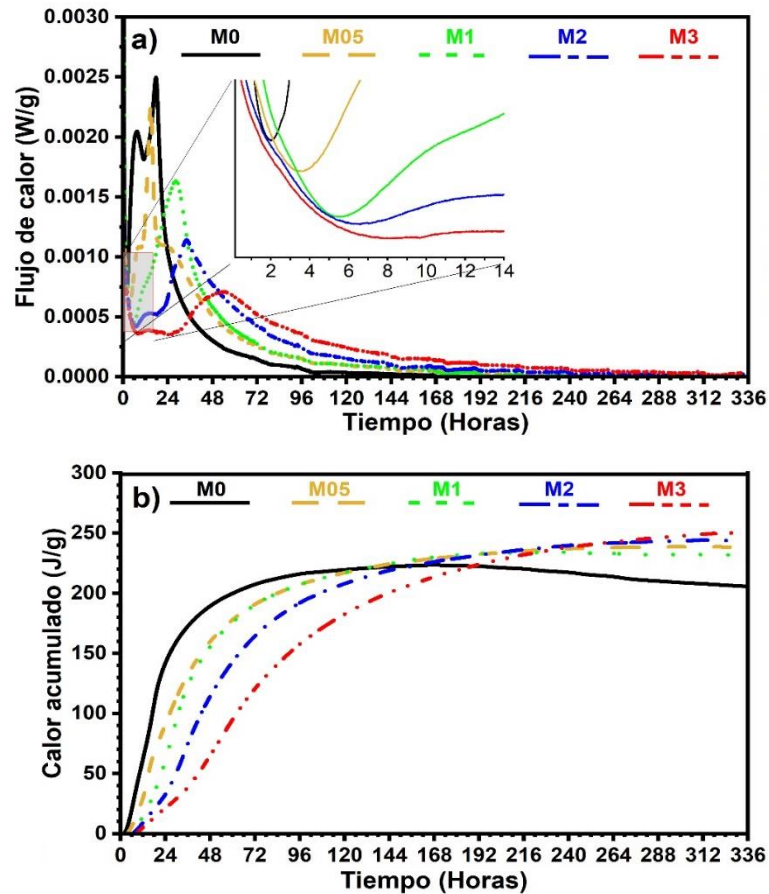


Figura 28. Diagramas de la cinética de hidratación de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3, donde: a) grafica de flujo de calor y b) grafica de calor acumulado

Se observa que la adición del nanocompuesto en los morteros tiene un efecto regulador del calor que se libera durante la hidratación, demostrando su capacidad para almacenarlo mientras aumenta la temperatura, para liberarlo una vez la temperatura comienza a descender. Ocasionando que disminuya el pico máximo exotérmico conforme mayor es la adición del nanocompuesto, esto podría favorecer la reducción del fenómeno de contracción por secado, puesto que el calor se liberaría con menor magnitud en un mayor lapso de tiempo.

4.7 Prueba de resistencia a la compresión de los morteros

Se realizó la prueba de resistencia a la compresión para evaluar el desarrollo de esta propiedad en las mezclas respecto a la cantidad de nanocompuesto adicionado. Los valores de resistencia a la compresión y su desviación estándar se ilustran en la figura 29. Se percibe que para los 28 días de edad, las mezclas M05 y M1 incrementan un 20.5 % y 32.6 % su resistencia a la compresión respecto a M0. Mientras que, la mezclas M2 exhibe un desarrollo de resistencia similar a la M0, sin embargo, la M3 tiene una disminución del 18.8 % de resistencia en comparación con la mezcla sin adiciones. Este comportamiento mecánico y el incremento de la densidad en los morteros adicionados comprueban que el NH funciona como filler dentro de las mezclas mencionado en la sección 4.6. La pérdida de resistencia a la compresión de M3 es provocada por el incremento de aglomeraciones del nanocompuesto en la muestra [48]. Cabe mencionar que la reducción de resistencia a la compresión entre las edades de 14 y 28 días en todas las muestras es atribuible a la composición variable del CPC (contenido de escoria, puzolana, humo de sílice y caliza), la cual puede ocasionar desviaciones en las propiedades mecánicas de este material [96]. Los resultados expuestos en esta sección demuestran que la integración de hasta 2 % wt en un mortero de CPC no tiene efecto negativo en la resistencia a la compresión del mismo, más bien tiende a mejorar este desempeño mecánico.

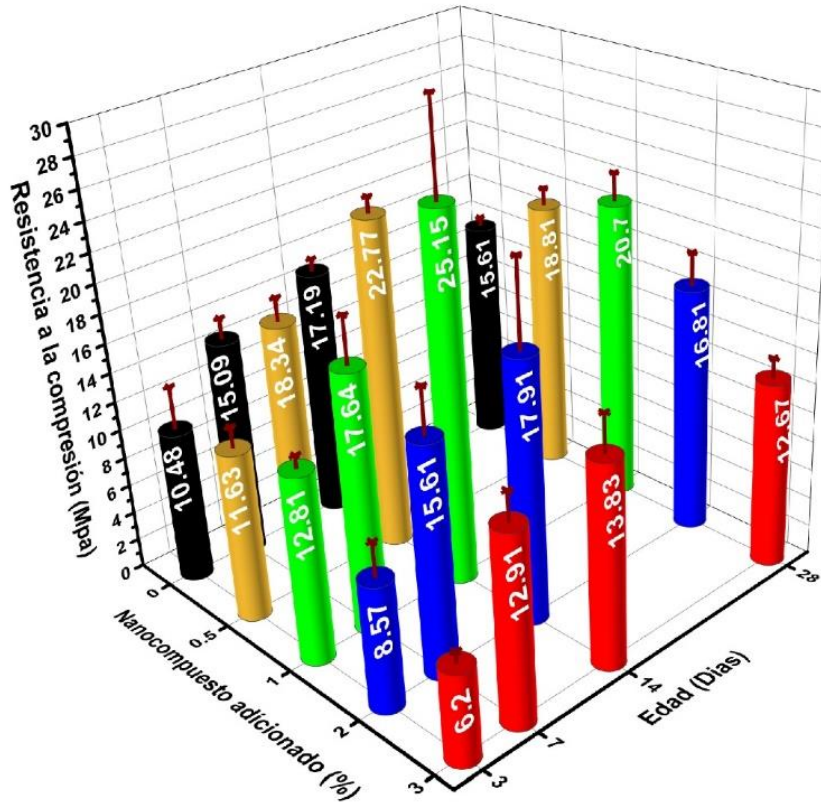


Figura 29. Comparación de resistencia a la compresión de los morteros de CPC 30R con y sin nanocompuesto a 3, 7, 14 y 28 días de edad

4.8 Angulo de contacto del agua de los morteros

Se realizó la medición del ángulo de contacto del agua y energía libre superficial para evaluar la permeabilidad de los morteros de CPC en funcional de contenido del NH. La figura 30 muestra una medición de cada mortero, en ella se aprecia que los especímenes con y sin adiciones presentaron ángulos similares entre sí.

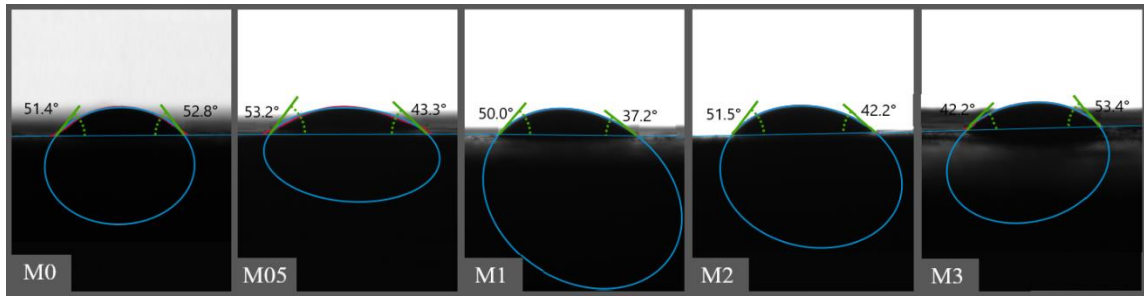


Figura 30. Angulo de contacto del agua de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3

La tabla 16 indica los valores de ángulo de contacto promedio y la energía libre superficial, donde todas las muestras mantuvieron un ángulo alrededor de los 65° asignado a los materiales hidrofílicos [97]. Se observa que la presencia del NH en los morteros tiende a disminuir el ángulo de contacto del agua respecto a un mortero sin adiciones. Es decir, el agua penetra con mayor facilidad los morteros modificados. Esto se traduce en un incremento de la energía libre superficial del material lo que aumenta la atracción que ejerce la superficie de los morteros con NH al entrar en contacto con el agua [98].

Tabla 16. Angulo de contacto del agua promedio y energía libre superficial de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3

Muestra	Angulo de contacto del agua (°)	Energía libre superficial (mN/m)
M0	51.45 ± 5.68	52.92
M05	49.31 ± 2.69	54.16
M1	48.18 ± 13.5	54.81
M2	49.86 ± 8.65	53.85
M3	48.77 ± 4.84	54.47

4.9 Resistencia al agua de los morteros

La grafica 31 ilustra la comparación de la pérdida de masa y la resistencia a la compresión promedio de los morteros de CPC después de 16 ciclos del método humectación-secado.

Se observa que las muestras M05 y M1 tuvieron una reducción en su masa considerable respecto a los demás especímenes, esto se debe a humedad residual con la que contaban los especímenes al inicio del método, tal como se aprecia en la figura 32, donde, entre el ciclo 1 y 2 el agua retenida por estas dos muestras se evaporó. Mientras que para el ciclo 5 se tuvo la mayor pérdida de peso de las muestras debido a la evaporación de las moléculas de agua contenidas en los poros más cerrados de la microestructura de los morteros [99]. Se concluye que el nanocompuesto no propicia la pérdida de masa durante ciclos de humectación-secado, respecto a la muestra de referencia.

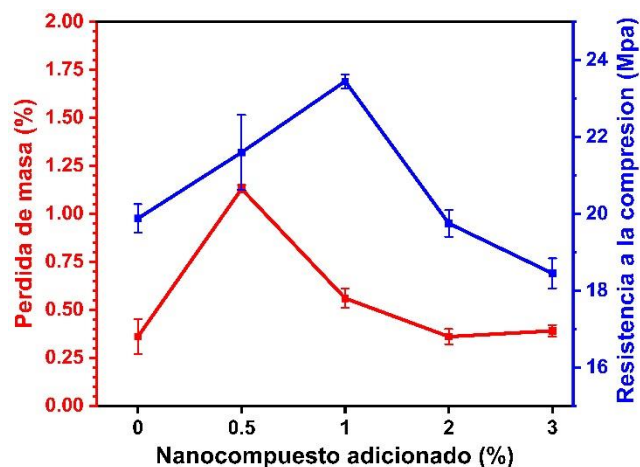


Figura 31. Gráfica de pérdida de masa y resistencia a la compresión de los morteros después de 16 ciclos de humectación-secado.

Además, la figura 31 resalta la resistencia a la compresión de las muestras al cabo de la aplicación de la prueba. Donde, las mezclas M05 y M1 incrementaron su resistencia un 8.6 % y 18.9 %, mientras que el espécimen M2 se mantuvo similar y la M3 redujo su resistencia un 7.2 %, respecto a la muestra M0. Tomando en cuenta los resultados de resistencia a la compresión expuestos en la figura 29, las muestras incrementaron este valor, lo que indica que la adición del NH en el mortero no tiene un efecto negativo respecto a la resistencia al agua de este material, más bien después de varios ciclos de humectación-secado los especímenes mejoran esta propiedad mecánica.

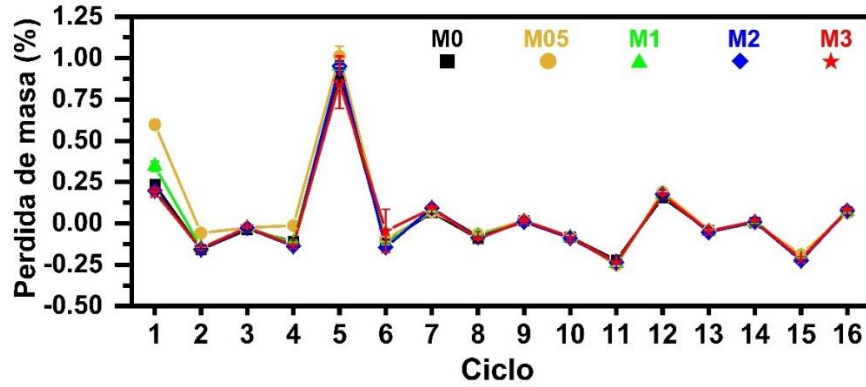


Figura 32. Pérdida de masa de lo morteros durante el método humectación-secado

Adicionalmente, la figura 33 detalla la absorción de agua de los especímenes de mortero durante la aplicación del método humectación-secado. Se observa que la incorporación del 1 %, 2 % y 3 % VO₂/MWCNT propicia el incremento de la absorción de agua, en el caso de la adición del 0.5 % se redujo la cantidad de agua absorbida respecto a la M0 dado que esta muestra retuvo una mayor cantidad de agua desde el comienzo de la prueba, esto se refleja en incremento de la pérdida de masa durante todos los ciclos respecto al resto de los morteros (figura 32). El incremento de la absorción de las muestras con NH respecto a la mezcla base está relacionado con el aumento de la permeabilidad obtenida en la sección 4.8.

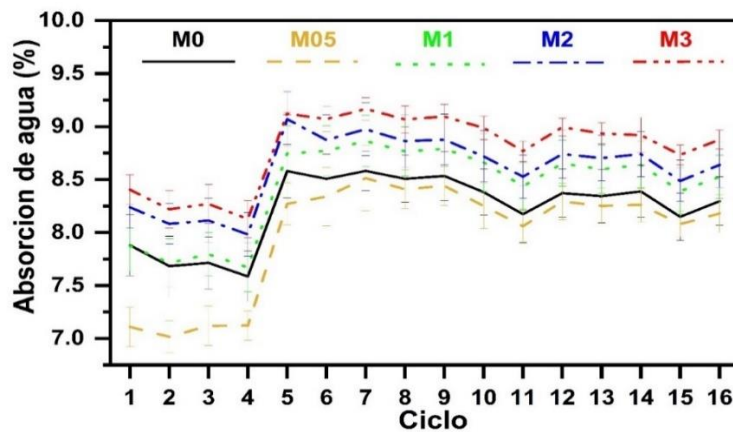


Figura 33. Grafica de absorción de agua de los morteros durante 16 ciclos de humectación-secado

Se aplicó la técnica SEM en las muestras de mortero después de la prueba de resistencia al agua (figura 34) para comparar su morfología con la presentada en los especímenes a 28 días de edad (figura 26). Se observa un incremento en el tamaño de las partículas para todas las muestras con diámetros de hasta 20 micras. Este hecho se relaciona con el aumento de la resistencia a la compresión de los especímenes (figura 31).

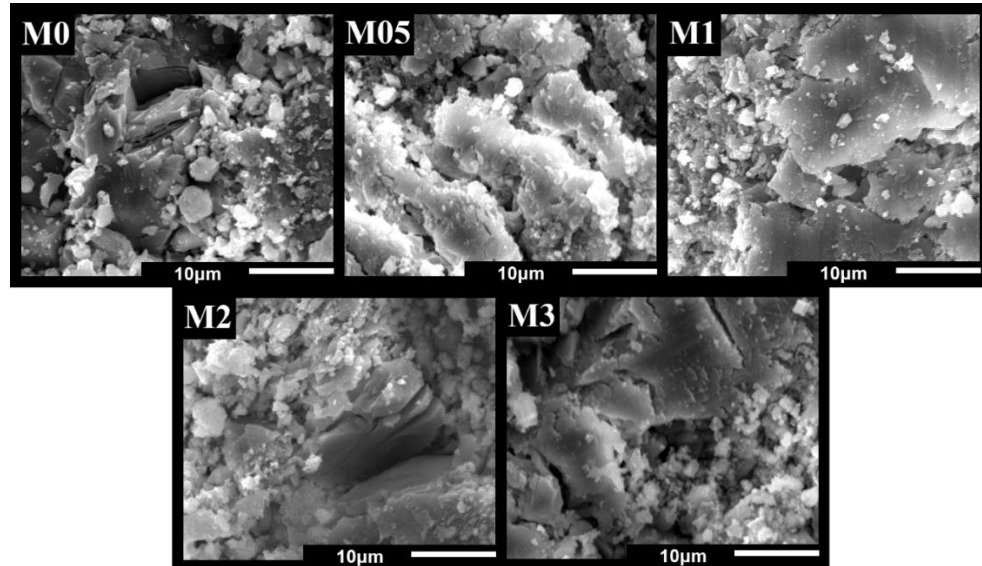


Figura 34. *Microscopía de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3 después de 16 ciclos de humectación-secado*

4.10 Propiedades térmicas de los morteros

La figura 35 ilustra la conductividad térmica de los morteros con y sin adición en el rango de 20 a 50 °C. Se observa que la integración del VO₂/MWCNT en el mortero de CPC propicia la disminución de la k, donde, las mezclas M05, M1, M2 y M3 tuvieron una reducción del 7.5 %, 12 %, 17.2 % y 19.2 % a los 20 °C, respectivamente. Por otra parte, a los 50 °C la k de la M0 incrementó a 1.652 W/mK, mientras que, las muestras M05, M1, M2 y M3 se mantuvieron por debajo de este valor un 17 %, 21.1 %, 19.8 % y 24 %, correspondientemente. La reducción de la conductividad térmica es un fenómeno

característico de la integración de PCMs en materiales de construcción, ya que el almacenamiento de calor disminuye el flujo de calor a través del material [100, 101].

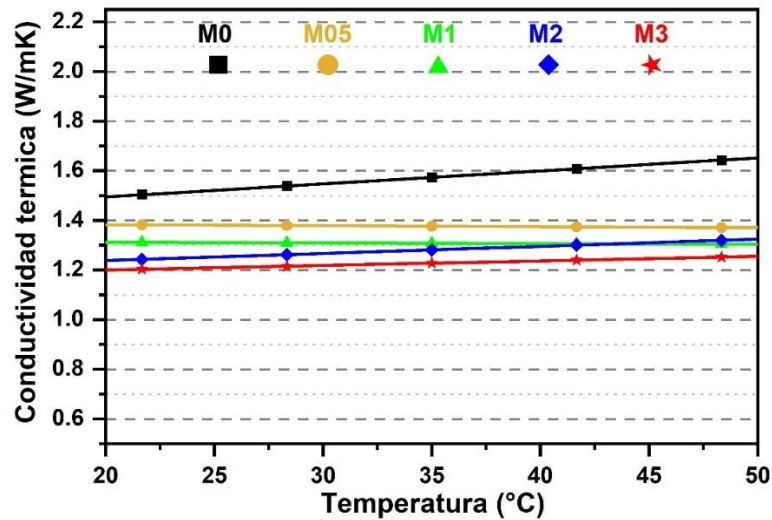


Figura 35. Conductividad térmica de los morteros M0, M05, M1, M2 y M3

Con la técnica de calorimetría isotérmica se obtuvieron los valores de calor específico para los morteros de CPC (figura 36). Por un lado, las mezclas con incorporación del NH reducen su valor de C_p respecto a M0 en 1.11 %, 2.71 %, 2.54 % y 2.56 % para M05, M1, M2 y M3, respectivamente a 20 °C. Por el otro, para los 50 °C el C_p de la muestra base se mantiene superior en un 3.02 %, 1.41 %, 0.88 % y 2.09 % respecto a las muestras M05, M1, M2 y M3. La tendencia de los morteros adicionados a disminuir su calor específico se debe a que la cantidad de NH en la mezcla no es la suficiente para incrementar su C_p , en otras palabras, los moteros modificados requieren una menor cantidad de energía para incrementar su temperatura. La obtención los valores de densidad, C_p y conductividad térmica fueron utilizados para la evaluación de la inercia térmica de los morteros, puesto que, estas propiedades por si solas no definen el comportamiento térmico del material, si no, la intervención de cada una de ellas en conjunto define la facilidad con la que los materiales permiten el flujo de calor y lo intercambian con su entorno[8, 9, 31].

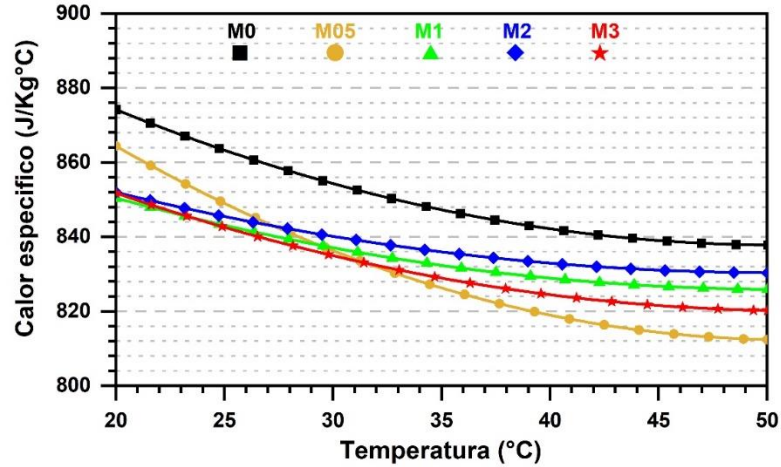


Figura 36. Calor específico de los morteros de CPC

Se determinó la difusividad y efusividad de los materiales. Por un lado, la figura 37 a) ilustra las estimaciones de la α , donde, conforme se incrementa la cantidad del NH en el mortero se reduce su difusividad, por lo tanto, el flujo de calor a través de estos materiales es más lento con respecto a la mezcla base [10]. Por el otro, el valor de la ϵ tiene a disminuir entre mayor es la cantidad de VO_2/MWCNT en las muestras (figura 37 b), esto se traduce en que los materiales modificados tienen una menor capacidad de intercambiar calor durante un flujo dinámico en comparación de la M0 [102]. Con estos resultados, se infiere que los morteros adicionados con NH incrementan su inercia térmica respecto a un mortero convencional, provocando que el flujo de calor a través de ellos sea lento y lo intercambien con su entorno en un periodo de tiempo más largo.

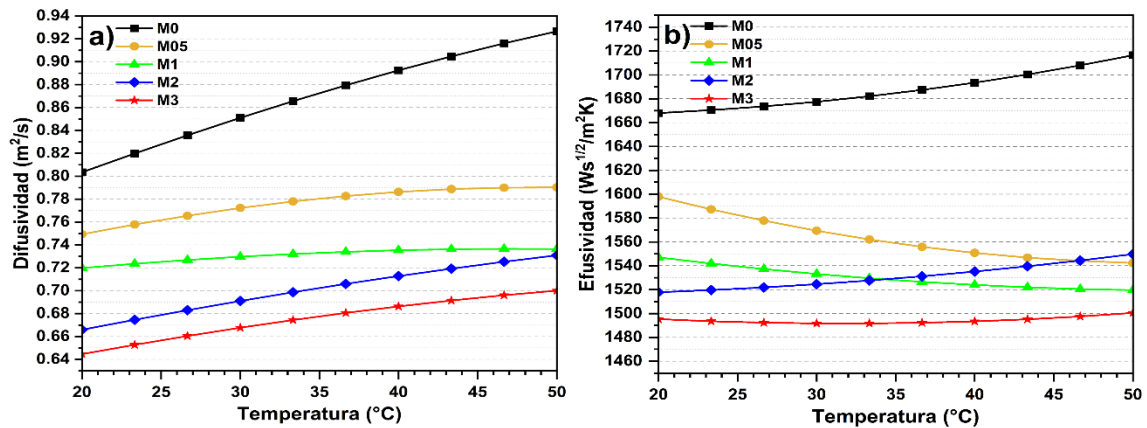


Figura 37. Graficas de la difusividad (a) y efusividad (b) térmica de los morteros

La figura 38 muestra la temperatura interna de las mezclas con y sin adición durante la prueba de desempeño térmico. En primer lugar, las muestras con adición requieren menor tiempo para incrementar su temperatura a 40 °C respecto a la M0 (tabla 17). El acelerado calentamiento de las muestras con adición se debe a que estas requieren una menor cantidad de calor para elevar su temperatura, como se observó en la figura 36. De forma opuesta, la muestra M0 requirió menor tiempo para reducir su temperatura a 26 °C respecto a las muestras con incorporación (tabla 17). Este desplazamiento en el tiempo de enfriamiento se debe al remanente del calor almacenado por el NH adicionado en las muestras.

Tabla 17. Comparación del tiempo y temperatura de calentamiento y enfriamiento de los morteros

Mezcla	Calentamiento		Enfriamiento	
	Δ Tiempo respecto a M0	Δ Temperatura cuando M0 = 40 °C	Δ Tiempo respecto a M0	Δ Temperatura cuando M0 = 26 °C
M05	19 min	0.7	1 min	0.3
M1	19 min	0.8	5 min	0.1
M2	21 min	1	3 min	0.4
M3	1 min	0.1	4 min	0.3

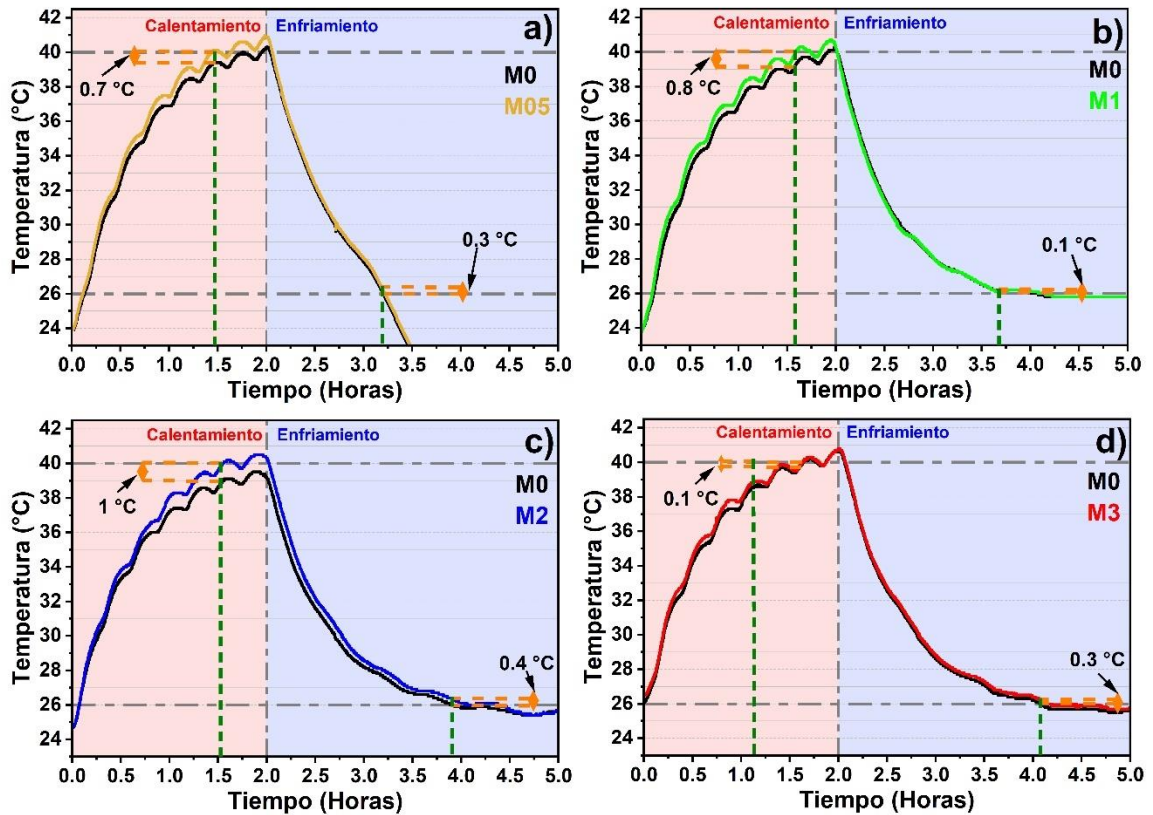


Figura 38. Grafica del comportamiento térmico de los morteros al someterlos a 40 °C y después a un enfriamiento a temperatura ambiente, donde: a) M0 vs M05, b) M0 vs M1, c) M0 vs M2 y d) M0 vs M3

Las propiedades térmicas desarrolladas en los morteros adicionados con el VO₂/MWCNT podrían favorecer el ahorro energético de una construcción [31]. A fin de corroborar esto, en el apartado 4.18 se presenta la simulación energética de una unidad habitacional, donde se comparará su consumo energético al utilizar un recubrimiento convencional y otro con las adiciones de PCM estudiadas, utilizando las propiedades térmicas obtenidas en esta investigación para ambos casos.

4.11 Densidad de las pastas de yeso

La figura 39 muestra la densidad de las pastas de yeso en estado endurecido. Con la adición del NH en las mezclas se obtuvo un incremento en esta propiedad del 2.24 %, 2.8 % y 7.41 % para Y05, Y1 y Y2, respecto a la Y0. Este aumento se debe a que el NH ocupa vacíos dentro de la mezcla, siendo la incorporación del 2 % de VO₂/MWCNT la que tiene un mejor acoplamiento de partículas dentro de la pasta.

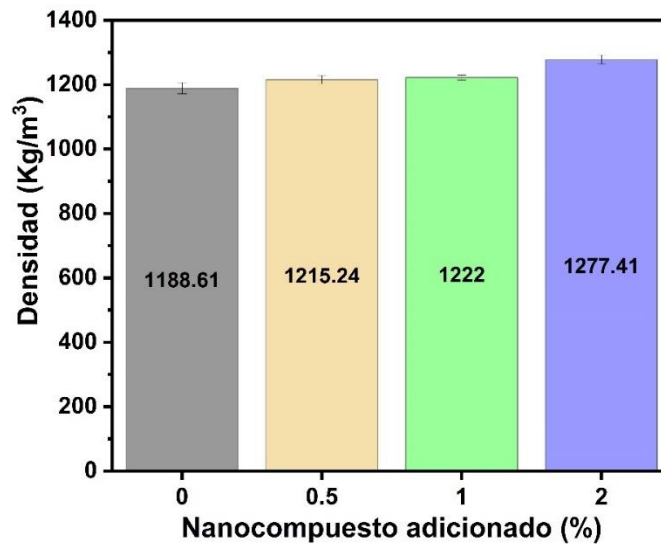


Figura 39. Densidad de las pastas de yeso con y sin integración del NH

4.12 Caracterización microestructural de las pastas de yeso

Con el análisis DRX a las pastas endurecidas se obtuvieron los difractogramas mostrados en la figura 40. Se observa un desarrollo de fases de hidratación idéntico para todos los casos con presencia de sulfato de calcio dihidratado o yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con PDF No.: 00-003-0044, calcita y bassanita. Donde, el yeso es el principal producto de hidratación, la bassanita es material cementante sin hidratar y la calcita es un material inerte proveniente de la fabricación del yeso comercial [103]. Estos resultados muestran que la incorporación

del NH en las pastas de yeso no modifica el desarrollo de las fases de hidratación respecto a una pasta de yeso común.

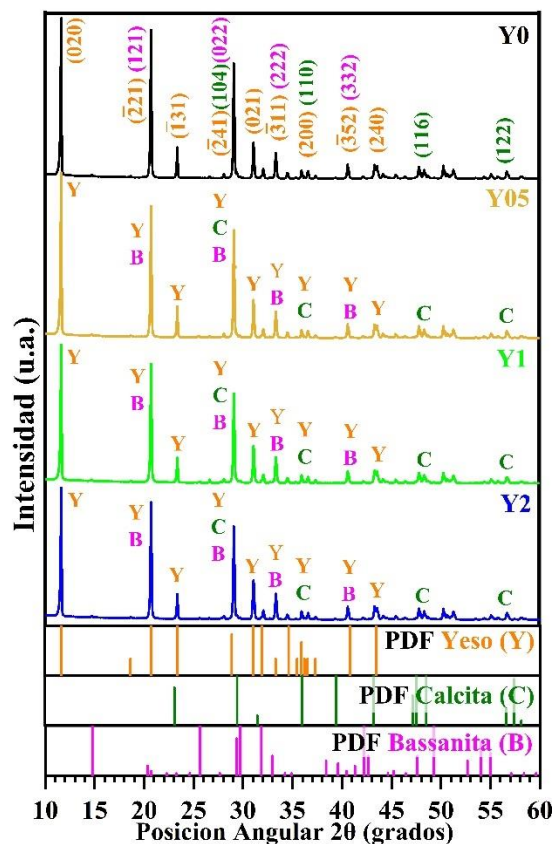


Figura 40. Difractogramas de las pastas de yeso a 7 días de edad.

El espectro FTIR de las pastas de yeso se ilustra en la figura 41. Para todas las muestras se obtuvieron señales similares. Donde destacan las longitudes de onda a: 3522 cm^{-1} y 3400 cm^{-1} por el estiramiento asimétrico y simétrico del enlace O-H del agua, 1679 cm^{-1} y 1622 cm^{-1} debido a la excitación del enlace O-H-O ligado al ion calcio y sulfato respectivamente, 1100 cm^{-1} y 1004 cm^{-1} por la vibración de estiramiento asimétrico y simétrico del SO_4 tetraédrico y 667 cm^{-1} y 592 cm^{-1} debido a la flexión asimétrica del ion SO_4 [104–106]. Los enlaces identificados se relacionan con la presencia de las fases de yeso, bassanita y calcita expuesta en la figura 40. Asegurando que la adición del NH en

las pastas de yeso no modifica el desarrollo de fases hidratadas ni genera nuevos productos químicos.

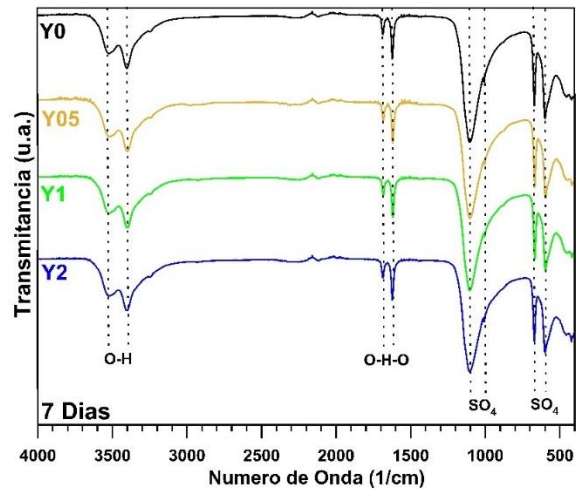


Figura 41. Espectrogramas de infrarrojo de las pastas de yeso a 7 días de edad

Mediante análisis TGA/DTA se le dio seguimiento a la pérdida de masa de las pastas respecto a la temperatura (figura 42). Todas las muestras presentan un comportamiento similar con 2 caídas de peso principales. La primera entre 100 y 150 °C atribuida a la evaporación de las moléculas de agua ligadas al sulfato de calcio (CaSO_4) y la segunda entre 600 y 700 °C por la descarbonatación de la fase calcita [85]. El peso perdido en estas dos caídas se utilizó para cuantificar la cantidad de sulfato de calcio en las mezclas a fin de ligarlo con su desarrollo de resistencia a la compresión a 7 días de edad.

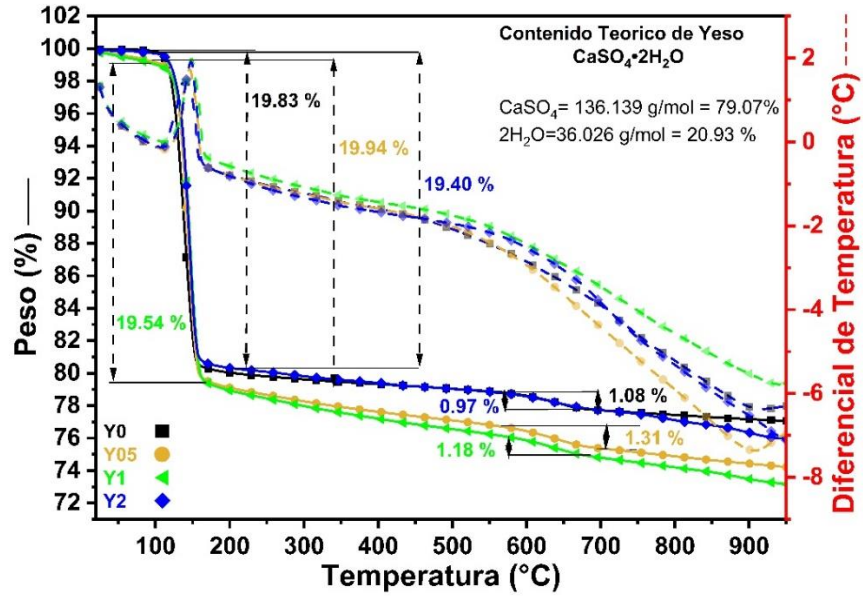


Figura 42. Análisis TGA de las pastas de yeso a 7 días de edad

La tabla 18 muestra la cuantificación de producto hidratado, donde las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2 tuvieron valores cercanos entre sí. Además, se cuantificó la calcita presente en las muestras, estos resultados refuerzan la identificación de fases por DRX expuesta en la figura 40.

Tabla 18. Cuantificación de sulfato de calcio hidratado y carbonato de calcio en las pastas

Muestra	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (%)	CaCO_3 (%)
Y0	94.74	2.46
Y05	95.26	2.98
Y1	93.96	2.68
Y2	92.68	2.22

El análisis de la morfología de las pastas (figura 43) mostró que están formadas por partículas de un tamaño similar en todos los casos, con la presencia de cristales de yeso alargados con longitudes de entre 8 y 10 micras y anchos de 1 a 5 micras [107]. Lo cual se relaciona con la identificación de la fase de sulfato de calcio dihidratado ilustrado en el análisis DRX (gráfica 40), FTIR (figura 41) y TGA (tabla 17) de las mezclas.

Adicionalmente, se observa que la presencia del NH en las pastas de yeso no afecta el crecimiento de estas partículas.

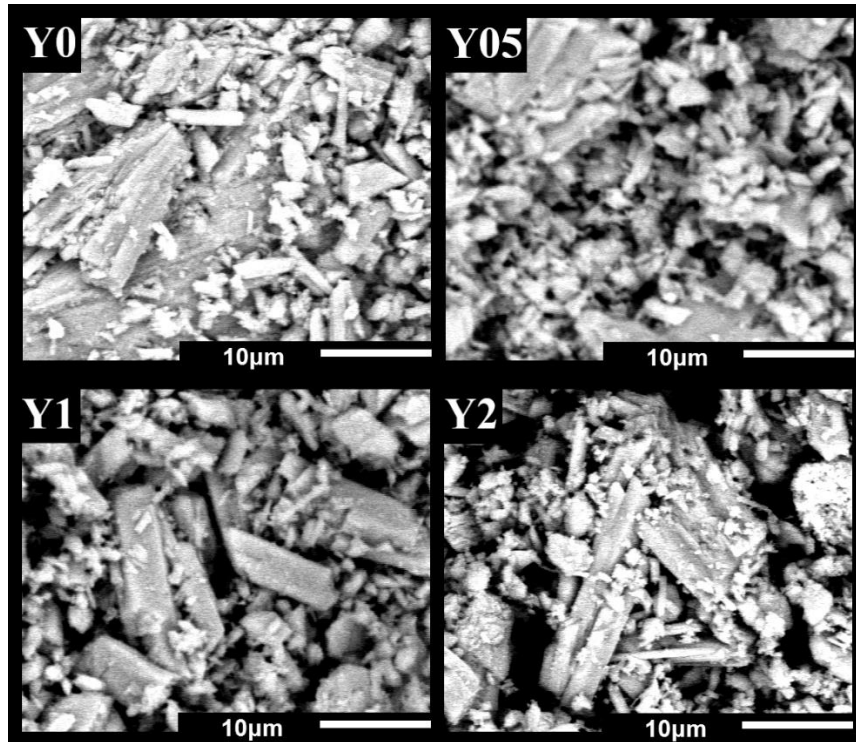


Figura 43. Microscopias de las mezclas Y0, Y05, Y1 y Y2 a 7 días de edad

Por otro lado, la figura 44 y tabla 19 muestran los resultados del análisis EDS con enfoque en el %p del elemento vanadio de las pastas de yeso. La interpretación de la figura 44 indicó que las muestras Y05, Y1 y Y2 presentan una dispersión homogénea del VO₂/MWCNT, notándose un incremento gradual en el contenido de vanadio perteneciente al NH (tabla 19). No obstante, se considera como límite una adición máxima del 2 % porque en esta comienza la formación de aglomeraciones del NH el yeso que se observa en el EDS de la mezcla Y2 (figura 44).

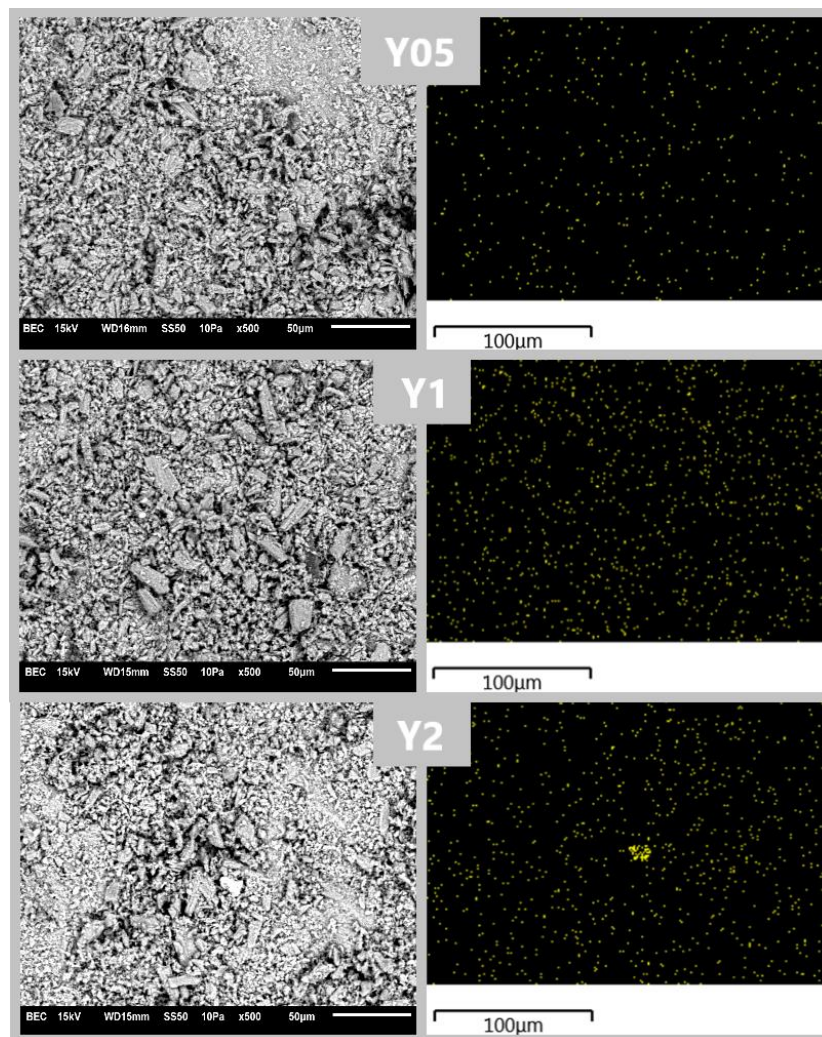


Figura 44. Microscopias (izquierda) y análisis EDS (derecha) a las pastas de yeso Y05, Y1 y Y2 con enfoque en el elemento vanadio

Tabla 19. Cuantificación en %p del elemento vanadio en las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2 a 7 días de edad

Mezcla	Vanadio (%p)
Y0	0
Y05	0.2 ± 0.1
Y1	0.4 ± 0.1
Y2	0.6 ± 0.1

4.13 Estudio de la cinética de hidratación de las pastas de yeso

Se evaluó la cinética de hidratación de las pastas de yeso utilizando la calorimetría isotérmica y se obtuvieron las gráficas presentadas en la Figura 45. Se determina que las pastas con integración del VO₂/MWCNT no presentan modificación en la dinámica de liberación de calor de hidratación respecto a la Y0. Este fenómeno se atribuye a que el proceso exotérmico en las pastas se presenta en gran magnitud en un corto periodo de tiempo, el cual no es el suficiente para que el nanocompuesto se active térmicamente y modifique este proceso.

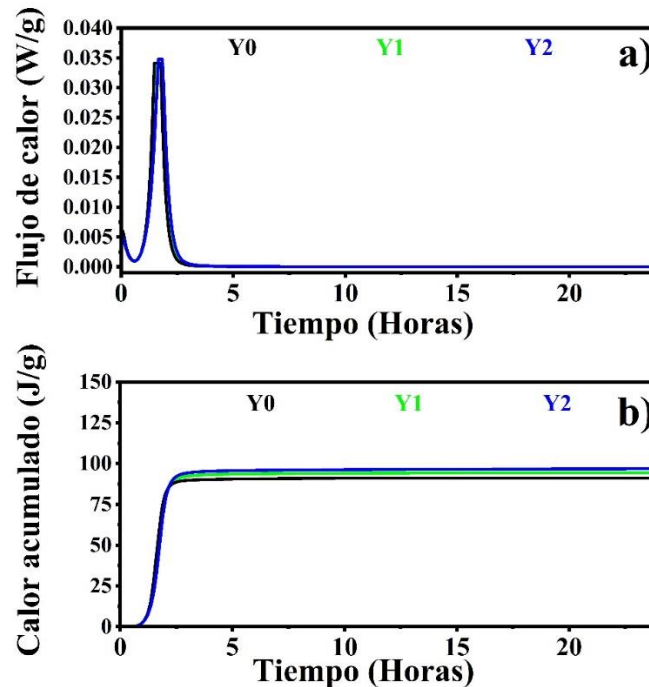


Figura 45. Diagramas de la cinética de hidratación de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2, donde: a) grafica de flujo de calor y b) grafica de calor acumulado.

4.14 Prueba de resistencia a la compresión de las pastas de yeso

Se aplicó la prueba de resistencia a la compresión en las pastas de yeso con y sin incorporación del PCM-VO₂-MWCNT para evaluar el efecto en el comportamiento mecánico de las muestras respecto a la cantidad de NH incorporado (figura 46). Se observa que en todos los especímenes la resistencia a la compresión se mantuvo similar, se infiere que la presencia del nanocompuesto en un rango de adición del 0.5 al 2% en las pastas no afecta ni beneficia al desarrollo de resistencia a la compresión. Estos resultados se relacionan con la cantidad de producto hidratado obtenido en la tabla 18, donde, las pastas presentaron valores semejantes entre sí.

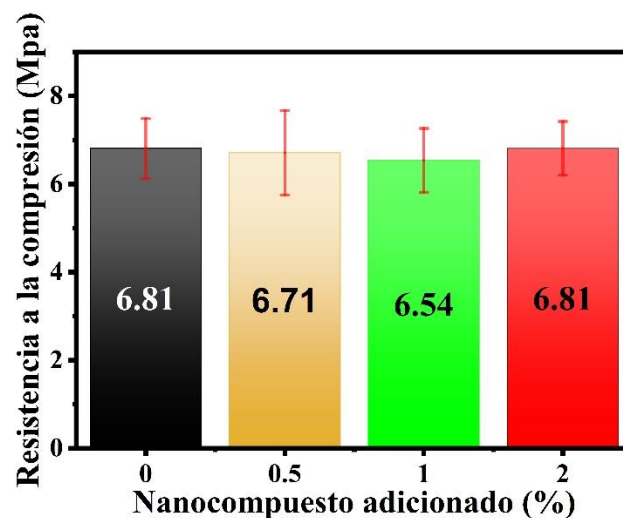


Figura 46. Resistencia a la compresión de las pastas con y sin nanocompuesto de yeso a 7 días de edad

4.15 Angulo de contacto del agua de las pastas de yeso

La figura 47 y la tabla 20 muestran el valor promedio del ángulo de contacto del agua y la energía libre superficial. Se aprecia que el valor del ángulo de contacto es similar para las cuatro muestras con valores alrededor de los 65° propio de los materiales hidrofílicos [97]. Adicionalmente, la energía libre superficial para las 4 muestras resulto semejante

entre sí. Se concluye que la incorporación del NH en las pastas de yeso no modifica la permeabilidad del material.

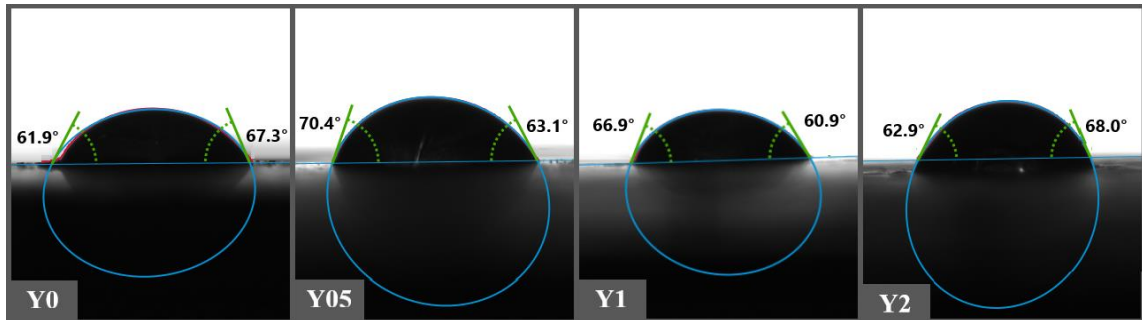


Figura 47. Angulo de contacto del agua de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2

Tabla 20. Angulo de contacto del agua promedio y energía libre superficial de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2

Muestra	Angulo de contacto del agua (°)	Energía libre superficial (mN/m)
Y0	67.51 ± 7.43	43.25
Y05	67.57 ± 13.32	43.21
Y1	61.82 ± 9.7	46.73
Y2	64.13 ± 6.13	45.33

4.16 Resistencia al agua de las pastas de yeso

Con la aplicación del método humedad-secado se evaluó la pérdida de masa, resistencia a la compresión y absorción de agua de las pastas de yeso con y sin adición. La figura 48 presenta la pérdida de masa promedio, se observa que las pastas Y05, Y1 y Y2 disminuyeron su masa un 9.12 %, 18.58 % y 23.6 % más que Y0, el incremento en la pérdida de masa de los especímenes con NH se atribuye al incremento en la densidad de estos materiales, puesto que se incrementa la cantidad de materia disponible en el medio acuoso para ser disuelta. En caso contrario, la resistencia a la compresión se ve mejorada

un 43.81 %, 52.21 % y 22.44 % para Y05, Y1 y Y2 con base en Y0. Se concluye, que el aumento en la pérdida de masa de los especímenes con adición no tiene un impacto directo en la resistencia mecánica de los especímenes.

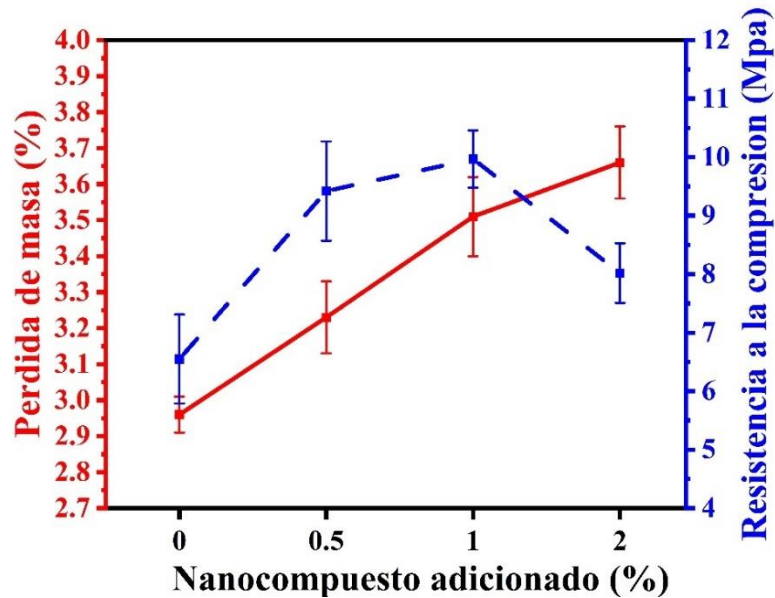


Figura 48. *Grafica de pérdida de masa y resistencia a la compresión de las pastas de yeso con y sin adiciones después de 6 ciclos del método humedad-secado*

Adicionalmente, la gráfica 49 expone los porcentajes de absorción de agua para cada muestra durante los ciclos del método humedad-secado. Se observa la reducción de la absorción de las muestras Y05, Y1 y Y2 respecto a la muestra Y0. Lo cual se atribuye a la formación de matrices más densas respecto a una mezcla sin adición, dado que el NH ocupa vacíos en la microestructura del yeso tal como se ve reflejado en los valores de densidad mostrados en la figura 39. Se considera que la incorporación del NH en pastas de yeso no tiene un efecto negativo en su resistencia al agua.

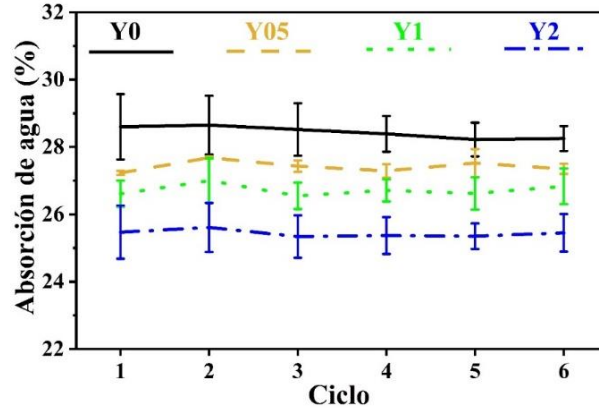


Figura 49. Grafica de absorción de agua de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2 durante los 6 ciclos de humectación-secado

La gráfica 50 muestra los difractogramas correspondientes a las pastas con y sin adición del NH después de la prueba humedad-secado. Para todos los casos se obtuvo la misma identificación de fases cristalinas a las ilustradas en la figura 40. Se considera que no se afecta a las fases de hidratación ni se propicia el desarrollo de nuevos compuestos en las muestras de yeso con y sin adición del NH después de 6 ciclos de humectación-secado.

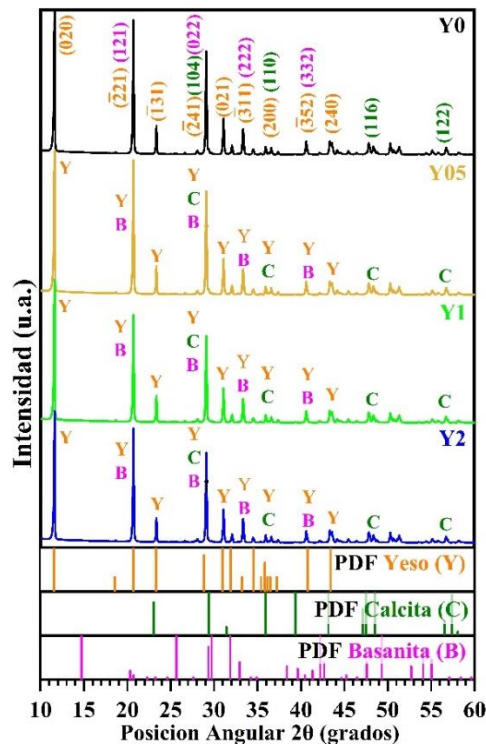


Figura 50. Difractogramas de las pastas de yeso después de 6 ciclos de humectación-secado

Respecto a los espectros FTIR de las muestras de yeso después de someterlas a la prueba de resistencia al agua (figura 51). La identificación de los enlaces químicos para todos los especímenes fue idéntica a la mostrada en la figura 41. Estos resultados se relacionan con los obtenidos en el análisis DRX de la figura 50, donde, no se presentó modificación de los productos de hidratación ni aparición de nuevos compuestos en las pastas de yeso con y sin incorporación del VO₂/MWCNT.

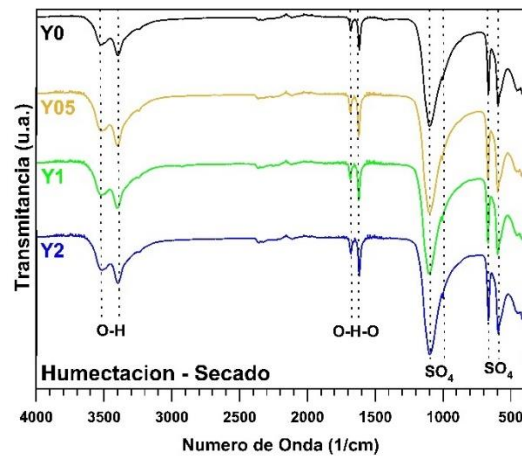


Figura 51. Espectrogramas de infrarrojo de los yesos Y0, Y05, Y1 y Y2 después de 6 ciclos de humectación-secado

Además, se cuantificó la fase hidratada de los yesos después del método humedad-secado a fin de explicar el incremento en la resistencia a la compresión que se presentó en la gráfica 48 respecto a la expuesta en la gráfica 46. La figura 52 y la tabla 21 muestran los resultados obtenidos.

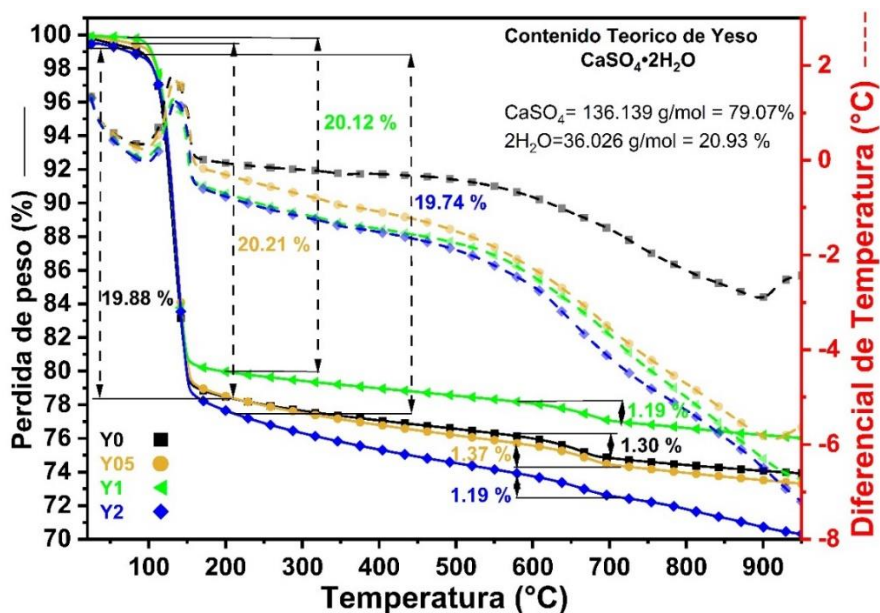


Figura 52. Análisis TGA de los yesos Y0, Y05, Y1 y Y2 después de 6 ciclos de humectación-secado

La estimación de la cantidad de sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en los yesos indicó que el Y0 mantiene similar este valor respecto a los resultados de la tabla 18, mientras que, las muestras Y05, Y1 y Y2 incrementaron un 1.36 %, 2.29 % y 1.74 % su producto hidratado, respectivamente. Estos valores explican el incremento en la resistencia a la compresión de la figura 48 respecto a la obtenida a los 7 días de edad, dado que el incremento de material hidratado y el acoplamiento del NH en los vacíos de la matriz beneficia el desempeño mecánico de las mezclas modificadas [108].

Tabla 21. Análisis TGA de los yesos Y0, Y0, Y1 y Y2 después del método humedad-secado

Muestra	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (%)	CaCO_3 (%)
Y0	94.99	2.46
Y05	96.56	2.98
Y1	96.12	2.68
Y2	94.31	2.22

Finalmente, se aplicó análisis EDS a las muestras de yeso después del método humedad-secado con enfoque en el %p del elemento vanadio para evaluar cambios en el contenido del NH en las mezclas (figura 53 y tabla 22). Se determinó que la dispersión del NH en las pastas ensayadas (figura 53) no presenta cambios respecto al obtenido a 7 días de edad (figura 44).

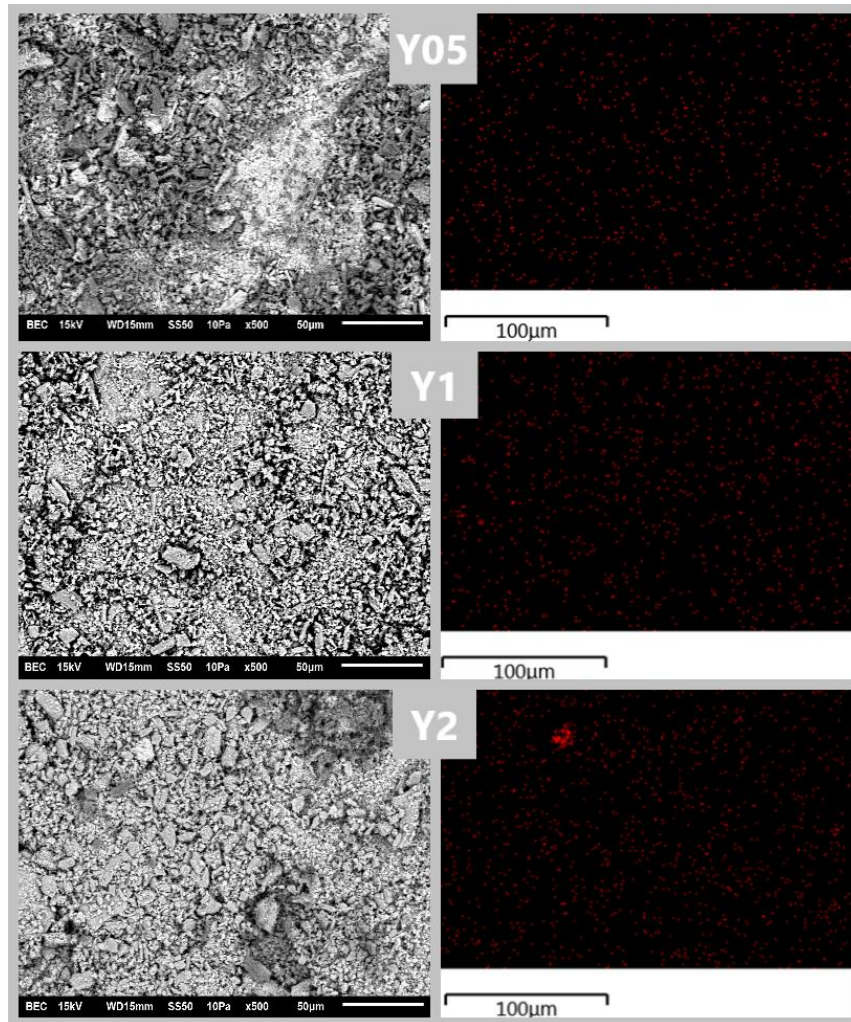


Figura 53. Microscopias (izquierda) y análisis EDS (derecha) a las pastas de yeso Y05, Y1 y Y2 después de la prueba humedad-secado con enfoque en el elemento vanadio

Igualmente, la cuantificación del elemento vanadio (tabla 22) mantiene el mismo valor respecto al de 7 días de edad. Se comprueba que no existe pérdida del NH por lixiviación al someter los yesos adicionados a 6 ciclos del método humedad-secado. En base a los

resultados de la prueba de resistencia al agua se concluye que la incorporación del VO₂/MWCNT en una pasta de yeso no propicia la pérdida de masa ni la lixiviación del NH después de ciclos del método humedad-secado.

Tabla 22. Cuantificación en %p del elemento vanadio en las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2 después de 6 ciclos de humedad-secado

Mezcla	Vanadio (%p)
Y0	0
Y05	0.2 ± 0.07
Y1	0.4 ± 0.05
Y2	0.6 ± 0.05

4.17 Propiedades térmicas de las pastas de yeso

El análisis del comportamiento térmico comenzó con la determinación de la conductividad térmica de los especímenes. La grafica 54 reporta los valores obtenidos para cada muestra. La integración del NH en las pastas incrementó el valor de conductividad térmica en un 1.31 %, 1.98 % y 2.18 % a los 20 °C y en un 2.93 %, 4.51 % y 5.26 % a los 50 °C con la adición del 0.5%, 1% y 2% del NH VO₂/MWCNT, respectivamente. El incremento de esta propiedad es causado por la presencia del NH en la matriz cementante debido a 2 razones principales: 1. A causa de la conductividad térmica del VO₂, la cual se reporta mayor a la del yeso [109] y 2. Al efecto de mejora de la alta conductividad térmica de los MWCNT impregnados en el PCM.

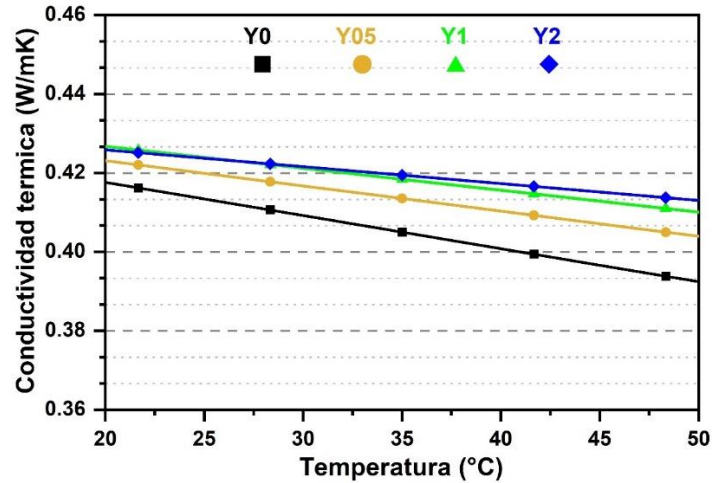


Figura 54. Conductividad térmica de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2

La gráfica 55 exhibe el calor específico de los especímenes dentro de un rango de 20 °C a 50 °C. La interpretación del diagrama muestra que a 20 °C el Cp de las muestras Y05 y Y1 disminuyeron un 2.16 % y 0.33 %, respectivamente, mientras que la mezcla Y2 aumentó su valor un 1.12 %, respecto a la muestra sin adiciones. Además, conforme la temperatura incrementa hasta 50°C el Cp de las muestras Y0, Y05, Y1 y Y2 disminuyeron ligeramente. De ello se puede asegurar que a los 50°C el Cp de las muestras Y05, Y1 y Y2 incrementaron su Cp en un 0.57 %, 2.19 % y 4.44 % respecto a Y0. Este fenómeno se atribuye al almacenamiento de calor del NH en las pastas conforme incrementa su temperatura. Puesto que, cuando el calor fluye a través de la pasta, las partículas de PCM más cercanas a la fuente de calor se equilibran energéticamente primero que las subsecuentes hasta que todas las partículas del sistema igualen su temperatura. Debido a este fenómeno el Cp de las pastas con NH aumenta su valor conforme incrementa la temperatura.

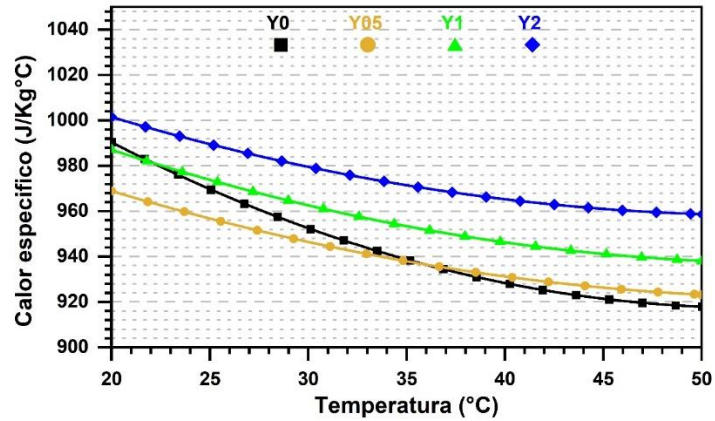


Figura 55. Calor específico de las pastas Y0, Y05, Y1 y Y2

Después se calculó la difusividad y efusividad térmica de las pastas con y sin adición (figura 56). En la gráfica 56 a) se observa que las mezclas Y0, Y05 y Y1 presentan un comportamiento similar en su difusividad, en cambio, la pasta Y2 disminuyó su valor respecto a las demás muestras. La diferencia en esta propiedad indica que el flujo de calor a través de la pasta Y2 se presenta a menor velocidad en comparación de las mezclas Y0, Y05 y Y1. Por el otro lado, la gráfica 56 b) muestra que la presencia de $VO_2/MWCNT$ en una pasta de yeso incrementa el valor de efusividad, por lo que las mezclas modificadas intercambian y almacenan calor con su entorno con mayor facilidad respecto a un yeso convencional. Las propiedades térmicas determinadas a este punto se vieron reflejadas al evaluar la variación en la temperatura interna de los especímenes con y sin adición al exponerlo a un cambio externo de temperatura, tal y como se detalla a continuación.

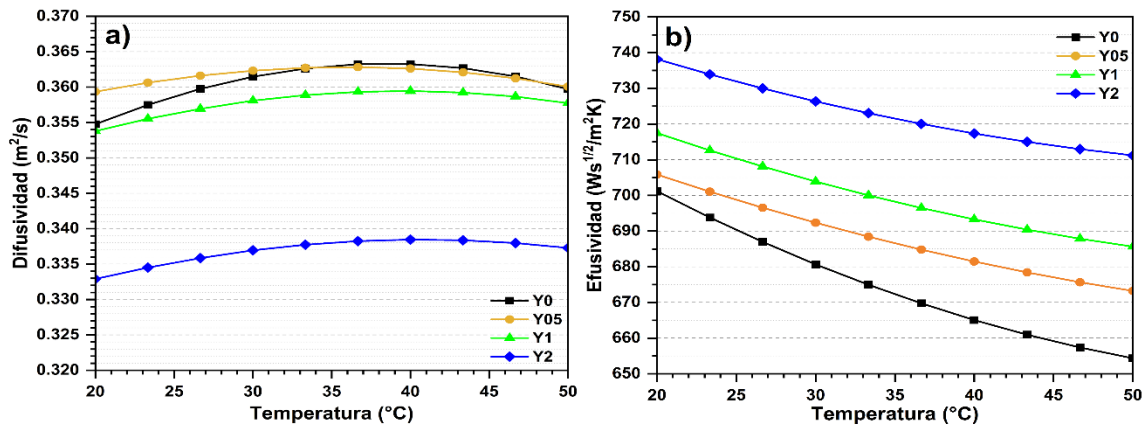


Figura 56. Graficas del comportamiento térmico de las pastas de yeso con y sin adición del NH, donde: a) Difusividad térmica y b) Efusividad térmica

Los resultados del análisis del comportamiento térmico de los especímenes cuando la temperatura externa es de 40 °C y su enfriamiento a temperatura ambiente (25 °C) se muestran en la gráfica 57. Donde se compara el incremento de temperatura en función del tiempo de los especímenes con y sin el NH. Se puede observar que durante el calentamiento, el incremento en la temperatura interna de las muestras con incorporación del NH se mantuvo por debajo de la muestra Y0. Si se compara la temperatura de las muestras con NH en el mismo tiempo en que el yeso puro alcanzó los 40 °C las muestras con el NH presentaron los diferenciales de tiempo y temperatura mostrados en la gráfica 57 y tabla 23, respectivamente. Entre mayor es la cantidad de NH adicionado, mayor el tiempo para que la temperatura de las muestras sea 40 °C, esto indica que el yeso con NH esta almacenando el calor. De forma contraria, durante el enfriamiento, el espécimen Y0 disminuyó su temperatura a una mayor velocidad en comparación con las muestras con incorporación de NH. Al comparar la temperatura y el tiempo del yeso con el NH en el mismo tiempo que el yeso puro alcanzó 25 °C se observaron los diferenciales exhibidos en la gráfica 57 y tabla 23, respectivamente. Este fenómeno se presenta debido al incremento en el Cp de las muestras con el NH, como se observó en la gráfica 55. Esto puede atribuirse a que a mayor cantidad de NH mayor cantidad de calor almacenado. Las variaciones en los tiempos de calentamiento y enfriamiento en el yeso puro, indican que el yeso con el NH actúa como regulador térmico tanto en el incremento como en la

disminución de la temperatura externa lo cual contribuiría a mantener el confort térmico y en consecuencia a la eficiencia energética de una edificación.

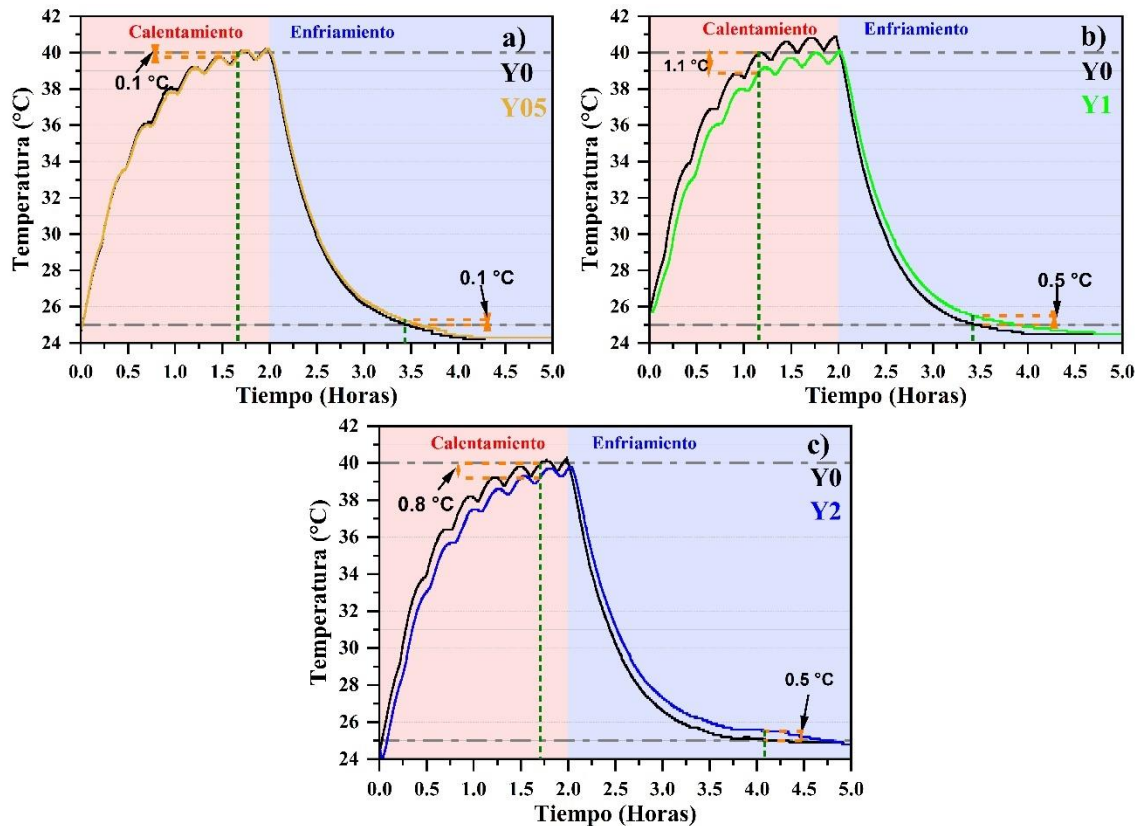


Figura 57. Variación de temperatura respecto al tiempo de las pastas con y sin adición del NH cuando la temperatura exterior es de 40 °C, donde: a) Y0 vs Y05, b) Y0 vs Y1 y c) Y0 vs Y2

Tabla 23. Comparación del tiempo de calentamiento y enfriamiento de los morteros

Mezcla	Calentamiento		Enfriamiento	
	Δ Tiempo respecto a Y0	Δ Temperatura cuando Y0 = 40 °C	Δ Tiempo respecto a Y0	Δ Temperatura cuando Y0 = 25 °C
Y05	1 min	0.1	8 min	0.2
Y1	4 min	1.1	25 min	0.5
Y2	22 min	0.8	75 min	0.5

Las propiedades físicas y microestructurales de las pastas demuestran que la integración del NH en el yeso no modifica la cinética de hidratación ni el desarrollo de productos hidratados. Adicionalmente, las mezclas con VO₂/MWCNT mantuvieron una resistencia a la compresión, resistencia al agua y permeabilidad similar. El comportamiento térmico de las pastas con adición del VO₂/MWCNT aquí mostradas es comparable con el obtenido por Su-Gwang y col. en su artículo, donde, una placa de yeso impregnada con cera de abeja (PCM) tuvo un diferencial de 1 °C menos respecto a otra placa sin modificaciones durante un calentamiento a 40 °C, estimaron que este diferencial es equiparable a un ahorro energético de hasta 3.95 % anual [3]. Para comprobar este ahorro el siguiente apartado detalla los resultados de la simulación de una casa habitación utilizando estos materiales como revestimiento en su envolvente.

4.18 Modelación del comportamiento térmico de los morteros y pastas de yeso al utilizarse como recubrimientos

Para modelación energética se utilizaron las propiedades físicas y térmicas de los morteros de CPC y yesos estudiados en esta investigación (tabla 24). El valor de conductividad térmica y calor específico de los materiales se determinó respecto al promedio de los resultados obtenidos en las figuras 35, 36, 54 y 55.

Tabla 24. Densidad, conductividad térmica y calor específico de los materiales evaluados

Material	Densidad (Kg/m³)	Conductividad Térmica (W/mK)	Calor específico (Joules/kg°C)
M0	2128.53	1.5736	855.97
M05	2135.49	1.3755	838.36
M1	2144.07	1.3082	838.17
M2	2183.03	1.2816	841.03
M3	2186.46	1.2279	835.98
Y0	1188.61	0.405	954.16
Y05	1215.24	0.4077	946.06
Y1	1222	0.4184	962.61
Y2	1277.41	0.4194	980.11

Además, se realizó la simulación de 8 sistemas constructivos empleando los morteros y pastas de yeso como recubrimiento exterior e interior, respectivamente. La tabla 25 describe el código asignado a cada modelo y la ubicación y tipo de material utilizado en su envolvente. Cabe resaltar que cada sistema fue simulado en 3 zonas climáticas: 1.- Monterrey, Nuevo León, 2.- Temosachic, Chihuahua, y 3.- Ciudad de México, México.

Tabla 25. Código de las simulaciones realizadas y su arreglo constructivo

Código del revestimiento	Aplicación del material respecto al inmueble	
	Exterior	Interior
M0Y0	M0	Y0
M05	M05	Y0
M1	M1	Y0
M2	M2	Y0
M3	M3	Y0
Y05	M0	Y05
Y1	M0	Y1
Y2	M0	Y2

Una vez realizada la simulación de cada sistema, se interpretaron los reportes de resultados y se desarrolló. La tabla 26 muestra los consumos de energía destinada a la utilización de sistemas de climatización. Por un lado, es evidenciable que la utilización de los materiales con PCM tienen un aporte directo al ahorro energético, donde, la M3 presentó el mejor ahorro de 0.95 %, 1.35 % y 2.23 % para Monterrey, Tamosachic y Cd. De México, respectivamente. De igual forma, se observa que los morteros propiciaron un ahorro energético al ser utilizados en el exterior, mientras que, los yesos empleados en el interior de la construcción tuvieron un efecto contrario al aportar al consumo eléctrico. Se infiere que la aplicación de los cerámicos-PCM se vuelve efectiva al ser usado como recubrimiento de la envolvente externa de una construcción, dado que durante el calentamiento del inmueble el PCM al interior mantiene atrapado el calor incrementando el uso del sistema de regulación térmica. Respecto al tipo de clima, la capacidad de almacenar calor del recubrimiento-PCM favorece el ahorro energético al aplicarse en zonas frías y templadas.

Tabla 26. Consumo eléctrico anual para la climatización de los sistemas constructivos simulados

RV	E_T <u>KWh</u> m ²	E_c <u>KWh</u> m ²	E_e <u>KWh</u> m ²	% de ganancia (+) o ahorro (-) de E_c	% de ganancia (+) o ahorro (-) de E_e	% de ganancia (+) o ahorro (-) de E_T
MTY						
M0	290.9	77.7	213.2	Ref.	Ref.	Ref.
M05	289.6	77.2	212.5	-0.70	-0.36	-0.45
M1	289.0	76.9	212.1	-1.00	-0.53	-0.66
M2	288.7	76.8	211.9	-1.18	-0.64	-0.78
M3	288.2	76.6	211.6	-1.43	-0.78	-0.95
Y05	291.0	77.7	213.3	0.01	0.05	0.04
Y1	291.7	77.8	213.8	0.16	0.28	0.25
Y2	291.3	77.6	213.7	-0.08	0.20	0.12
TMC						
M0	312.7	262.0	50.7	Ref.	Ref.	Ref.
M05	312.3	261.7	50.6	-0.13	-0.13	-0.13
M1	309.7	259.6	50.1	-0.91	-1.09	-0.94
M2	309.2	259.2	50.0	-1.05	-1.40	-1.11
M3	308.5	258.6	49.8	-1.28	-1.68	-1.35
Y05	312.7	262.1	50.6	0.03	-0.06	0.01
Y1	313.2	262.6	50.7	0.22	-0.02	0.18
Y2	312.5	262.2	50.4	0.06	-0.57	-0.04
CDMX						
M0	189.7	145.7	44.0	Ref.	Ref.	Ref.
M05	187.6	144.0	43.7	-1.23	-0.67	-1.10
M1	186.7	143.2	43.5	-1.73	-1.05	-1.57
M2	186.2	142.9	43.4	-1.97	-1.39	-1.84
M3	185.5	142.2	43.2	-2.41	-1.65	-2.23
Y05	189.7	145.7	43.9	-0.01	-0.07	-0.03
Y1	189.8	145.9	43.9	0.11	-0.07	0.07

Y2 189.0 145.4 43.7 -0.25 -0.69 -0.35

NOTA: RV= revestimiento, E_T= energía total consumida, E_c= energía consumida para el calentamiento, E_e= energía consumida para el enfriamiento, MTY= Monterrey, Nuevo León, TMC= Temosachic, Chihuahua, CDMX= Ciudad de México, México, Ref.= Referencia.

En adición, se le dio seguimiento a la temperatura interior del inmueble simulado sin el uso de sistemas de regulación térmica a fin de comparar su variación respecto al tipo de recubrimiento utilizado. Por un lado, la interpretación de la figura 58 muestra que los sistemas Y05, Y1 y Y2 mantienen la temperatura superior al recubrimiento M0Y0, lo que ocasiona que la construcción requiera mayor uso de los sistemas de enfriamiento. Asimismo, las simulaciones M05, M1, M2 y M3 presentan una temperatura interior menor a la de referencia, traducible a un menor requerimiento de dispositivos de enfriamiento.

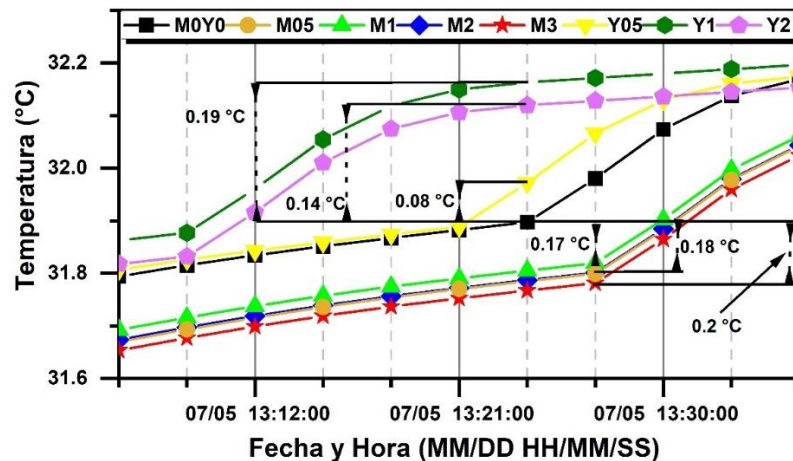


Figura 58. Variación de temperatura interna del inmueble sin uso de sistemas de climatización en la ciudad de Temosachic durante un día de verano.

Respecto a la figura 59, los sistemas M0Y0, Y05 y Y1 exhiben la misma temperatura interior durante el invierno, en caso opuesto los recubrimientos M3, M2, M1, M05 y Y2 mantienen la temperatura superior a la referencia explicando la aportación al ahorro energético ocasionado por la reducción del uso de los sistemas de calefacción.

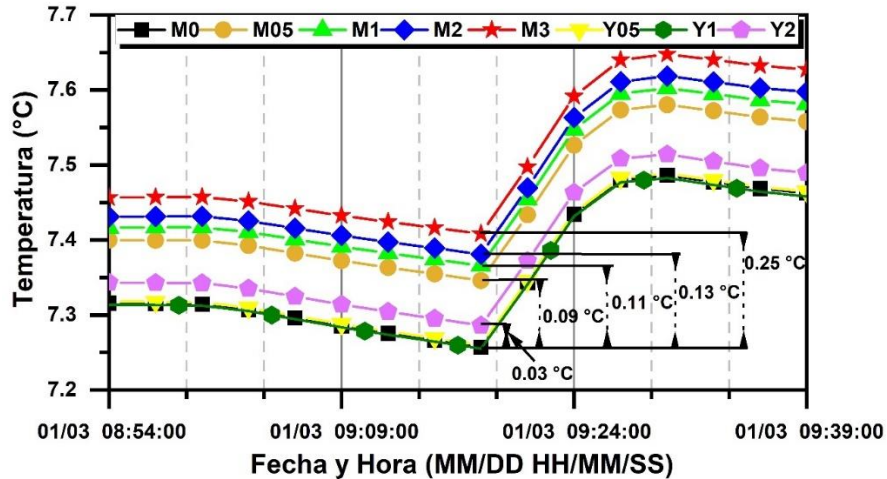


Figura 59. Variación de temperatura interna del inmueble sin uso de sistemas de climatización en la ciudad de Temosachic durante un día de invierno

Finalmente, la tabla 27 resalta los resultados obtenidos por diferentes autores del uso de PCMs para el ahorro energético en edificaciones. Se destaca la ventaja de la utilización de los PCMs S-S sobre los S-L, puesto que, los segundos requieren adiciones mayores al 20 % wt en elementos constructivos con espesores de mínimo 3 cm o la impregnación total de los mismos para mantener un ahorro energético mayor al 2 % en clima frío y templado. Mientras que, al implementar PCM S-S con solo una adición del 3%p del cementante en elementos de máximo 2.54 cm se obtiene un ahorro similar al del PCM S-L en clima frío y templado. Esta comparación deja en claro el gran potencial que tienen los PCM S-S sobre los S-L, al requerir una incorporación 10 veces menor para desencadenar un ahorro energético similar al utilizarse en edificaciones.

Tabla 27. Comparación del uso de PCMs en construcciones para el ahorro energético

Matriz	Tipo de PCM	% PCM	PCM	Espesor (cm)	Ahorro Energético (%)	Clima	Autor
Yeso	S-L	24*	Comercial	3	0.59	templado	Chaoen Li y col.
Yeso	S-L	24*	Comercial	3	2.84	frio	Chaoen Li y col.
Panel Y/C	S-L	IMP	Cera de abeja	1.9	3.95	templado	Su-Gwang y col.
Panel Y/C	S-L	IMP	Cera de abeja	1.9	1.1	frio	Su-Gwang y col.
Mortero CPC	S-S	3**	VO ₂ /MWCNT	2.54	2.23	templado	EI
Mortero CPC	S-S	3**	VO ₂ /MWCNT	2.54	1.35	frio	EI

Nota: S-L= sólido-líquido, S-S= sólido-sólido, Y/C= yeso/cemento y EI= Esta Investigación.

*Porcentaje en peso total de la mezcla. **Porcentaje en peso del cementante, IMP=Impregnación total

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones y Recomendaciones

Se concluye que es posible sintetizar un nanocompuesto híbrido de dióxido de vanadio-nanotubos de carbono con la capacidad de almacenar calor de forma más eficiente. Además, se comprobó la compatibilidad de un PCM S-S y dos materiales cerámicos como lo son un mortero de CPC y una pasta de yeso.

Se obtuvieron mezclas con adición de VO_2/MWCNT sin afectaciones en su desarrollo de fases hidratadas, resistencia a la compresión y resistencia al agua. Sin embargo, la presencia del NH en los morteros tuvo un efecto regulador en la cinética de hidratación, lo cual podría disminuir las grietas por contracción por secado de este material. Respecto a las propiedades térmicas, las mezclas con NH exhibieron propiedades termorreguladoras. La determinación del ahorro energético del uso de los morteros con NH como recubrimiento de una construcción mostró que se reduce el consumo energético derivado de los sistemas de climatización respecto a un mortero convencional, siendo una adición del 3 % la más adecuada para obtener un ahorro energético de entre 1 y 2 % anual. Mientras que, utilizar los yesos con NH como recubrimiento interior de una construcción no tienen un aporte directo a la disminución del uso de sistemas de regulación térmica, más bien, llegan a incrementar el consumo eléctrico bajo los climas aquí mencionados, se sugiere su utilización en climas con temperaturas más bajas de las aquí mostradas.

Se concluye que este trabajo sirve como base para el estudio de materiales de cambio de fase S-S en materiales de construcción dado que estos materiales exhiben mejor compatibilidad con materiales cerámicos respecto a los PCMs S-L al requerir cantidades menores de adición con grandes efectos en las propiedades térmicas de los materiales adicionados sin alterar o perjudicar su desempeño físico-mecánico.

Se recomienda la evaluación del desempeño térmico de los recubrimientos aquí estudiados con un modelo físico a forma de ratificar su ahorro teórico. Por otro lado, resulta viable expandir el estudio de PCMs S-S a otro tipo de compuestos con estas características a fin de investigar otros materiales con la capacidad de dotar a los materiales de construcción con propiedades termorreguladas que propicien una disminución del uso de sistemas de climatización en edificaciones.

6. Productos Generados

Participación en el XV Simposio Internacional de Investigación en Sistemas Constructivos, Computacionales y Arquitectónicos con la ponencia "Cinética de hidratación de morteros de cemento Portland compuesto adicionados con dióxido de vanadio y nanotubos de carbono" desarrollado el 25 y 26 de mayo del 2022 en la ciudad de Gómez palacio Durango, México.

Presentación del trabajo titulado "Integración de un nanocompuesto híbrido de dióxido de vanadio con nanotubos de carbono en pastas de yeso para almacenamiento térmico" en el 3er encuentro de Ciencia, Tecnología e Ingeniería de Estudiantes de Posgrado llevado a cabo los días 10, 11 y 12 de octubre del 2022 en la ciudad de San Nicolas de los Garza Nuevo León, México.

Participación en los Seminarios de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil con el tema "Almacenamiento de calor en cementantes convencionales modificados con nanocompuestos de óxido de vanadio-nanotubos de carbono" desarrollados en el semestre agosto-diciembre 2022 en la ciudad de San Nicolás de los Garza Nuevo León, México.

Presentación del tema "Integración de un nanocompuesto híbrido de dióxido de vanadio con nanotubos de carbono en pastas de yeso como material innovador para la regulación térmica en edificaciones" en el 5to Seminario Internacional de Jóvenes ALCONPAT/PENETRON llevado a cabo el día 17 de noviembre del 2022 vía la plataforma Zoom.

Participación en la conferencia LatinChem 2022 con el poster "Incorporación de un nanocompuesto híbrido de dióxido de vanadio con nanotubos de carbono en un mortero para la regulación térmica de edificaciones" el día 28 de noviembre del 2022 vía Twitter.

Publicación del artículo científico "Hybrid Nanocomposite of Vanadium Dioxide and Carbon Nanotubes Embedded in Gypsum Binder for Thermal Energy Storage", Journal Civil Engineering, paginas 32 – 45, ISSN: 2523-2428. DOI:10.35429/JCE.2022.16.6.32.45.

7. Referencias

- [1] H. H. Alzoubi, B. A. Albiss, and S. S. Abu sini, “Performance of cementitious composites with nano PCMs and cellulose nano fibers,” *Constr Build Mater*, vol. 236, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117483.
- [2] Y. Wang, J. Kuckelkorn, F. Y. Zhao, H. Spliethoff, and W. Lang, “A state of art of review on interactions between energy performance and indoor environment quality in Passive House buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, no. October, pp. 1303–1319, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.10.039.
- [3] S. G. Jeong, S. Wi, S. J. Chang, J. Lee, and S. Kim, “An experimental study on applying organic PCMs to gypsum-cement board for improving thermal performance of buildings in different climates,” *Energy Build*, vol. 190, pp. 183–194, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.02.037.
- [4] J. L. Castañeda, A. A. Amell Arrieta, and F. J. Cadavid Sierra, “La radiación infrarroja como mecanismo de transferencia de calor de alta calidad en procesos de calentamiento,” *Ing Cienc*, vol. 8, no. 16, pp. 97–127, 2012, doi: 10.17230/ingciencia.8.16.5.
- [5] C. del Rincón Maravilla and I. Y. Tort Ausina Andrea Salandín, “Caracterización térmica de muros y simulación energética de un edificio histórico Grado en Ingeniería de la Edificación,” 2012.
- [6] J. Luis, E. Sáiz, and I. Industrial, “ANÁLISIS SOBRE EL ALMACENAMIENTO TÉRMICO EN LA EDIFICACIÓN (ANALYSIS OF THE THERMAL STORAGE IN CONSTRUCTION),” 1991.
- [7] J. L. Álvarez, “Estudio comparativo de recubrimientos para techos y el efecto sobre el confort humano y uso de energía en México,” Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Posgrado, 2016.
- [8] “LA INERCIA TÉRMICA DE LOS MATERIALES Y SU CONTRIBUCIÓN A LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS EDIFICIOS.”

<https://www.inmoley.com/NOTICIAS/1612345/2016-1-inmobiliario-urbanismo-vivienda/02-16-inmobiliario-03-20.html> (accessed Apr. 19, 2023).

- [9] “Inercia térmica: características, utilidad e importancia | Renovables Verdes.” <https://www.renovablesverdes.com/inercia-termica/> (accessed Apr. 19, 2023).
- [10] 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. September, p. 101910, 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.101910.
- [11] J. H. Yeon, “Thermal behavior of cement mortar embedded with low-phase transition temperature PCM,” *Constr Build Mater*, vol. 252, p. 119168, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119168.
- [12] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, and C. Castelain, “Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, no. May 2019, p. 109579, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109579.
- [13] C. Amaral, R. Vicente, P. A. A. P. Marques, and A. Barros-Timmons, “Phase change materials and carbon nanostructures for thermal energy storage: A literature review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, no. January, pp. 1212–1228, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.093.
- [14] A. Frazzica *et al.*, “Thermal performance of hybrid cement mortar-PCMs for warm climates application,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 193, no. January, pp. 270–280, 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.01.022.
- [15] 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.
- [16] Z. I. Djamai, F. Salvatore, A. Si Larbi, G. Cai, and M. El Mankibi, “Multiphysics analysis of effects of encapsulated phase change materials (PCMs) in cement

- mortars,” *Cem Concr Res*, vol. 119, no. January, pp. 51–63, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.02.002.
- [17] M. Hunger, A. G. Entrop, I. Mandilaras, H. J. H. Brouwers, and M. Founti, “The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials,” *Cem Concr Compos*, vol. 31, no. 10, pp. 731–743, 2009, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.08.002.
- [18] A. Fallahi, G. Guldentops, M. Tao, S. Granados-Focil, and S. van Dessel, “Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties,” *Appl Therm Eng*, vol. 127, pp. 1427–1441, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.161.
- [19] Jan Kośny, *PCM-Enhanced Building Components: An Applicatif Phaon ose Change Materials*. 2015. Accessed: Nov. 15, 2021. [Online]. Available: https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=F60ICQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&ots=08CxeCOBNV&sig=fjOWRQf_NzriYK08w6Pmr6wLJrs&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [20] V. V. Tyagi and D. Buddhi, “PCM thermal storage in buildings: A state of art,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 6, pp. 1146–1166, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2005.10.002.
- [21] X. Zuo, X. Zhao, J. Li, Y. Hu, H. Yang, and D. Chen, “Enhanced thermal conductivity of form-stable composite phase-change materials with graphite hybridizing expanded perlite/paraffin,” *Solar Energy*, vol. 209, no. July, pp. 85–95, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.08.082.
- [22] 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.
- [23] M. Li, S. Magdassi, Y. Gao, and Y. Long, “Hydrothermal Synthesis of VO₂ Polymorphs: Advantages, Challenges and Prospects for the Application of Energy

- Efficient Smart Windows,” *Small*, vol. 13, no. 36, pp. 1–25, 2017, doi: 10.1002/sml.201701147.
- [24] C. Takai, M. Senna, S. Hoshino, H. Razavi-Khosroshahi, and M. Fuji, “Chemical and thermal properties of VO₂ mechanochemically derived from V₂O₅ by co-milling with paraffin wax,” *RSC Adv*, vol. 8, no. 38, pp. 21306–21315, 2018, doi: 10.1039/c8ra02159g.
- [25] K. Yu, Y. Huang, B. Jin, and Y. Liu, “Experimental Research on Thermomechanical Properties of Thermal Energy Storage Cement Mortar Incorporated with Phase-Change Material,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/9134889.
- [26] S. Yu, S. G. Jeong, O. Chung, and S. Kim, “Bio-based PCM/carbon nanomaterials composites with enhanced thermal conductivity,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 120, no. PART B, pp. 549–554, 2014, doi: 10.1016/j.solmat.2013.09.037.
- [27] R. Murty, Raj, Murday, Shankar, *Nanoscience Nanotechnology*. 2013.
- [28] M. H. Rincón, “CAMBIO CLIMATICO Y SUS IMPLICACIONES SOBRE LA SALUD,” 2017.
- [29] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, “C I E N C I A E I N G E N I E R Í A D E MATERIALES Versión española traducida por PERE MOLERA SOLÀ Segunda edición Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México,” 2011, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: www.reverte.com
- [30] D. R. Askeland, P. P. Fulay, and W. J. Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*, Sexta edición. 2012. Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://osvaldoweb.files.wordpress.com/2016/04/ciencia-e-ingenieria-de-materiales-sexta-edicic3b3n.pdf>
- [31] L. Olivieri, J. A. Tenorio, D. Revuelta, L. Navarro, and L. F. Cabeza, “Developing a PCM-enhanced mortar for thermally active precast walls 2 3”.

- [32] W. González, V. Héctor, and L. Mancini, “Ciencia de los Materiales”, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <http://fisica.unav.es/>
- [33] A. Güemes, G. Nuria, and M. Piris, “Ciencia de materiales para ingenieros.”
- [34] M. Moscoso, “Aplicacion de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura,” Escola Tecnica Superior d’Arquitectura de Barcelona, 2016.
- [35] “Difusividad Térmica - Areaciencias.” <https://www.areaciencias.com/fisica/difusividad-termica/> (accessed Feb. 19, 2023).
- [36] H. M. Barra, S. K. Chen, N. Tamchek, Z. A. Talib, O. J. Lee, and K. B. Tan, “Nanostructured vo2 (A) and vo2 (m) derived from vo2 (b): Facile preparations and analyses of structural, thermal, optical and thermophysical properties,” *Medziagotyra*, vol. 27, no. 3, pp. 269–275, 2021, doi: 10.5755/J02.MS.27395.
- [37] C. L. Gomez-Heredia *et al.*, “Measurement of the hysteretic thermal properties of W-doped and undoped nanocrystalline powders of VO₂,” *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-51162-4.
- [38] M. Liu, B. Su, Y. Tang, X. Jiang, and A. Yu, “Recent advances in nanostructured vanadium oxides and composites for energy conversion,” *Adv Energy Mater*, vol. 7, no. 23, pp. 1–34, 2017, doi: 10.1002/aenm.201700885.
- [39] Z. Chen, Y. Gao, L. Kang, C. Cao, S. Chen, and H. Luo, “Fine crystalline VO₂ nanoparticles: Synthesis, abnormal phase transition temperatures and excellent optical properties of a derived VO₂ nanocomposite foil,” *J Mater Chem A Mater*, vol. 2, no. 8, pp. 2718–2727, 2014, doi: 10.1039/c3ta14612j.
- [40] T. Cheng, N. Wang, H. Wang, R. Sun, and C. P. Wong, “A newly designed paraffin@VO₂ phase change material with the combination of high latent heat and large thermal conductivity,” *J Colloid Interface Sci*, vol. 559, pp. 226–235, 2020, doi: 10.1016/j.jcis.2019.10.033.

- [41] P. Bondavalli, *Carbon and Its New Allotropes*. 2018. doi: 10.1016/b978-0-323-48101-4.00001-1.
- [42] H. L. de la V. G. La, “NANOTUBOS DE CARBONO Y SUS APLICACIONES EN LA ELECTRÓNICA,” Valdivia, 2009.
- [43] E. Souza, “Aprende a evitar las principales fuentes de pérdida de energía en tus edificios ,” May 30, 2019. <https://www.archdaily.mx/mx/917456/aprende-a-evitar-las-principales-fuentes-de-perdida-de-energia-en-tu-casa> (accessed Jan. 03, 2023).
- [44] E. A. Mari, “Los materiales cerámicos. Aplicaciones estructurales, funcionales y artísticas,” 2001, Accessed: Nov. 11, 2021. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Los_materiales_cer%C3%A1micos.html?hl=es&id=ageXDwAAQBAJ
- [45] Ministerio de Transporte Movilidad y Agenda Urbana, “Cálculo de parámetros característicos de la envolvente,” pp. 1–26, 2020, [Online]. Available: https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA_DB-HE-1_Calculo_de_parametros_caracteristicos_de_la_envolvente.pdf
- [46] M. A. B. Yunes A Cengel, *Termodinamica*, Septima. 2012.
- [47] Y. Zhang, K. Wang, W. Tao, and D. Li, “Preparation of microencapsulated phase change materials used graphene oxide to improve thermal stability and its incorporation in gypsum materials,” *Constr Build Mater*, vol. 224, pp. 48–56, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.227.
- [48] L. Silvestro and P. Jean Paul Gleize, “Effect of carbon nanotubes on compressive, flexural and tensile strengths of Portland cement-based materials: A systematic literature review,” *Constr Build Mater*, vol. 264, p. 120237, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120237.
- [49] C. G. N. Marcondes and M. H. F. Medeiros, “Análisis de dispersión de nanotubos de carbono en concretos de cemento Portland,” *Revista ALCONPAT*, vol. 6, no. 2, p. 1, 2016.

- [50] A. Fehervari *et al.*, “On the mechanisms for improved strengths of carbon nanofiber-enriched mortars,” *Cem Concr Res*, vol. 136, no. January, p. 106178, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106178.
- [51] K. Gawel, S. Wenner, and L. Edvardsen, “Effect of carbonation on bulk resistivity of cement/carbon nanofiber composites,” *Constr Build Mater*, vol. 305, no. April, p. 124794, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124794.
- [52] L. Ahmed Sbia, A. Peyvandi, P. Soroushian, J. Lu, and A. M. Balachandra, “Enhancement of Ultrahigh Performance Concrete Material Properties with Carbon Nanofiber,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/854729.
- [53] L. Coppola, D. Coffetti, and S. Lorenzi, “Cement-Based Renders Manufactured with Phase-Change Materials: Applications and Feasibility,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/7254823.
- [54] S. Cunha, M. Silva, and J. Aguiar, “Behavior of cementitious mortars with direct incorporation of non-encapsulated phase change material after severe temperature exposure,” *Constr Build Mater*, vol. 230, p. 117011, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117011.
- [55] S. S. Lucas, V. M. Ferreira, and J. L. B. de Aguiar, “Latent heat storage in PCM containing mortars - Study of microstructural modifications,” *Energy Build*, vol. 66, pp. 724–731, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.060.
- [56] L. F. Cabeza *et al.*, “Behaviour of a concrete wall containing micro-encapsulated PCM after a decade of its construction,” *Solar Energy*, vol. 200, no. October, pp. 108–113, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.12.003.
- [57] C. Li *et al.*, “Energy performance of buildings with composite phase-change material wallboards in different climatic zones of China,” *Energy Build*, vol. 273, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112398.

- [58] Y. Du, P. Liu, X. Quan, and C. Ma, “Characterization and cooling effect of a novel cement-based composite phase change material,” *Solar Energy*, vol. 208, no. July, pp. 573–582, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.07.083.
- [59] C. Li *et al.*, “Experimental thermal performance of wallboard with hybrid microencapsulated phase change materials for building application,” *Journal of Building Engineering*, vol. 28, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.job.2019.101051.
- [60] American Society for Testing and Materials, “ASTM C 144 Especificación Normalizada para Agregados para Morteros de Albañilería.”
- [61] American Society for Testing and Materials, “ASTM C 128 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.”
- [62] B. A. T. Mehrabadi, S. Eskandari, U. Khan, R. D. White, and J. R. Regalbutto, *A Review of Preparation Methods for Supported Metal Catalysts*, 1st ed., vol. 61. Elsevier Inc., 2017. doi: 10.1016/bs.acat.2017.10.001.
- [63] M. D. Alcalá and C. Real, “Synthesis based on the wet impregnation method and characterization of iron and iron oxide-silica nanocomposites,” *Solid State Ion*, vol. 177, no. 9–10, pp. 955–960, 2006, doi: 10.1016/j.ssi.2006.01.019.
- [64] S. P. Jiang, “A review of wet impregnation - An alternative method for the fabrication of high performance and nano-structured electrodes of solid oxide fuel cells,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 418, no. 1–2, pp. 199–210, 2006, doi: 10.1016/j.msea.2005.11.052.
- [65] American Society for Testing and Materials, “ASTM C 1437 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.” www.astm.org
- [66] “UNE-EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a b...” <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0043416> (accessed Feb. 20, 2023).

- [67] American Society for Testing and Materials, “ASTM C 305 – Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency,” *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 1–3, 2011.
- [68] American Society for Testing and Materials, “ASTM C 1329 Standard Specification for Mortar Cement.”
- [69] American society for Testing and Materials, “ASTM C 472 – Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum, Gypsum Plasters and Gypsum Concrete,” *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04, no. August, pp. 1–15, 2003.
- [70] “UNE 22190:2014 Productos de piedra natural. Construcción de cu...”
<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0053102>
 (accessed Feb. 20, 2023).
- [71] American society for Testing and Materials, “ASTM D 4843 Standard Test Method for Wetting and Drying Test of Solid Wastes.” www.astm.org,
- [72] American Society for Testing and Materials, “ASTM C 109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens),” *Annual Book of ASTM Standards*, 2002.
- [73] M. R. E. Laine. L. Y. P. H. and K. J. V.-P- Lehto, “Determination of specific heats using isothermal microcalorimetry,” *Journal of Thermal Analysis*, 1998, doi: <https://doi.org/10.1002/jbm.b.10044>.
- [74] D. Gutiérrez-villegas, “Aplicación del método de hilo caliente en la determinación de la resistencia térmica de bloques de concreto-material reciclado,” *Artículo Revista de Energía Química y Física Septiembre*, vol. 3, no. 8, pp. 12–24, 2016, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: www.ecorfan.org/bolivia
- [75] C. Kuai, J. Chen, X. Shi, and Z. Grasley, “Regulating porous asphalt concrete temperature using PEG/SiO₂ phase change composite: Experiment and simulation,” *Constr Build Mater*, vol. 273, p. 122043, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122043.

- [76] 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.
- [77] L. Berkeley *et al.*, “Engineering Reference,” 2018.
- [78] “climate.onebuilding.org.” <https://climate.onebuilding.org/> (accessed Feb. 20, 2023).
- [79] American Society for Testing and Material, “ASTM C 150 Standard Specification for Portland Cement,” *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04, pp. 1–9, 2020.
- [80] American Society for Testing Materials, “ASTM C 22 – Standard Specification for Gypsum,” *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 1–11, 2015.
- [81] M. M. Alejandro Giraldo and J. Iván Tobón, “EVOLUCIÓN MINERALÓGICA DEL CEMENTO PORTLAND DURANTE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN MINERALOGICAL EVOLUTION OF PORTLAND CEMENT DURING HYDRATION PROCESS,” *Año*, vol. 73, pp. 69–81, 2006.
- [82] K. C. Vrancken and B. Laethem, “Recycling options for gypsum from construction and demolition waste,” *Waste Management Series*, vol. 1, no. C, pp. 325–331, 2000, doi: 10.1016/S0713-2743(00)80045-8.
- [83] P. Benitez, “Importancia de la Microscopía de Luz Reflejada para el Estudio del Clinker Portland en la Industria Nacional del Cemento (I.N.C.), Villeta - Paraguay.,” 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.14014.31048.
- [84] F. Nindiyasari *et al.*, “Characterization and mechanical properties investigation of the cellulose/gypsum composite,” *J Compos Mater*, vol. 50, no. 5, pp. 657–672, 2016, doi: 10.1177/0021998315580826.
- [85] K. Scrivener, R. Snillings, and B. Lothenbach, *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Material*. 2020.

- [86] J. I. Tobón, O. Jaime, R. Baena, J. Juan, and P. Bernabeu, “ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS AL CEMENTO PORTLAND PORTLAND,” vol. 152, pp. 277–291, 2007.
- [87] M. Saini, B. S. Dehiya, A. Umar, and M. S. Goyat, “Phase modulation in nanocrystalline vanadium di-oxide (VO₂) nanostructures using citric acid via one pot hydrothermal method,” *Ceram Int*, vol. 45, no. 15, pp. 18452–18461, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ceramint.2019.06.063.
- [88] H. M. Barra, S. K. Chen, N. Tamchek, Z. A. Talib, O. J. Lee, and K. B. Tan, “Nanostructured vo₂ (A) and vo₂ (m) derived from vo₂ (b): Facile preparations and analyses of structural, thermal, optical and thermophysical properties,” *Medziagotyra*, vol. 27, no. 3, pp. 269–275, 2021, doi: 10.5755/j02.ms.27395.
- [89] C.-D.-C. C. Bach TTH, “Retention of alkalis by hydrated low-pH cements designed for underground radioactive waste repositories,” 2011. https://www.researchgate.net/publication/292144264_Retention_of_alkalis_by_hydrated_low-pH_cements_designed_for_underground_radioactive_waste_repositories (accessed Oct. 25, 2022).
- [90] D. C. S. Garcia, M. M. N. de S. Soares, A. C. da S. Bezerra, M. T. P. Aguilar, and R. B. Figueiredo, “Microstructure and hardness of cement pastes with mineral admixture,” *Revista Materia*, vol. 22, no. 2, 2017, doi: 10.1590/S1517-707620170002.0145.
- [91] V. Sasnauskas, “Cement hydration with zeolite-based additive,” 2013. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/259580412>
- [92] S. A. Yaseen, G. A. Yiseen, and Z. Li, “Elucidation of Calcite Structure of Calcium Carbonate Formation Based on Hydrated Cement Mixed with Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide,” *ACS Omega*, vol. 4, no. 6, pp. 10160–10170, Jun. 2019, doi: 10.1021/acsomega.9b00042.

- [93] M. A. Tantawy, “Effect of High Temperatures on the Microstructure of Cement Paste,” *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, vol. 05, no. 11, pp. 33–48, 2017, doi: 10.4236/msce.2017.511004.
- [94] R. Ylmén, U. Jäglid, B. M. Steenari, and I. Panas, “Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques,” *Cem Concr Res*, vol. 39, no. 5, pp. 433–439, May 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.01.017.
- [95] R. Alizadeh, “Nanostructure and Engineering Properties of Basic and Modified Calcium-Silicate-Hydrate Systems,” 2009. Accessed: Oct. 26, 2022. [Online]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/282611085_Nanostructure_and_Engineering_Properties_of_Basic_and_Modified_Calcium-Silicate-Hydrate_Systems/figures?lo=1
- [96] “NOTAS - Instituto Mexicano del Transporte.” <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=362&IdBoletin=134> (accessed Mar. 02, 2023).
- [97] D. J. C. Gomes, N. C. de Souza, and J. R. Silva, “Using a monocular optical microscope to assemble a wetting contact angle analyser,” *Measurement (Lond)*, vol. 46, no. 9, pp. 3623–3627, 2013, doi: 10.1016/j.measurement.2013.07.010.
- [98] “¿Qué es la energía superficial y cómo influye a la hora de seleccionar la cinta adhesiva? - Trayma.” <https://www.trayma.es/que-es-la-energia-superficial/> (accessed Mar. 02, 2023).
- [99] J. L. Álvarez Cabrera, “Caracterización de morteros para revestimiento con polvo de piedra,” vol. 4, no. 2, pp. 30–37, 2005, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619745004>
- [100] A. Ricklefs, “Thermal Conductivity of Cementitious Composites Containing Microencapsulated Phase Change Materials.” 2016.
- [101] A. Richardson, A. Heniegal, and J. Tindall, “Optimal performance characteristics of mortar incorporating phase change materials and silica fume,” *Journal of Green Building*, vol. 12, no. 2, pp. 59–78, 2017, doi: 10.3992/1943-4618.12.2.59.

- [102] A. Olivieri, L. Tenorio Ríos, J. Antonio Revuelta Crespo, D. Navarro, and L. Cabeza, “Developing a PCM-enhanced mortar for thermally active precast walls”, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10261/211515>
- [103] C. J. G. Matos, A. Navarro, and J. R. Casas, “ESTUDIO DEL YESO TRADICIONAL Y SUS APLICACIONES EN LA ARQUITECTURA DEL PALLARS SOBIRÁ,” 2016.
- [104] Y. Ennaciri, A. Zegzouti, Y. Ennaciri, M. Bettach, A. Cherrat, and A. Zegzouti, “Conversion of phosphogypsum to sodium sulfate and calcium carbonate in aqueous solution,” *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 7, no. 6, pp. 1925–1933, 2016, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/305266344>
- [105] Y. Liu, “Raman, Mid-IR, and NIR spectroscopic study of calcium sulfates and mapping gypsum abundances in Columbus crater, Mars,” *Planet Space Sci.*, vol. 163, pp. 35–41, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.pss.2018.04.010.
- [106] A. Pouria, H. Bandegani, M. Pourbaghi-Masouleh, S. Hesarakhi, and M. Alizadeh, “Physicochemical properties and cellular responses of strontium-doped gypsum biomaterials,” *Bioinorg Chem Appl.*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/976495.
- [107] A. Vimmrová, · J Krejsová, · L Scheinherrová, · M Doleželová, and · M Keppert, “Changes in structure and composition of gypsum paste at elevated temperatures,” *J Therm Anal Calorim.*, vol. 142, pp. 19–28, 2020, doi: 10.1007/s10973-020-09528-8.
- [108] Sócrates Muñoz, “Uso de Nanomateriales en la Producción del Concreto: Revisión Literaria,” pp. 74–87, 2021. doi: 10.25286/rep.v6i4.1676.
- [109] H. M. Barra, S. K. Chen, N. Tamchek, Z. A. Talib, O. J. Lee, and K. B. Tan, “Phase, Microstructure, Thermochemical, and Thermophysical Analyses of Hydrothermally Synthesized W-Doped VO₂Nanopowder,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/8582274.
- [110] I. Ricardo and C. Araujo, “Materia: MATERIALES DE CONSTRUCCION GUIA DE CLASES No. 4 MATERIALES DE CONSTRUCCION Torre Sears,” 2006,

- Accessed: Aug. 21, 2022. [Online]. Available: <http://www.astroseti.org/vernew.php?codigo=926>
- [111] SCT, “N-CMT-2-02-001/02,” *Normativa para la Infraestructura del Transporte*. 2002. Accessed: Aug. 23, 2022. [Online]. Available: <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-001-02.pdf>
- [112] Á. Sanjuán and S. Chinchón, *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland*, vol. 34, no. 11. 2006. [Online]. Available: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/45347>
- [113] J. A. Polanco, M. Jesús, and S. Marquínez, “Cementos, morteros y hormigones.” 2015. [Online]. Available: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/811/course/section/868/1_Cementos.pdf
- [114] C. Gillot and A. Coutelas, “Cements, Mortars, Binders,” *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*, pp. 1–5, Nov. 2018, doi: 10.1002/9781119188230.SASEAS0076.
- [115] R. Salamanca Correa, “La tecnología de los morteros,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 11, pp. 41–48, 2001, doi: 10.18359/rcin.1353.
- [116] Oscar Rodríguez-Mora, *Morteros Guía General*. 2003. Accessed: Aug. 23, 2022. [Online]. Available: www.afam-morteros.com
- [117] H. Begliardo, M. Sánchez, M. C. Panigatti, and S. Garrappa, “Reutilización de yeso recuperado de construcciones: Un estudio basado en requisitos de aptitud de normas argentinas y chilenas,” *Revista de la Construcción*, vol. 12, no. 3, pp. 27–35, 2013, doi: 10.4067/s0718-915x2013000300003.
- [118] A. Jiménez-Rivero and J. García-Navarro, *Management of end-of-life gypsum in a circular economy*. Elsevier Ltd., 2020. doi: 10.1016/b978-0-12-819055-5.00005-x.
- [119] S. Fernández Casado, “Reciclaje interno de los residuos en las fábricas. Reutilización del yeso reciclado para la fabricación de placas de yeso laminado,” *CONAMA10 - Congreso Nacional del Medio Ambiente*, p. 17, 2010, [Online].

Available: <http://www.conama10.conama.org/conama10/download/files/CT2010/1335816526.pdf>

- [120] J. A. Conesa, “Mecanismos de transmisión de calor (conducción, convección, radiación),” Dec. 2013, Accessed: May 22, 2021. [Online]. Available: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/34475>

8. Anexos

8.1 Glosario

Materiales Cementantes

Se conoce como material cementante a todo aquel con la capacidad de unir elementos de una o varias naturalezas por medio de adhesión y cohesión para conformar una masa [110]. En el sector de la construcción se han estudiado diferentes materiales cementantes, sin embargo, entre los más conocidos por su amplia utilización se encuentran el cemento Portland compuesto y el yeso [44].

Cemento Portland Compuesto (CPC)

El CPC es un tipo de cementante hidráulico ampliamente utilizado en el sector construcción debido a las propiedades mecánicas que este puede desarrollar al hidratarse con agua. Para su producción es necesaria la molienda conjunta de clinker Portland (50–94%), puzolanas (6–35%), escoria de alto horno (6–35%), humo de sílice (1-10%), caliza (6-35%) y sulfato de calcio (0-5%) [111]. La composición química de este producto puede variar respecto a la materia prima con la que se fabrique, en general, se pueden identificar los siguientes compuestos: silicato tricálcico o Alita ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) de 46-79%, silicato bicálcico o Belita ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) de 5 a 30%, ferritoaluminato tetracálcico o felita ($4\text{CaO}(\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)$) de 4 a 16%, aluminato tricálcico o Celita ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) de 6 a 18% y hemidrato de calcio ($\text{CaSO}_4\cdot\frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) o yeso hasta un 5% [112].

La compleja composición química del CPC ocasiona que durante su hidratación se desarrollen productos diversos, no obstante, se pueden identificar los siguientes: Tobermorita (CSH), Portlandita (hidróxido de calcio) y Etringita (trisulfoaluminato de calcio) [81]. Estos productos de hidratación son los encargados de dar resistencia

mecánica y estabilidad química a la pasta durante su vida útil, por ello es que el CPC resulta tener diversas formas de utilización [81].

Este material es usado principalmente como ligante de agregados gruesos y finos (comúnmente pétreos). La mezcla de estos elementos puede dar como producto dos materiales de construcción destacables, por un lado, el concreto (CPC + agua + grava + arena) y por el otro el mortero (CPC + agua + arena) [113].

Mortero

Se define mortero a la mezcla de uno o más cementantes inorgánicos, agregado fino y agua [114]. Los morteros de CPC tienen una gran variedad de usos en el área de la construcción, por ejemplo, como ligante de bloques o tabiques y como revestimiento de elementos verticales y horizontales (muros y techos) [115]. Los factores que vuelven tan versátil a este material son su adaptación de forma, facilidad de aplicación y prestaciones al diseño [116]. Debido a su amplia utilidad resulta atractivo dotar a los morteros de propiedades adicionales que se traduzcan a el mejoramiento del desempeño energético y estructural de las construcciones.

Yeso

El yeso de construcción es un aglutinante utilizado para la elaboración de una pasta moldeable con fraguado rápido [117]. Su composición química se basa en el hemidrato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), el cual, al entrar en contacto con agua se hidrata y forma un compuesto llamado dihidrato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [118]. El comienzo de la utilización del yeso se remonta hasta hace 4000 años, donde se aplicaba para la elaboración de piezas artísticas y ornamentales [119]. Fue hasta el siglo XVIII que se comenzó el empleo de este material como recubrimiento y, posteriormente, en subproductos a base yeso para la construcción [119]. En la actualidad es un material de gran aplicación, no solo por su acabado aparente sino también por sus propiedades

intrínsecas las cuales van desde ser moldeable, liviano y estético hasta considerarse buen aislante térmico, acústico y resistente al fuego [117].

Mecanismos de transferencia y Sistemas de almacenamiento de calor

Debido a los objetivos planteados en esta investigación se hará una breve descripción de terminologías básicas relacionadas con los mecanismos de transferencia de calor y sistemas de almacenamiento de calor.

Mecanismos de Transferencia de calor

El calor es el tipo de energía cinética que se transfiere de un cuerpo a otro para mantener un equilibrio térmico [120]. Este proceso se puede llevar a cabo de 3 formas, conocidas como mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Las cuales a continuación se describen:

- Conducción: se presenta cuando el calor fluye de las partículas que tienen mayor energía a las adyacentes que tienen una menor cantidad.
- Convección: es la transferencia de calor que se presenta entre un fluido y un sólido, donde la energía fluye de la superficie del sólido hacia un fluido que se encuentra en movimiento.
- Radiación: se da debido a la interacción de la materia con ondas electromagnéticas, las cuales generan un movimiento vibratorio-rotacional ocasionando un incremento de energía térmica en la materia [46].
-

Sistemas de Almacenamiento de calor

Los mecanismos de transferencia de calor evidencian la versatilidad con que la energía puede fluir de un cuerpo a otro. Estos procesos están íntimamente ligados a las entalpías

de la materia involucrada, las cuales pueden aumentar o disminuir la facilidad con la que se lleva a cabo la transferencia de calor [1]. Por ello, es importante conocer las 3 formas en que la materia puede llevar a cabo este almacenamiento, esquemáticamente se presentan y describen en la figura 1 [34].

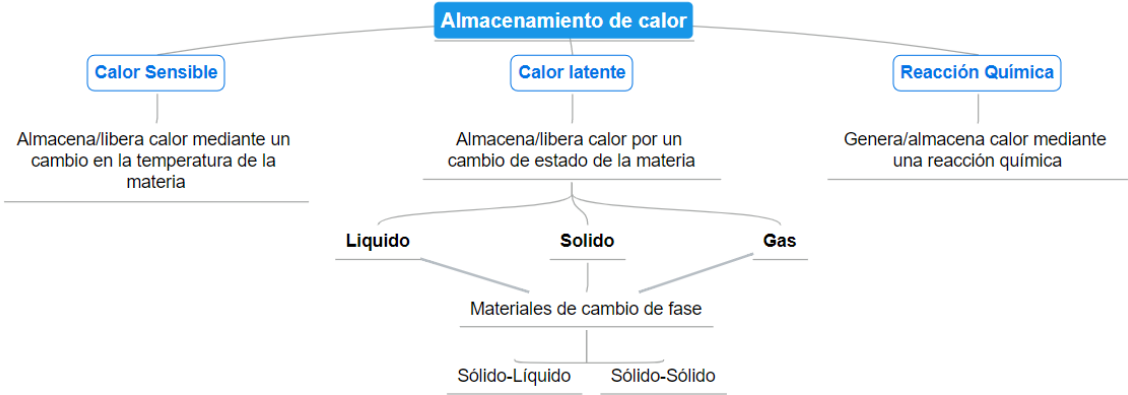


Figura 60. *Sistemas de almacenamiento de calor*