



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias con línea terminal en Construcción

Análisis de la adherencia de microcápsulas de material de cambio de fase en mortero adicionando con aditivo plastificante.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias

Presenta:
Arq. Mariana Solórzano Espinosa

Dirigido por:
Dr. José Luis Reyes Araiza

Dr. José Luis Reyes Araiza
Presidente
Dr. Saul Antonio Obregón Biosca
Secretario
Dr. Alejandro Manzano Ramírez
Vocal
Dr. Rubén Ramírez Jiménez
Suplente
Dr. José de Jesús Pérez Bueno
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Noviembre de 2025
México

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

 **Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.

 **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

 **SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

Dedicatorias

A mis padres y mi hermano. Sin ellos no hubiera sido posible realizar este proyecto. A pesar de estar a la distancia, siempre han estado al pendiente de mí y me han apoyado en cada etapa incondicionalmente.

A mis amigos, tanto a mis amigos que tengo a la distancia, por estar para mí cuando es necesario, como a los nuevos amigos que he hecho en el camino de este proyecto, que han hecho que esta etapa sea memorable.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo y los recursos otorgados para el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por permitirme estudiar una maestría en esta institución.

A la Facultad de Ingeniería, por haberme brindado el espacio y recursos necesarios para que mi proyecto de investigación pudiera ser realizado.

A mis maestros y compañeros, por compartir conmigo parte del conocimiento que tienen y ayudarme en el transcurso de este proyecto.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	13
1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2	JUSTIFICACIÓN	15
1.3	HIPÓTESIS	16
1.4	OBJETIVOS	16
1.4.1	OBJETIVO GENERAL	16
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2.	ANTECEDENTES	17
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	21
3.1	MICROESFERAS DE VIDRIO	21
3.2	MORTERO	22
3.3	ADITIVOS	22
3.4	AGUA	24
3.5	AGREGADOS	25
3.6	RELACIÓN AGUA/CEMENTO	25
3.7	MÓDULO A LA RUPTURA	26
3.8	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	26
3.9	COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	26
4.	METODOLOGÍA	28
4.1	OBTENCIÓN DE MATERIALES Y AGREGADOS	28
4.2	CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS	29
4.3	DISEÑO DE MEZCLAS	36
4.4	ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES	36

4.5	PRUEBAS MECÁNICAS.....	37
4.6	PRUEBAS TÉRMICAS.....	42
4.7	CONDICIONES ÉTICAS Y DE SEGURIDAD	43
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
5.1	RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE ARENA.....	44
5.2	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	49
5.2.1	GRÁFICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN DE PRUEBAS DE COMPRESIÓN	57
5.3	MÓDULO A LA RUPTURA	60
5.3.1	GRÁFICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN DE PRUEBAS DE FLEXIÓN	69
5.4	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	73
6.	CONCLUSIONES	78
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema representativo de la relación agua/cemento. Elaboración propia.	26
Figura 2. Diseño de mezclas. Elaboración propia.....	29
Figura 3. Proceso para desarrollo de mezcla de mortero. Elaboración propia.	37
Figura 4. Curva granulométrica de arena. Elaboración propia.....	45
Figura 5. Resistencia a la compresión promedio por mezcla. Elaboración propia. 54	
Figura 6. Resistencia a la compresión de mezclas sin microesferas. Elaboración propia.....	55
Figura 7. Resistencia de mezclas con microesferas y sin aditivo. Elaboración propia.	
.....	56
Figura 8. Gráfica esfuerzo deformación de ensayo de compresión de mezcla A0M2. Elaboración propia.....	58
Figura 9. Gráfica esfuerzo deformación de ensayo de compresión de mezcla A7M0. Elaboración propia.....	59
Figura 10. Resistencia a la flexión promedio por mezcla. Elaboración propia.	64
Figura 11. Resistencia a la flexión de mezclas sin microesferas de vidrio. Elaboración propia.....	65
Figura 12. Resistencia a la flexión de mezclas sin aditivo. Elaboración propia.	65
Figura 13. Gráfica de resistencia a la flexión de mezclas. Elaboración propia.	66
Figura 14. Gráfica esfuerzo-deformación de ensayo de flexión de mezcla A0M0. Elaboración propia.....	70
Figura 15. Gráfica esfuerzo-deformación de ensayo de flexión de mezcla A0M2. Elaboración propia.....	71
Figura 16. Gráfica esfuerzo-deformación de ensayo de flexión de mezcla A5M2. Elaboración propia.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de conductividad térmica de materiales de construcción. Elaboración propia.....	14
Tabla 2. Tipos de aditivos para mortero. Fuente: C. A. Méndez.....	23
Tabla 3. Propiedades de microesferas K1. Fuente: 3M Company.....	35
Tabla 4. Diseño de mezclas. Elaboración propia.....	36
Tabla 5. Granulometría de arena. Elaboración propia.....	45
Tabla 6. Resultados de módulo de finura. Elaboración propia.....	46
Tabla 7. Resultados de peso volumétrico seco suelto y compacto. Elaboración propia.....	48
Tabla 8. Edad de ensayo de especímenes para pruebas de compresión. Elaboración propia.....	51
Tabla 9. Resistencias de ensayos a compresión. Elaboración propia.....	53
Tabla 10. Datos obtenidos de ensayo de resistencia a la compresión de mezcla A0M2. Elaboración propia.....	58
Tabla 11. Datos obtenidos de ensayo de resistencia a la compresión de mezcla A7M0. Elaboración propia.....	59
Tabla 12. Edad de ensayo de especímenes para pruebas de flexión. Elaboración propia.....	61
Tabla 13. Resistencias de ensayos a flexión. Elaboración propia.....	63
Tabla 14. Porcentaje de calor transferido. Elaboración propia.....	76

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Cemento Portland CPC. Imagen propia.....	28
Imagen 2. Cuarteo mecánico para mezclas representativas. Imagen propia.	31
Imagen 3. Tamices utilizados para la granulometría de las arenas según Norma ASTM C136. Imagen propia.....	32
Imagen 4. Materiales para la obtención del peso volumétrico seco y compacto de arenas según la Norma ASTM C29. Imagen propia.	34

Imagen 5. Mesa de fluidez con molde. Imagen propia.....	38
Imagen 6. Expansión de mortero sobre mesa de fluidez. Imagen propia.....	38
Imagen 7. Arena retenida en prueba de granulometría. Imagen propia.....	44
Imagen 8. Prueba de peso volumétrico de arena. Imagen propia.....	47
Imagen 9. Mezcla de mortero. Imagen propia.....	49
Imagen 10. Preparación de mezcla de mortero en prueba de fluidez. Imagen propia.	
.....	49
Imagen 11. Mezcla de mortero en prueba de fluidez. Imagen propia.....	50
Imagen 12. Especímenes en moldes para pruebas de compresión. Imagen propia.	
.....	50
Imagen 13. Especímenes para pruebas de compresión. Imagen propia.....	50
Imagen 14. Especímenes para pruebas de compresión. Imagen propia.....	51
Imagen 15. Especímenes para pruebas de compresión en su proceso de curado.	
Imagen propia.....	51
Imagen 16. Prueba de compresión a primeros especímenes de mortero. Imagen propia.....	52
Imagen 17. Espécimen sometido a prueba de compresión. Imagen propia.....	52
Imagen 18. Moldes para especímenes de pruebas a flexión. Imagen propia.....	60
Imagen 19. Espécimen en molde para prueba de flexión. Imagen propia.....	60
Imagen 20. Espécimen para prueba a flexión. Imagen propia.....	61
Imagen 21. Especímenes para flexión en el área de curado. Imagen propia.....	61
Imagen 22. Ensayo a flexión en 3 puntos. Imagen propia.....	62
Imagen 23. Especímenes ensayados hasta su ruptura. Imagen propia.....	63
Imagen 24. Espécimen con 6% de HGM. Imagen propia.....	68
Imagen 25. Especímenes con 6% de HGM. Imagen propia.....	68
Imagen 26. Especímenes de mezcla A2M0. Imagen propia.....	68
Imagen 27. Especímenes de mezcla A4M0. Imagen propia.....	68
Imagen 28. Especímenes de mezcla A2M4. Imagen propia.....	69
Imagen 29. Especímenes de mezcla A2M4. Imagen propia.....	69
Imagen 30. Especímenes de mezcla A7M2. Imagen propia.....	69

Imagen 31. Especímenes de mezcla A7M2. Imagen propia.....	69
Imagen 32. Especímenes para pruebas con cámara termográfica. Imagen propia.....	73
Imagen 33. Fotografía de cámara termográfica. Imagen propia.....	74
Imagen 34. Fotografía de cámara termográfica. Imagen propia.....	74
Imagen 35. Fotografía de cámara termográfica. Imagen propia.....	74
Imagen 36. Fotografía de cámara termográfica. Imagen propia.....	74
Imagen 37. Fotografía de cámara termográfica. Imagen propia.....	75
Imagen 38. Fotografía de cámara termográfica. Imagen propia.....	75
Imagen 39. Fotografía de cámara termográfica. Imagen propia.....	75
Imagen 40. Fotografía de cámara termográfica. Imagen propia.....	75
Imagen 41. Fotografía de cámara termográfica. Imagen propia.....	75
Imagen 42. Fotografía de cámara termográfica. Imagen propia.....	75

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en evaluar el comportamiento mecánico y térmico de morteros base cemento Portland con microesferas de vidrio como sustituto de un PCM y un aditivo plastificante, para determinar su efecto en el módulo a la ruptura, en la resistencia a la compresión y en la transferencia de calor de la mezcla. Se plantea que el incremento en la proporción de aditivo plastificante mejora el módulo a la ruptura sin comprometer la eficiencia térmica aportada por las microesferas de vidrio, para ello se realizan ensayos para probar diferentes proporciones de microesferas y aditivo, realizando pruebas de flexión, compresión y de transferencia de calor. Se realizó un análisis comparativo de las mezclas para establecer las proporciones que generen mejores resultados sobre las propiedades térmicas y mecánicas antes mencionadas. Este estudio contribuye al desarrollo de materiales para construcción eficientes y sostenibles enfocados en el confort térmico, generando una posible mejora de la gestión de energía en edificaciones.

Palabras clave: Mortero, microesferas de vidrio, aditivo plastificante, módulo a la ruptura, conductividad térmica.

ABSTRACT

This study focuses on evaluating the mechanical and thermal behavior of Portland cement-based mortars with glass microspheres as a substitute for a PCM and a plasticizing additive, to determine their effect on the modulus of rupture, compressive strength, and heat transfer of the mixture. It is proposed that increasing the proportion of plasticizing additive improves the modulus of rupture without compromising the thermal efficiency provided by the glass microspheres. Tests are carried out to test different proportions of microspheres and additive, performing flexural, compressive, and heat transfer tests. A comparative analysis of the mixtures was carried out to establish the proportions that generate the best results for the mentioned thermal and mechanical properties. This study contributes to the development of efficient and sustainable building materials focused on thermal comfort, generating a possible improvement in energy management in buildings.

Keywords: Mortar, glass microspheres, plasticizing additive, modulus of rupture, thermal conductivity.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la eficiencia energética ha adquirido gran importancia debido a la necesidad de reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. El sector de la construcción es responsable de la mayor parte del consumo total de energía, con la calefacción y refrigeración de espacios representando el 40% y el 61% de la demanda energética en edificios comerciales y residenciales. Se estima que para 2050, la energía utilizada para estos fines aumente hasta un 12% y un 37%. Esto genera un impacto en los recursos disponibles y en la emisión de gases contaminantes a la atmósfera [1].

Como sustituto sostenible de estos recursos, los sistemas de calefacción solar combinados con el almacenamiento de energía térmica han surgido como una alternativa para mejorar el suministro de energía para la calefacción y refrigeración de espacios. Estas son técnicas de acondicionamiento pasivo, las cuales han demostrado ser métodos efectivos para mejorar el rendimiento energético de enfriamiento en edificios, al moderar las fluctuaciones de temperatura, ofreciendo así eficiencia energética a largo plazo y confort térmico interior. Una de las estrategias de interés actual para reducir el consumo de energía mediante estas técnicas es la incorporación de materiales con baja conductividad térmica en los materiales de construcción [2].

Se han empleado materiales de baja densidad, como las microesferas de vidrio, de diversas maneras en materiales de construcción, los materiales que con mayor frecuencia han sido combinados con estas han sido mezclas a base de cemento [2].

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los materiales comunes de construcción presentan una alta tasa de flujo de calor, lo cual se puede interpretar como un alto coeficiente de transferencia de calor. Es conveniente resaltar estos coeficientes de algunos materiales de construcción utilizados actualmente, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de conductividad térmica de materiales de construcción. Elaboración propia.

Material	K (W/m°C)
Roca compacta	3.50
Concreto armado	1.74
Mortero de cemento	1.40
Tabique rojo	0.87

En materia de desarrollo de nuevas tecnologías que impacten en la reducción de consumo energético en edificios sin afectar al confort térmico, se destaca la necesidad de desarrollar materiales con bajo coeficiente de transferencia de calor, y se ha demostrado que al integrar microesferas de vidrio en materiales de construcción se puede lograr tal característica [1].

Además, en diversos proyectos de investigación desarrollados en el mundo se ha evidenciado que los materiales con baja conductividad térmica, pueden ser una opción factible para regular la temperatura en espacios interiores de edificaciones. Sin embargo, se han observado algunas problemáticas en elementos y/o materiales para construcción que incluyen a este tipo de elementos de baja densidad [3]. Para el caso de las microesferas de vidrio, tienen la ventaja de poder integrarse fácilmente en pastas y morteros con cemento Portland, sin embargo, disminuyen las propiedades mecánicas a medida que hay más porcentaje de microesferas en las mezclas de tales materiales. Tal efecto ha sido asociado con la falta de adherencia entre la superficie de las capsulas y el cemento, el cual es el aglutinante de la mezcla, por lo que se han propuesto soluciones, como el uso de aditivos, que pueden mejorar la compatibilidad entre tales componentes [4] [5].

Para compensar la problemática mencionada anteriormente, se propone en esta investigación el uso de aditivos plastificantes en mezclas de mortero para obtener una mezcla que mejore las propiedades mecánicas de morteros base cemento Portland que incluyan microesferas de vidrio, con el fin de evaluar la factibilidad de implementar este compuesto como recubrimiento en sistemas constructivos actuales.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, se ha registrado a nivel global un considerable aumento del consumo energético debido a diversos factores como el crecimiento de la población y el aumento de la temperatura a nivel global. Esto ha generado la expansión de la superficie construida, y con ello, el aumento de equipos de aire acondicionado en las edificaciones. Se registró en el 2023 que la demanda de servicios por refrigeración de edificaciones a nivel mundial ha aumentado más del 45% desde el 2010, además, se espera que incremente la propiedad de aires acondicionados del 37% de la población mundial actual a más del 45% en 2030. Conforme al "Global Status Report for Buildings and Construction 2023", se destaca la necesidad de adoptar soluciones sostenibles para mitigar los impactos de la demanda de energía para la climatización a través de la innovación en materiales y tecnologías que mejoren la eficiencia energética de los edificios [6].

Las características físicas y químicas de los materiales aplicados en las edificaciones tienen mucha importancia en cuanto a la transferencia de energía hacia los espacios interiores, por lo que, es necesario hacer una correcta selección de materiales y procesos constructivos para lograr un acondicionamiento que brinde confort en los espacios habitables y al mismo tiempo lograr una reducción del uso de equipos de aire acondicionado [7]. El uso de microesferas de vidrio en la construcción ha demostrado ser una estrategia eficiente para mejorar el rendimiento térmico de los edificios [8].

Además, las microesferas de vidrio huecas han demostrado ser aditivos funcionales en materiales compuestos, ya que reducen el peso del sistema, mejoran su

capacidad de absorción de energía y disminuyen su conductividad térmica, sin comprometer su resistencia mecánica cuando se incorporan adecuadamente [9].

1.3 HIPÓTESIS

El aumento en la proporción de aditivo plastificante en mezclas de mortero base cemento Portland con microesferas de vidrio como alternativa de PCM incrementa el módulo a la ruptura y la resistencia a la compresión sin aumentar el coeficiente de conductividad térmica.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento mecánico bajo flexión y compresión de morteros base cemento Portland con microesferas de vidrio añadiendo un aditivo plastificante, con el fin de determinar su efecto en el módulo a la ruptura y en la resistencia a la compresión en base a su adherencia, así como en la transferencia de calor de la mezcla.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar el efecto de diferentes proporciones de aditivo plastificante en el módulo a la ruptura y en la resistencia a la compresión del mortero base cemento Portland con microesferas de vidrio.
2. Establecer una relación entre la proporción de microesferas de vidrio y el comportamiento térmico y mecánico del mortero con microesferas de vidrio.
3. Obtener una mezcla de mortero base cemento Portland que presente un equilibrio entre sus propiedades térmicas y mecánicas, haciéndola viable para su uso como recubrimiento.

2. ANTECEDENTES

En los últimos años, el tema de la eficiencia energética en la industria de la construcción ha generado interés en la investigación de materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) para mejorar la regulación térmica de los edificios. Se ha demostrado que la incorporación de PCM en materiales como el concreto o el mortero puede resultar en una reducción significativa de la transferencia de calor a espacios interiores, resultando en una mejora del confort.

Uno de los desafíos en la integración de PCM en materiales de construcción es la reducción de la resistencia mecánica de la mezcla. Estudios han demostrado que al aumentar el contenido de PCM, específicamente en microencapsulados, la densidad del material disminuye, lo que conlleva una reducción en su resistencia a la compresión y flexión. Además, la necesidad de mayor contenido de agua para mantener la trabajabilidad del mortero con PCM puede afectar negativamente la resistencia del material. No obstante, se ha propuesto el uso de aditivos plastificantes para mejorar estas propiedades [10][11][12].

Existen diversos tipos de PCM para su aplicación en edificios, la parafina es de las que más se ha utilizado debido a su accesibilidad con bajo costo y flexibilidad para ser incorporada a través de diferentes métodos, lo que la hace una opción factible para su uso en elementos constructivos. Además, se ha demostrado que al integrar este material en envolventes de edificios se han generado mejoras al reducir y desplazar la carga máxima, produciendo una mejora en el confort térmico [13].

En cuanto a la interacción de PCM y materiales base cemento está influenciada por el fenómeno de contacto, el cual depende de la adherencia (química, fricción, anclaje mecánico) y la rugosidad de la superficie. Un mayor contacto entre las partículas de PCM y la matriz cementosa permite una transferencia más uniforme de tensiones y cargas a través de los límites del material. Además, la incorporación de PCM puede influir en la expansión volumétrica de la mezcla, reduciéndola en algunos casos debido a la elasticidad del material encapsulado. En este sentido, se ha planteado la necesidad de desarrollar microencapsulados que sean compatibles

con el proceso de hidratación del cemento Portland para minimizar los efectos negativos en la resistencia mecánica [14].

En el trabajo de [15], se evaluaron mezclas de mortero con PCM en diversas proporciones, se encontró que la mezcla de mortero en proporción 1:2.75, sustituyendo una parte de arena por PCM y un agregado ligero, presentó una resistencia similar a un mortero convencional en cuanto a su resistencia a la compresión y a la flexión. Sin embargo, se ha encontrado en estudios algunas deficiencias al integrar PCM, como en [16], se demuestra que un mayor contenido de PCM disminuye la densidad de la mezcla, lo que produce una reducción de su resistencia mecánica. Otro factor es que al adicionar PCM surge la necesidad de aumentar el contenido de agua para mantener la trabajabilidad del mortero, lo cual afecta la resistencia a compresión y flexión de las mezclas [17].

En el estudio de [18] se investiga la incorporación de microcápsulas de PCM en morteros reforzados con fibras de polipropileno, los resultados muestran que la adición de PCM reduce la conductividad térmica del material, mejorando su capacidad de aislamiento. Sin embargo, este beneficio térmico genera una reducción en la densidad y por lo tanto en la resistencia a compresión del material.

Del mismo modo, se ha comprobado que la adición de fibras en morteros de base cemento mejora su resistencia a la flexión. En estudios experimentales [12] los morteros reforzados con fibras de basalto presentaron mayores valores de resistencia a la flexión en comparación con morteros sin fibras y con fibras de polipropileno, especialmente cuando la relación agua/cemento fue de 0.5.

Por otro lado, en [4] se evaluó el uso de aditivos plastificantes en morteros de cemento convencionales, y se encontró que con una dosificación del 1.5% de plastificante - acelerante se logra un aumento del 15.8% en la resistencia a la compresión, en comparación con mezclas sin aditivos. Del mismo modo, en un estudio donde se investigó la influencia de la arena en la resistencia mecánica del mortero se demostró que la relación agua/cemento es un factor que modifica su

rendimiento estructural, lo que puede ser un punto de partida para ajustar las proporciones de PCM y aditivos plastificantes en futuras investigaciones [19].

La incorporación de aditivos plastificantes en morteros base cemento Portland es una estrategia conveniente para mejorar sus propiedades mecánicas, particularmente en términos de resistencia a la flexión. Estudios han evidenciado que el aumento en la dosificación de plastificantes no solo favorece la trabajabilidad de la mezcla, sino que también incrementa significativamente la resistencia del material. En particular, la combinación de una reducción del contenido de agua en 10% con una dosificación de 0.7% de aditivo plastificante ha resultado en mejoras de hasta un 35.25% en la resistencia a la compresión [20].

Resultados obtenidos en el estudio de [21] sobre el uso de aditivos plastificantes en el concreto, demuestran su eficiencia para la mejora de las propiedades mecánicas del concreto. El uso de aditivos como Sikament-290N y SikaPlast®-326 contribuyen a la mejora de la resistencia a la flexión, se destaca un incremento en el módulo de ruptura del concreto de hasta 9.51%.

La incorporación de PCM en morteros ha demostrado contribuir a la regulación de la temperatura interior en edificaciones. Se ha observado que un mayor contenido de PCM genera un incremento en el gradiente térmico. En el estudio de [22] un mortero con un 20% de PCM presenta un comportamiento térmico más favorable en comparación con un mortero de referencia sin PCM (0%). En este caso, la diferencia entre las temperaturas extremas alcanzadas es de aproximadamente 5 °C en la temperatura máxima y 2 °C en la temperatura mínima.

Teniendo en cuenta que el aumento en el contenido de PCM incrementa la demanda de agua, y que esto genera la necesidad de ajustes en la dosificación de cemento para mantener las resistencias deseadas, se ha demostrado que, bajo ciertas condiciones, las microcápsulas pueden mejorar la trabajabilidad actuando como finos en la mezcla favoreciendo la trabajabilidad del mortero sin la necesidad de aditivos adicionales. Sin embargo, en mezclas sin aditivos, la trabajabilidad se ve

reducida, particularmente cuando la arena empleada tiene un bajo contenido de finos, por lo que es importante tener en cuenta las características de granulometría de la arena utilizada en las mezclas, ya que puede impactar en el desempeño mecánico del compuesto [23].

Se ha demostrado que con la combinación adecuada de aditivos y proporciones de PCM en un mortero es posible lograr un equilibrio entre rendimiento térmico y resistencia mecánica al establecer proporciones específicas de los componentes de la mezcla, estableciendo así parámetros factibles para su aplicación en la construcción [24].

Por otro lado, las microesferas de vidrio han sido estudiadas por su composición y su comportamiento mecánico y químico. Estos elementos, son partículas de vidrio de pared delgada con un tamaño semejante al polvo, sus características que más resaltan son su dimensión, que es un diámetro pequeño, su reducida densidad y su buena capacidad de resistir fuerzas de compresión y cortantes [25].

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En la presente investigación se involucran objetos de estudio y conceptos que se definen a continuación con el fin de delimitar cada uno y conocer sus características y aplicaciones.

3.1 MICROESFERAS DE VIDRIO

Las microesferas de vidrio (HGM, por sus siglas en inglés de “Hollow glass microspheres”) son partículas esféricas huecas de tamaño micrométrico, elaboradas a partir de vidrio de borosilicato o soda-cálcico, cuya estructura interna contiene aire o gas, lo que les hace tener una densidad considerablemente menor en comparación con otros agregados sólidos. Debido a su forma esférica y su naturaleza inorgánica, estas partículas se emplean como aditivos ligeros en diversas aplicaciones industriales, incluyendo pinturas, plásticos, materiales compuestos y productos de la construcción [26].

En el campo de los materiales cementicios, las microesferas de vidrio se utilizan como agregado liviano no estructural, ya que permiten reducir la densidad del mortero o concreto, mejorando así su eficiencia térmica sin comprometer la trabajabilidad de la mezcla. Su baja conductividad térmica las hace útiles en sistemas constructivos donde se busca aislamiento térmico pasivo, mientras que su estructura cerrada y no porosa les permite conservar su integridad durante el proceso de mezclado si se aplican correctamente.

Otra ventaja de las microesferas de vidrio es su compatibilidad química con matrices cementicias, ya que presentan una superficie químicamente estable con bajo nivel de alcalinidad, lo cual favorece su integración sin afectar los procesos de hidratación del cemento. Además, al tratarse de un material inorgánico y no inflamable, no representan un riesgo significativo desde el punto de vista de la seguridad industrial, siendo únicamente necesario tomar precauciones frente a la exposición al polvo durante su manipulación [27].

Su incorporación en morteros permite no solo una disminución del peso volumétrico del material final, sino también un aumento en su capacidad de aislamiento térmico, lo que resulta de gran interés para el desarrollo de soluciones constructivas más eficientes desde el punto de vista energético.

3.2 MORTERO

El mortero es una mezcla de agua, aglomerantes inorgánicos, ya sea cal, yeso o cemento, y un material de relleno, generalmente arena. Las propiedades de la mezcla pueden ser modificadas agregando aditivos a la mezcla. Generalmente se emplea como material de revestimiento exterior y/o interior sobre diferentes superficies [4].

Los tipos de morteros se pueden clasificar en dos grupos: según el material que lo constituye y según su endurecimiento. A partir del material que lo constituye se encuentra el mortero de cemento, estos están constituidos por agua y por cemento Portland, sus propiedades de manejabilidad varían según la proporción de sus materiales. Si se requiere un mortero de cemento con resistencias altas, la mezcla debe presentar un contenido alto de cemento en relación con el agua y la arena. Por otro lado, si lo que se requiere es un mortero con manejabilidad alta, pero resistencias bajas se debe usar una mayor cantidad de arena [4].

3.3 ADITIVOS

Los aditivos para concretos y morteros son componentes químicos que se adicionan al concreto en la etapa de mezclado para modificar algunas de sus propiedades. Al ser el concreto uno de los materiales más usados en la construcción, es necesario controlar su comportamiento en la obra. En México los procedimientos que se siguen para su elaboración están definidos a partir de los procedimientos del Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés). Con estas recomendaciones se diseñan concretos con resistencias específicas o con ciertas características especiales que se alcanzan empleando aditivos. Para el uso de estos

es importante analizar sus características y las de la obra en la que se va a emplear, así como las necesidades requeridas para el diseño [28].

Actualmente se han desarrollado diversos aditivos utilizados para modificar distintas propiedades del concreto. Entre los que más se utilizan se destacan los plastificantes y superplastificantes, que son caracterizados porque mejoran la trabajabilidad y reducen el contenido de agua en la mezcla, facilitando su colocación y aumentando la resistencia del concreto. Otro tipo de aditivos son los inclusores de aire, los cuales introducen pequeñas burbujas de aire en la mezcla, con el objetivo de mejorar la durabilidad del concreto frente a ciclos de congelación y deshielo. Por otro lado, existen los aceleradores y retardadores, que modifican la velocidad de fraguado para modificar su trabajabilidad principalmente en ciertas condiciones de temperatura [29]. En la Tabla 2 se describen de manera general algunos de los tipos de aditivos más utilizados en la construcción con concreto, la cual permite conocer la manera en la que se pueden modificar las propiedades del concreto.

Tabla 2. Tipos de aditivos para mortero. Fuente: C. A. Méndez.

Tipo de aditivo	Efecto generado
Incorporadores de aire (ASTM C 260).	Mejora durabilidad en ciclos hielo-deshielo, ambientes alcalinos y con presencia de sulfatos.
Retardantes/reductores de agua (ASTM C 494, tipos B y D).	Reducción del contenido de agua mínimo en 5% y retardo de fraguado controlado (concretos masivos-concretos con transporte).
Superplastificantes (reductores de agua de alto rango ASTM C 494, tipos F y G).	Incrementan la fluidez/asesamiento del concreto y reducen la relación a/c mínimo en un 12%.
Aditivos inhibidores de corrosión base nitrito de calcio	Efectividad en la reducción de reacciones de corrosión debidas a ambientes con presencia de cloruros.

(ASTM C 1582).	
Aditivos reductores de permeabilidad (ASTM C 1240).	Permiten densificar y/o reducir la permeabilidad en el concreto.
Microfibras y macrofibras sintéticas estructurales (ASTM C 1116, tipo III).	Diseñadas para aumentar la tenacidad y resistencia al impacto y reducir el fisuramiento por contracción plástica hasta en 88%.

Los aditivos plastificantes, que también se conocen como reductores de agua, son sustancias químicas que se agregan generalmente al concreto para mejorar su trabajabilidad y reducir la cantidad de agua necesaria para lograr una mezcla con las propiedades de resistencia estructural necesarias. Los plastificantes están compuestos por varios tipos de productos químicos, incluyendo derivados de lignosulfonatos, melaminas y naftalenos sulfonados. Estos componentes actúan sobre las partículas de cemento, cubriendolas y creando un efecto de dispersión que reduce la viscosidad de la mezcla. Al implementar aditivos plastificantes en mezclas de cemento es posible reducir la cantidad de agua necesaria en la mezcla en un rango del 5% al 12%, lo cual genera una mejora en la resistencia final del concreto, así como una mejora de la trabajabilidad [19].

3.4 AGUA

El agua es el material que se encarga de la hidratación del cemento y una vez que se agrega a la mezcla contribuye a la trabajabilidad. El agua ocupa cerca del 15% al 20% del volumen total de una mezcla de concreto y su inclusión incide directamente en el desarrollo de resistencias iniciales y finales. El agua tiene dos funciones principales en el concreto: aproximadamente el 5% del agua adicionada se encarga de la hidratación de la partícula de cemento y el 15% restante funciona para que la mezcla de concreto sea más trabajable. Parte de esta última porción de agua puede ser remplazada por aditivos reductores de agua, proporcionando mezclas más resistentes y durables [28].

3.5 AGREGADOS

Los agregados son materiales adicionados a la pasta de cemento-agua para dar volumen al concreto o cemento. Estos ocupan entre el 60% y el 80% aproximadamente del volumen de la mezcla y contribuyen significativamente con la calidad del producto final. Si solo se utiliza agregado fino (arena), una gran cantidad de pasta de cemento-agua se necesitará para cubrir y pegar las partículas. El concreto elaborado solo con agregado fino es llamado mortero, a diferencia de cuando se tiene agregado fino y grueso (arena y grava) el cual es llamado concreto. Tanto el agregado fino como el agregado grueso deben estar apropiadamente gradados (con distribución de granos de todos los tamaños), debido a que demasiado material fino o demasiado material grueso afecta la demanda de agua y causa problemas de manejabilidad [28].

3.6 RELACIÓN AGUA/CEMENTO

La relación que existe entre la cantidad de agua y la cantidad de cemento utilizado en una mezcla para la elaboración de morteros es un factor importante para determinar el comportamiento de las propiedades en estado endurecido y fresco; diversas investigaciones muestran que entre más cantidad de agua haya sobre la cantidad de cemento y agregados afectará directamente la calidad de la mezcla, ya que se presenta una perdida en la resistencia a la compresión, y por lo tanto, una pérdida en la durabilidad. Esto se debe al aumento de propiedades como lo son la porosidad y la permeabilidad, en donde hay una mayor numero de espacios entre partículas que son ocasionados por el agua libre, lo cual se puede apreciar en la Figura 1 [12].

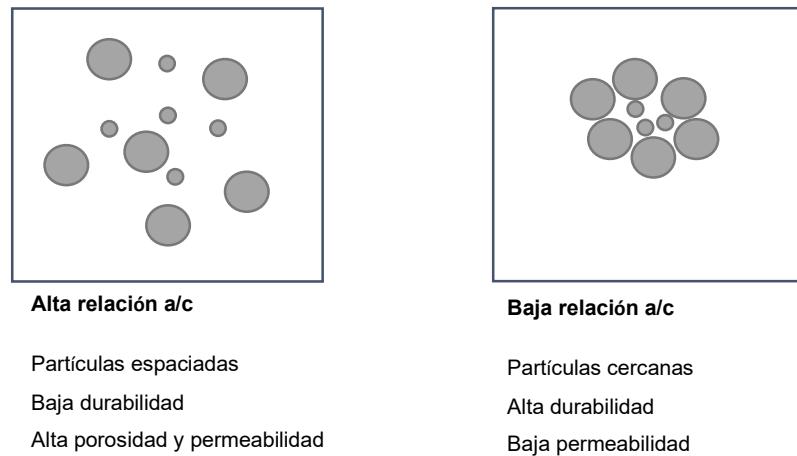


Figura 1. Esquema representativo de la relación agua/cemento. Elaboración propia.

3.7 MÓDULO A LA RUPTURA

El módulo a la ruptura es una medida de la resistencia de un material a fuerzas de flexión antes de fracturarse. Esta propiedad es importante en los morteros a base de cemento, ya que determina su capacidad para soportar cargas flexibles sin romperse. Al incorporar PCM, el mortero puede experimentar una reducción en su resistencia a flexión, por lo que en la presente investigación se plantea la adición de aditivo plastificante para aumentar el módulo a la ruptura y compensar esta pérdida.

3.8 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión es la capacidad para soportar una carga por unidad de área. En mezclas con PCM, esta propiedad tiende a disminuir. El aditivo plastificante que se plantea agregar a la mezcla en esta investigación busca compensar esta pérdida, manteniendo tanto la integridad estructural del mortero como su eficiencia térmica. Es necesario obtener valores de resistencia a la compresión de 75 Kg/cm² o superior, para que resulte en un mortero que pueda ser utilizado en la construcción.

3.9 COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica es la propiedad de los materiales de transmitir el calor. La conductividad térmica de un material se calcula a partir de un coeficiente (referido

como λ). Cuanto mayor sea la conductividad térmica de un material, mejor conductor del calor resultará, y cuanto menor sea, el material será más aislante. La temperatura, la convección, la conductividad eléctrica y los cambios de fase del material influyen en el resultado del coeficiente de conductividad térmica. El propósito de añadir un PCM es que disminuya este coeficiente, y en esta investigación se busca que se logre dicho efecto sin afectar las propiedades mecánicas antes mencionadas.

4. METODOLOGÍA

En el siguiente apartado, se describen los materiales utilizados y el procedimiento a seguir para lograr el desarrollo de la mezcla de mortero. Este proceso incluye una serie de actividades principales, que incluyen la selección y caracterización de materias primas, la dosificación de aditivo y microcápsulas, y las pruebas sobre sus propiedades y desempeño físico. También se incluye en el proceso la revisión de la literatura, ya que es necesario conocer las bases teóricas para obtener una mezcla que se encuentre dentro de los límites que establecen las normas. Para el diseño experimental se toman en cuenta las normas mexicanas (NMX) del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) y el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (IMCYC) para la preparación de las muestras, estimación de condiciones de fraguado y caracterización mecánica.

4.1 OBTENCIÓN DE MATERIALES Y AGREGADOS

Cemento Portland

El cemento que se utilizará será el CPC, el cual se muestra en la Imagen 1, ya que cumple con las especificaciones de calidad establecidas en la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE. Este tipo de cemento es adecuado para realizar mortero de cemento.



Imagen 1. Cemento Portland CPC. Imagen propia.

Agregados

Se obtienen los agregados de la mezcla, que consisten en la arena y las microesferas de vidrio, las cuales son agregadas en distintos porcentajes como se muestra en la Figura 2, con el objetivo de hacer una comparación de la eficiencia térmica y mecánica de la mezcla. Una vez obtenidos estos materiales son analizados en el laboratorio de Mecánica de Suelos para su caracterización mecánica.

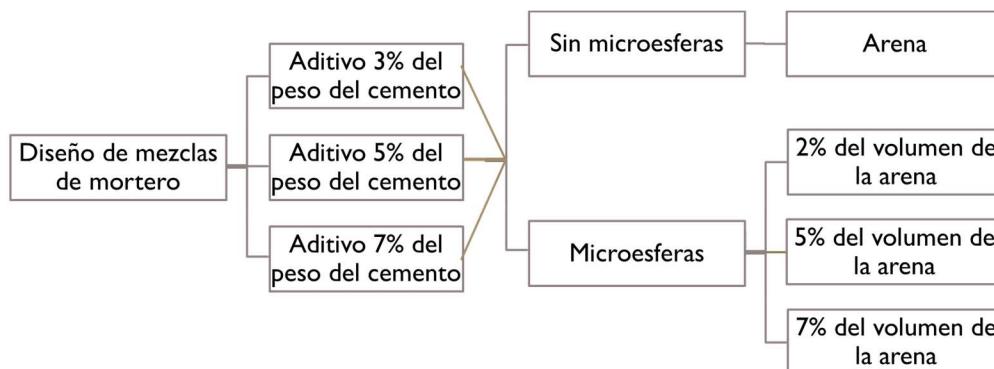


Figura 2. Diseño de mezclas. Elaboración propia.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Una vez obtenidos los materiales a utilizar se realizan las pruebas de granulometría, a través del procedimiento que marcan las normas NMX-C-179-ONNCCE-1997, ASTM C 136-01 y ASTM C117-95 obteniendo la granulometría, el porcentaje de finos y módulo de finura. Se obtienen PVSS y PVSC según las especificaciones de la norma NMX-C-077-ONNCCE-2004. Finalmente se obtiene la absorción y la densidad de los materiales según las normas NMX-C-165-ONNCCE-2004 Y ASTM C 128 respectivamente.

Caracterización de arena

Se obtuvo la arena de la mezcla en la ciudad de Querétaro, a la cual se le realizaron pruebas en base a la norma ASTM-C125, 2008 con el fin de caracterizarla y determinar sus propiedades, para así corroborar si el material es apto para la realización del trabajo de investigación presente. Las pruebas realizadas son:

- Granulometría
- Módulo de finura
- Porcentaje de absorción
- Peso volumétrico seco compacto
- Peso volumétrico seco suelto
- Densidad

Métodos

A continuación, se describe la metodología para realizar las pruebas físicas a los agregados en laboratorio aplicando las normativas mexicanas NMX y ASTM (American Society for Testing Materials). Dentro de la metodología se llegará a conclusiones sobre las propiedades mecánicas y térmicas, sus dosificaciones para las mezclas y la propia caracterización de los materiales a emplear.

Cuarteo de muestras

Acorde con la NMX-C-170-ONNCCE-1997, mediante el cuarteo de muestras es posible dividir los agregados que se utilizan para obtener porciones que sean representativas y que tengan los tamaños adecuados para los diferentes ensayos y pruebas de laboratorio que se necesiten realizar. El objetivo de esta prueba es determinar los procedimientos para reducir las muestras de agregados obtenidas en campo y se conserven representativas como la muestra de campo.

Existen diversos procedimientos para realizar el cuarteo de muestras, se elige alguno en particular de acuerdo con el tamaño de la muestra de campo, así como el peso de esta y el de la muestra requerida. Para esta investigación se utilizó un

cuarteador, el cual tiene un número par de ductos de la misma medida de ancho, que no será menor de 8 para suelos con partículas gruesas, o de doce 12 para suelos finos, los cuales descargan alternadamente a cada lado del muestreador.

Estos se consiguen comúnmente con tamaños adecuados para partículas menores de 37.5 mm (1½"). Para materiales finos, el cuarteador debe tener orificios de 13 mm (½") de ancho para muestras con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8").

El cuarteador tiene dos recipientes rectangulares, colocados uno a cada lado, para recibir las dos mitades de las muestras que pasan a través de él, como se muestra en la Imagen 2.



Imagen 2. Cuarteo mecánico para mezclas representativas. Imagen propia.

Granulometría

La granulometría del agregado fino se obtendrá en base a la norma ASTM C 33 la cual indica los requisitos con los cuales debe cumplir el material en estudio. Para realizar esta prueba se requieren de las mallas del No. 4 (4.56 mm), 10 (2.00mm), 30 (0.60mm), 40 (0. 42mm), 60 (0. 25mm), 100 (0.15mm) y 200(0.07mm), además de un horno eléctrico y de una balanza electrónica.

Según las normas ASTM C136-01 y ASTM C117-95, la granulometría se define como la obtención de tamaños y cantidades de partículas contenidas en una muestra. El objeto de esta prueba es obtener la distribución de las partículas de arena de diferentes tamaños por medio de cribas. Para dicha prueba se utilizan

mallas con distintas aberturas desde la malla No.4 hasta la No.200, como se muestran en la Imagen 3.

Se toma una muestra representativa del material, se deja saturar por 24 hrs. Posteriormente el material tiene que agitarse con una varilla y se deja reposar, esto se pasa por la malla 200 hasta que el agua que suelte el material sea lo más limpia posible.

El material se deja secando en un horno eléctrico durante 24 hrs, transcurrido ese tiempo la muestra seca se pesa y pasa por las mallas: No. 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200. Una vez concluido este proceso se puede determinar la granulometría del material.



Imagen 3. Tamices utilizados para la granulometría de las arenas según Norma ASTM C136.
Imagen propia.

Porcentaje de absorción

El porcentaje de absorción porcentaje se obtiene de acuerdo con la norma ASTM C 127. La prueba consiste en dejar secar 500 g de material por 24 h, enseguida se procede a pesar dicho material. Posteriormente se debe saturar el material, y después de transcurridas 24 h se procede a secar el material para quitarle el exceso de humedad, hasta dejarlo saturado y superficialmente seco (SSS).

Una vez obtenida la condición SSS, la muestra se pesa y se deja secar en un horno eléctrico a una temperatura constante de $105^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 h. Despues se

obtiene el porcentaje de absorción mediante la ecuación que se muestra a continuación.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Donde:

% Absorción= Porcentaje de absorción del material (%)

B = es el peso del material en estado SSS (g)

A = es el peso seco del material (g)

Peso volumétrico seco y compacto

Esta propiedad se obtendrá de acuerdo con la norma ASTM C 29. La cual menciona que se debe de usar un recipiente metálico con capacidad de 10lts (Imagen 4). La altura debe ser aproximadamente igual a su diámetro, también se usará una varilla punta de bala la cual debe ser recta y lisa con un diámetro 16 mm (5/8") y 60 cm de longitud con uno de sus extremos de forma semiesférica.

La prueba se hará tomando una muestra representativa del material, la cual se debe cuartear y llenar el recipiente de 10lts mediante tres capas aplicadas con 25 golpes cada una de estas, el recipiente se enraza para eliminar el exceso de material y se obtendrá el peso volumétrico seco y compacto mediante la siguiente ecuación.

$$M = \frac{G - T}{V}$$

Donde:

M= peso volumétrico seco y compacto (kg/m³)

G= peso del recipiente con material (kg)

T= peso del recipiente (kg)

V= volumen del recipiente (m3)



Imagen 4. Materiales para la obtención del peso volumétrico seco y compacto de arenas según la Norma ASTM C29. Imagen propia.

Densidad

La densidad se determinará de acuerdo con la norma ASTM C 128. Se necesitará de un matraz tipo Pírex, aforado, de 500 ml. de capacidad. Para medir esta propiedad, de la prueba de absorción se tomará una muestra representativa en condición SSS. Posteriormente, se le agregó agua colocando la muestra en una bomba de vacío para extraerle el aire.

Una vez extraído el aire se medirá la temperatura y se pesará el matraz con el material determinando la densidad relativa de la arena (DRA) con ayuda de la siguiente ecuación:

$$D_{RA} = \frac{Ps}{(Ps + Pa + A) - (Pm + m + A)}$$

Donde:

DRA= densidad relativa de la arena (adimensional)

Ps= peso del material seco (g)

PM= peso del matraz (g)

Caracterización de microesferas de vidrio

La caracterización de las microesferas de vidrio utilizadas en esta investigación corresponde a la información técnica proporcionada por el fabricante (3M Company), a través de su ficha técnica oficial. Esta caracterización incluye propiedades físicas, térmicas y químicas importantes para esta investigación como la densidad, tamaño promedio de partícula, resistencia a la compresión, conductividad térmica, pH, entre otras. Se toman en cuenta estos datos para ser incorporadas en mezclas cementicias, ya que influyen directamente en parámetros como la densidad del mortero, la trabajabilidad, la distribución del material y su desempeño térmico. A continuación, se presenta una tabla (Tabla 3) con las propiedades más relevantes para esta investigación de las microesferas de vidrio 3M™ K1 utilizadas en este estudio.

Tabla 3. Propiedades de microesferas K1. Fuente: 3M Company.

Propiedad	Valor
Densidad	0.125 g/cm ³
Conductividad térmica	0.047 W/m·K
Tamaño de partícula	65 µm
Resistencia a compresión	250 psi (~1.72 MPa)
pH	Entre 9.1 – 9.9
Composición	Vidrio de borosilicato sódico-cálcico

4.3 DISEÑO DE MEZCLAS

Se diseñaron doce diferentes mezclas de mortero con distintas proporciones de microesferas y aditivo plastificante, como se muestra en la Tabla 4 con el fin de encontrar una mezcla idónea para su uso en recubrimientos.

Tabla 4. Diseño de mezclas. Elaboración propia.

Mezcla	Aditivo plastificante	HGM (%) vol. De la arena
Mezcla base	0	0
Mezcla 1	0	2
Mezcla 2		4
Mezcla 3		6
Mezcla 4	3% del peso del cemento	0
Mezcla 5		2
Mezcla 6		4
Mezcla 7		6
Mezcla 8	5% del peso del cemento	0
Mezcla 9		2
Mezcla 10		4
Mezcla 11		6
Mezcla 12	7% del peso del cemento	0
Mezcla 13		2
Mezcla 14		4
Mezcla 15		6

4.4 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

Posterior al análisis de los materiales a utilizar se realizarán las mezclas con diferentes proporciones de estos, como se muestra en la Figura 3, y se harán especímenes de acuerdo con las normas correspondientes para posteriormente realizar las pruebas mecánicas y térmicas.

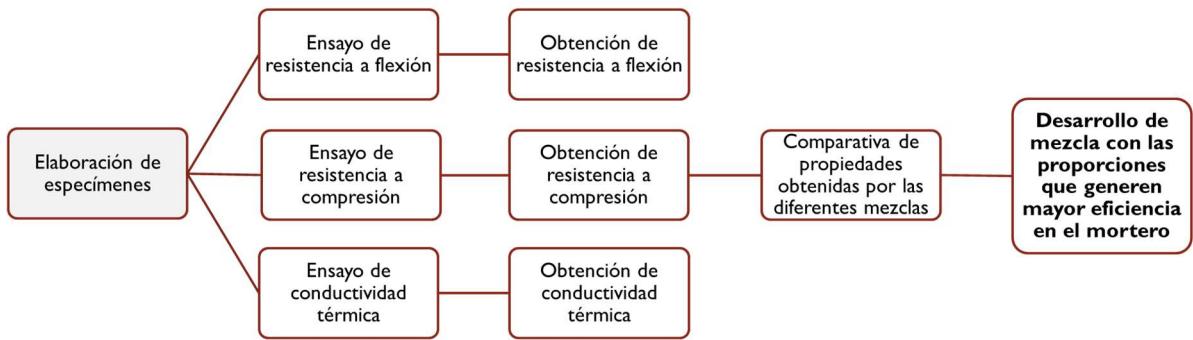


Figura 3. Proceso para desarrollo de mezcla de mortero. Elaboración propia.

Los especímenes de mortero fueron elaborados con los materiales descritos anteriormente, elaborando 13 mezclas con diferentes proporciones, realizando 3 especímenes de cada una para ser sometidos a pruebas de resistencia a compresión y de módulo de ruptura, así como 3 especímenes de cada una para someterse a pruebas de conductividad térmica.

4.5 PRUEBAS MECÁNICAS

Para la determinación de características mecánicas, se evalúa la resistencia a la compresión mediante la norma ASTM-C109 y resistencia a la flexión en base a la norma ASTM C947, realizando especímenes cúbicos y tabletas respectivamente.

Prueba de fluidez

Para la elaboración de las mezclas es necesario determinar la cantidad de agua a través de la prueba de fluidez establecida en la norma ASTM C1437-01. Para realizar dicho procedimiento se utiliza una mesa de fluidez estandarizada, sobre la cual se coloca un molde troncocónico en el centro, como se muestra en la Imagen 5.



Imagen 5. Mesa de fluidez con molde. Imagen propia.

El molde es llenado con mortero en dos capas, cada capa es compactada mediante 20 golpes con un pisón, aplicando una presión constante con el objetivo de garantizar una distribución uniforme del material. Una vez completado el llenado, la superficie es nivelada al ras del borde. Después de esto se deja un minuto y se retira el molde de forma vertical, permitiendo que el mortero mantenga su forma inicial. Inmediatamente después, la mesa se deja caer 25 veces en un lapso de 15 segundos, posteriormente se mide la expansión del mortero, como se muestra en la Imagen 6, con un vernier sobre cuatro líneas trazadas en la superficie de la mesa con la precisión de un milímetro.



Imagen 6. Expansión de mortero sobre mesa de fluidez. Imagen propia.

El resultado de fluidez es expresado como el incremento porcentual del diámetro promedio del mortero respecto al diámetro original del molde. Se calcula de acuerdo con la ecuación que se muestra a continuación:

$$\% \text{ de fluidez} = \frac{\text{Diámetro promedio final} - \text{Diámetro inicial}}{\text{Diámetro inicial}} \times 100$$

La norma en la cual está basada esta prueba indica que se tener una fluidez de 110 +/- 5% de acuerdo con el diámetro del molde de fluidez.

El presente mortero tiene como finalidad servir como recubrimiento por lo cual se debe de tener una fluidez correcta para su trabajabilidad.

Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión es determinada siguiendo la metodología de la norma ASTM C109/C109M, en la cual se describe la caracterización mecánica de morteros hidráulicos mediante especímenes cúbicos de 50 mm de lado. Las mezclas realizadas en este proyecto son de mortero en proporción 1:3 y deben ser elaboradas verificando la fluidez de la mezcla de acuerdo con la norma ASTM C1437, a fin de asegurar una trabajabilidad adecuada para su moldeo.

Una vez obtenidas las mezclas, se procede al llenado de moldes cúbicos en dos capas iguales. Cada capa debe ser compactada con 32 golpes, distribuidos en cuatro rondas de ocho golpes, aplicados en direcciones perpendiculares con ayuda de un pisón estandarizado. Es importante que al completar el llenado la superficie de los cubos sea nivelada al ras del molde para asegurar la uniformidad geométrica de los especímenes. Los moldes son colocados inmediatamente en una cámara húmeda y conservados durante un período de 24 horas. Posteriormente, las probetas deben ser desmoldadas y sumergidas en agua saturada con hidróxido de calcio hasta el momento del ensayo.

El procedimiento de ensayo consiste en colocar los especímenes en una prensa hidráulica, de modo que las caras en contacto con las placas de carga sean las mismas que estuvieron en contacto con el molde durante el fraguado. La carga debe ser aplicada de forma continua y sin impactos, a una velocidad controlada que oscila entre 900 y 1800 N/s, hasta producir la falla. La resistencia a compresión es calculada como el cociente entre la carga máxima aplicada y el área de la cara cargada del cubo (2500 mm²), como se expresa en la ecuación que se muestra a continuación, reportando los resultados en kg/cm².

$$F_c = P/A$$

Donde:

F_c = resistencia a la compresión (MPa)

P= carga máxima (N)

A= área de la superficie cargada (mm²)

Módulo a la ruptura

La evaluación del comportamiento a flexión de los morteros es realizada conforme a la norma ASTM C947. Esta metodología permite determinar tanto la resistencia a la flexión mediante la aplicación de una carga distribuida en tercio de tramo en especímenes prismáticos de 35cm de largo, 5cm de ancho y 2cm de espesor. Previo a su ensayo, las probetas deben estar acondicionadas en agua a una temperatura de 23 ± 3 °C con el fin de garantizar su completa saturación. Las muestras se deben mantener húmedas hasta el momento del ensayo.

Durante el ensayo, cada espécimen se coloca sobre un sistema de apoyo con configuración de carga a tercio de luz, asegurando que las superficies de contacto sean paralelas y simétricas. Se utiliza una máquina de ensayo universal equipada con un sistema de aplicación de carga con una alineación adecuada de los ejes que permite el registro de la carga y la deflexión. La carga es aplicada a una velocidad

constante entre 1.27 y 5.1 mm/min hasta alcanzar la fractura del espécimen. Se registran los valores correspondientes a la carga máxima soportada antes de la ruptura.

Para el cálculo de la resistencia a flexión se toma la ecuación establecida por la norma, la cual se muestra a continuación, esta considera el claro entre apoyos, el ancho y la profundidad del espécimen. Estos resultados permiten caracterizar el desempeño estructural del mortero en cuanto a su capacidad de carga en flexión.

$$F_y = 3P_y L / 2bd^2$$

Donde:

Fy= resistencia a la flexión

Py= carga última (N)

L= claro mayor (mm)

b= ancho del espécimen (mm)

d= espesor del espécimen (mm)

4.6 PRUEBAS TÉRMICAS

La determinación de características térmicas se realiza a través de especímenes que son ensayados por medio de una cámara termográfica. Para este procedimiento se utilizan especímenes de las distintas mezclas con un tamaño de 30 cm de largo, 30 de ancho y 5cm de alto. Con la cámara se registra el calor de cada espécimen y a través de su comparación se determina la mezcla más eficiente en cuanto a esta propiedad. La cámara utilizada para estas pruebas consiste en una cámara infrarroja Fluke Ti125.

4.7 CONDICIONES ÉTICAS Y DE SEGURIDAD

En la presente investigación se realizarán distintas pruebas de laboratorio, las cuales serán ejecutadas en base a los reglamentos de los laboratorios correspondientes, por lo que no representan riesgo para a ningún ser vivo.

Para los ensayos de caracterización mecánica y pruebas de materiales en laboratorios se involucra la utilización de máquinas en el laboratorio de geotecnia de la Universidad Autónoma de Querétaro, por lo que se atendieron las medidas de seguridad pertinentes, así como las indicaciones necesarias para cada prueba. Estos se realizaron bajo supervisión del personal responsable de cada laboratorio.

Medidas de seguridad para laboratorio de geotecnia:

- Uso de bata y de zapatos de seguridad, así como vestimenta apropiada.
- Se utiliza el equipo de laboratorio conforme a las normas y a las indicaciones del personal de dicho laboratorio.
- Las muestras realizadas se almacenarán en lugares seguros sin que afecten a otros usuarios.
- Para el uso de máquinas se debe notificar a la coordinación para calendarizar su uso y recibir las indicaciones para el buen uso de estas, o en su caso, pedir a los laboratoristas ayuda para realizar las pruebas necesarias en las máquinas que se requieran.
- Los residuos generados se llevarán al área indicada por la coordinación del laboratorio.

En cuanto a materiales, se utilizan materiales comunes de construcción (cemento, arena y agua) y aditivo plastificante, de los cuales se hizo uso responsable respetando las indicaciones del fabricante, por lo que no representaron daño a los usuarios. Así mismo, el empleo de las microesferas de vidrio fue aplicado en proporciones menores respecto a los materiales antes mencionados, y fueron manejadas con responsabilidad atendiendo a las especificaciones del fabricante, por lo que no representó riesgo para su manejo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realiza la recolección de datos para comparar y analizar los resultados obtenidos previamente de las distintas pruebas, con el fin de obtener una mezcla de mortero que sea factible para su uso como recubrimiento.

5.1 RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DE ARENA

Granulometría

Es importante obtener una arena limpia adecuada para su uso en un mortero, con la granulometría apropiada de las partículas. Para esta prueba de laboratorio se usó una muestra representativa de 1.08 kg de arena, en la Imagen 7 se muestra parte del proceso de esta prueba utilizando las mallas correspondientes.



Imagen 7. Arena retenida en prueba de granulometría. Imagen propia.

Los resultados de la prueba de granulometría de la arena utilizada se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Granulometría de arena. Elaboración propia.

Malla (#)	Tamaño (mm)	Porcentaje que pasa la malla (%)
Malla #4	4.56	92.77
Malla #10	2.00	77.59
Malla #30	0.595	52.42
Malla #40	0.42	50.97
Malla #60	0.25	28.56
Malla #100	0.149	18.28
Malla #200	0.074	5.35

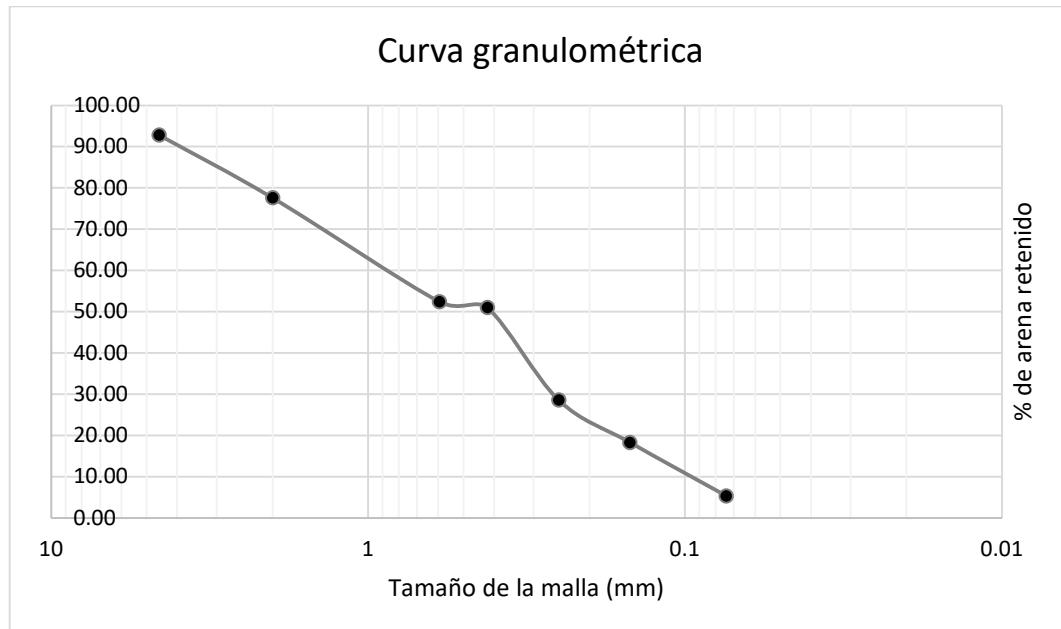


Figura 4. Curva granulométrica de arena. Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 4, la arena está dentro de los límites. por lo que se puede observar se cuenta con una arena fina, lo óptimo para su uso en el mortero.

Módulo de finura

El módulo de finura es la suma de los porcentajes retenidos acumulados a partir de la malla No. 4 hasta la malla No. 100.

El módulo de finura de la arena debe de estar entre un rango de 2.30 y 3.10 según NMX-C-111-ONCCE-2004. Durante el proceso de caracterización de la arena se obtuvo un valor de 2.79 como módulo de finura, como se muestra en la Tabla 6, lo cual indica que la arena es óptima para ser utilizada para la etapa experimental.

Tabla 6. Resultados de módulo de finura. Elaboración propia.

Malla	Retenido acumulado (%):
Malla #4	7.23
Malla #10	22.41
Malla #30	47.58
Malla #40	49.03
Malla #60	71.44
Malla #10	81.72
Total:	279.41
Total (%)	2.79

Peso volumétrico seco suelto y compacto

Según la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004, el peso volumétrico seco compacto se define como la cantidad en peso de un material compactado por metro cúbico, dicha prueba se realiza para encontrar el peso volumétrico seco compacto de la arena, utilizando un recipiente metálico con peso y volumen conocido.

Para esta prueba se toma una muestra de agregado de acuerdo con el método de cuarteo, el recipiente se llena hasta un tercio de su volumen y la superficie se nivela, posteriormente se compacta con una varilla punta de bala dándole 25 golpes distribuidos uniformemente sobre la superficie. Posteriormente se agrega material a las dos terceras parte de su volumen y se compacta con 25 golpes y después hasta llenar el recipiente, se enrasa de manera horizontal con una regla metálica

Esta prueba se repitió 2 veces, midiendo los valores 3 veces en cada una de estas repeticiones, la primera (Imagen 8) fue con un llenado directo del recipiente y la segunda fue por tres capas, como se describió anteriormente.



Imagen 8. Prueba de peso volumétrico de arena. Imagen propia.

Una vez hecha la prueba se calcula la masa neta del material contenida en el recipiente, este se divide entre el volumen conocido del recipiente, obteniendo así el peso volumétrico seco compacto de la muestra (Kg/m³). Los resultados de la prueba de peso volumétrico se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de peso volumétrico seco suelto y compacto. Elaboración propia.

Arena (llenado directo) PVSS			Arena (llenado por capas) PVSC		
Volumen del recipiente:			5.0894 l		
Peso del recipiente:			1.64 kg		
Prueba 1:	7.47	kg	Prueba 1:	7.75	kg
Prueba 2:	7.47	kg	Prueba 2:	7.78	kg
Prueba 3:	7.46	kg	Prueba 3:	7.71	kg
Promedio:	7.47	kg	Promedio:	7.75	kg

$$PVSS = 1,467.10 \text{ kg/cm}^3$$

$$PVSC = 1,522.12 \text{ kg/cm}^3$$

Para obtener el PVSS se utilizó la siguiente fórmula:

$$PVSS = \frac{Pm}{Vr} \times 1000$$

Donde:

PVSS = Peso volumétrico seco suelto (Kg/m³)

Pm = Peso promedio del material contenido en el recipiente (Kg)

Vr = Volumen del recipiente (lt)

$$PVSS = \frac{7.47}{5.089} \times 1000 = 1,467.10 \text{ kg/m}^3$$

$$PVSC = \frac{7.75}{5.089} \times 1000 = 1,522.12 \text{ kg/m}^3$$

5.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión realizados sobre las mezclas de mortero elaboradas con diferentes proporciones de microesferas y aditivo plastificante.

Como se muestra en la Imagen 9 se realizaron distintas mezclas en el laboratorio procurando que tuvieran la fluidez correcta a través de la prueba de fluidez, como se muestra en la Imagen 10 y la Imagen 11, la cual se controló para que tuvieran un valor de $110 \pm 5\%$.



Imagen 9. Mezcla de mortero. Imagen propia.



Imagen 10. Preparación de mezcla de mortero en prueba de fluidez. Imagen propia.



Imagen 11. Mezcla de mortero en prueba de fluidez. Imagen propia.

Una vez que se obtuvieron las mezclas con la dosificación y la fluidez necesaria se procedió a realizar los especímenes en moldes de metal, como se muestra en la Imagen 12, y se dejaron fraguar por 24 h. Una vez transcurrido este tiempo se desmoldaron, como se muestra en la Imagen 13 y la Imagen 14, y enseguida se colocaron en una tina con agua para su proceso de curado, como se muestra en la Imagen 15.



Imagen 12. Especímenes en moldes para pruebas de compresión. Imagen propia.



Imagen 13. Especímenes para pruebas de compresión. Imagen propia.



Imagen 14. Especímenes para pruebas de compresión. Imagen propia.



Imagen 15. Especímenes para pruebas de compresión en su proceso de curado. Imagen propia.

Se dejaron los especímenes en su proceso de curado durante 7 - 30 días hasta su día de ensayo, como se especifica en la Tabla 8.

Tabla 8. Edad de ensayo de especímenes para pruebas de compresión. Elaboración propia.

Especímenes para ensayos de compresión			
Nomenclatura	Aditivo plastificante (%) peso del cemento	Microesferas de vidrio (%) vol. de la arena	Edad de ensayo (días)
C-A0M0	0	0	30
C-A0M2		2	29
C-A0M4	0	4	29
C-A0M6		6	27
C-A3M0		0	30
C-A3M2	3% del peso del cemento	2	14
C-A3M4		4	16
C-A3M6		6	14
C-A5M0	5% del peso del cemento	0	30
C-A5M2		2	9
C-A5M4		4	9
C-A5M6		6	8
C-A7M0	7% del peso del cemento	0	30
C-A7M2		2	14
C-A7M4		4	8
C-A7M6		6	8

En el caso de los primeros especímenes se ensayaron a la edad de 30 días, una vez transcurrido este tiempo se procedió a hacer la prueba de resistencia a la compresión en la máquina universal, como se muestra en la Imagen 16, hasta llegar al esfuerzo máximo y posteriormente su fractura, como se ve en la Imagen 17.



Imagen 16. Prueba de compresión a primeros especímenes de mortero. Imagen propia.



Imagen 17. Espécimen sometido a prueba de compresión. Imagen propia.

Se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión a todos los especímenes aplicando la carga hasta llegar a la ruptura, los resultados se muestran en la Tabla 9. En esta tabla se especifican las cargas máximas que resistió cada espécimen, así como la edad de ensayo y la carga máxima estimada a la que podrían llegar las muestras utilizando un factor, con el propósito de poder comparar las mezclas y seleccionar las de mayor resistencia.

Tabla 9. Resistencias de ensayos a compresión. Elaboración propia.

Resistencias de especímenes de ensayos de compresión					
Nomenclatura	No. espécimen	Edad de ensayo (días)	Carga máx. [N]	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia aproximada a 28 días
C-A0M0-1	1	30	30,360.0000	123.83	123.83
C-A0M0-2	2	30	38,390.0000	156.59	156.59
C-A0M0-3	3	30	36,610.0000	149.33	149.33
C-A0M2-1	1	29	18,610.9000	75.91	75.91
C-A0M2-2	2	29	20,084.4000	81.92	81.92
C-A0M2-3	3	29	20,642.2000	84.20	84.20
C-A0M4-1	1	29	9,725.0000	39.67	39.67
C-A0M4-2	2	29	10,881.3000	44.38	44.38
C-A0M4-3	3	29	11,198.4000	45.68	45.68
C-A0M6-1	1	27	4,800.0000	19.58	19.97
C-A0M6-2	2	27	4,634.3800	18.90	19.28
C-A0M6-3	3	27	5,365.6300	21.89	22.32
C-A3M0-1	1	30	28,645.3000	116.84	116.84
C-A3M0-2	2	30	23,790.6300	97.04	97.04
C-A3M0-3	3	30	24,410.9000	99.57	99.57
C-A3M2-1	1	14	8,729.6900	35.61	40.95
C-A3M2-2	2	14	7,828.1300	31.93	36.72
C-A3M2-3	3	14	8,992.1900	36.68	42.18
C-A3M4-1	1	16	7,771.8800	31.70	36.14
C-A3M4-2	2	16	7,578.1300	30.91	35.24
C-A3M4-3	3	16	7,628.1300	31.11	35.47
C-A3M6-1	1	14	5,885.9400	24.01	27.61
C-A3M6-2	2	14	4,392.1900	17.92	20.60
C-A3M6-3	3	14	5,056.2500	20.62	23.72
C-A5M0-1	1	30	27,851.6000	113.60	113.60
C-A5M0-2	2	30	24,584.4000	100.28	100.28
C-A5M0-3	3	30	27,958.4000	114.04	114.04
C-A5M2-1	1	9	10,654.7000	43.46	53.45
C-A5M2-2	2	9	12,229.7000	49.88	61.36
C-A5M2-3	3	9	11,542.2000	47.08	57.91
C-A5M4-1	1	9	8,865.6300	36.16	44.48
C-A5M4-2	2	9	8,753.1300	35.70	43.91
C-A5M4-3	3	9	6,884.3800	28.08	34.54
C-A5M6-1	1	8	3,060.9400	12.49	15.48
C-A5M6-2	2	8	2,446.8800	9.98	12.38

C-A5M6-3	3	8	2,792.1900	11.39	14.12
C-A7M0-1	1	30	29,584.4000	120.67	120.67
C-A7M0-2	2	30	28,978.6000	118.20	118.20
C-A7M0-3	3	30	29,978.6000	122.28	122.28
C-A7M2-1	1	14	12,846.9000	52.40	60.26
C-A7M2-2	2	14	11,309.4000	46.13	53.05
C-A7M2-3	3	14	12,310.9000	50.21	57.75
C-A7M4-1	1	8	4,054.6900	16.54	20.51
C-A7M4-2	2	8	1,484.3800	6.05	7.51
C-A7M4-3	3	8	3,445.3100	14.05	17.43
C-A7M6-1	1	8	2,601.5600	10.61	13.16
C-A7M6-2	2	8	1,325.0000	5.40	6.70
C-A7M6-3	3	8	964.0630	3.93	4.88

A partir de los datos obtenidos se realizó una gráfica (Figura 5) a partir de la resistencia promedio de cada mezcla para comparar el desempeño de cada una y poder seleccionar las que alcanzaron una mayor resistencia.

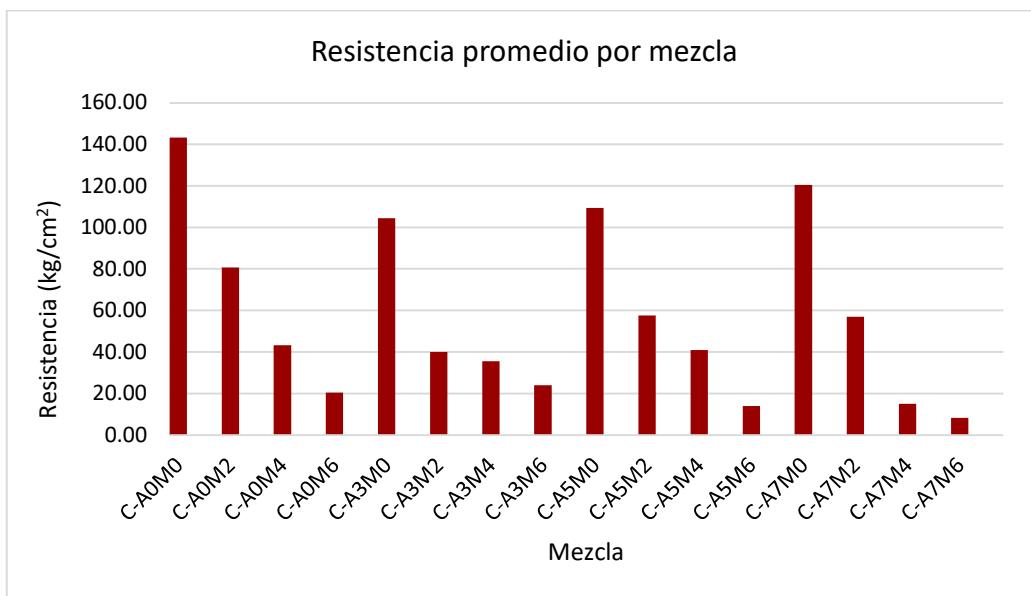


Figura 5. Resistencia a la compresión promedio por mezcla. Elaboración propia.

Se realizó un análisis por grupos a partir del porcentaje de aditivo y de microesferas con el fin de establecer una relación de los resultados con cada material. En la

Figura 6 se observan las mezclas con los diferentes porcentajes de aditivo sin microesferas y la resistencia a la compresión que alcanzan en promedio. En esta gráfica se observa el aumento de resistencia a la compresión a medida que aumenta el aditivo, sin embargo, ninguna de las 3 mezclas realizadas llega a la resistencia de la mezcla sin aditivo, es decir, la del mortero convencional.

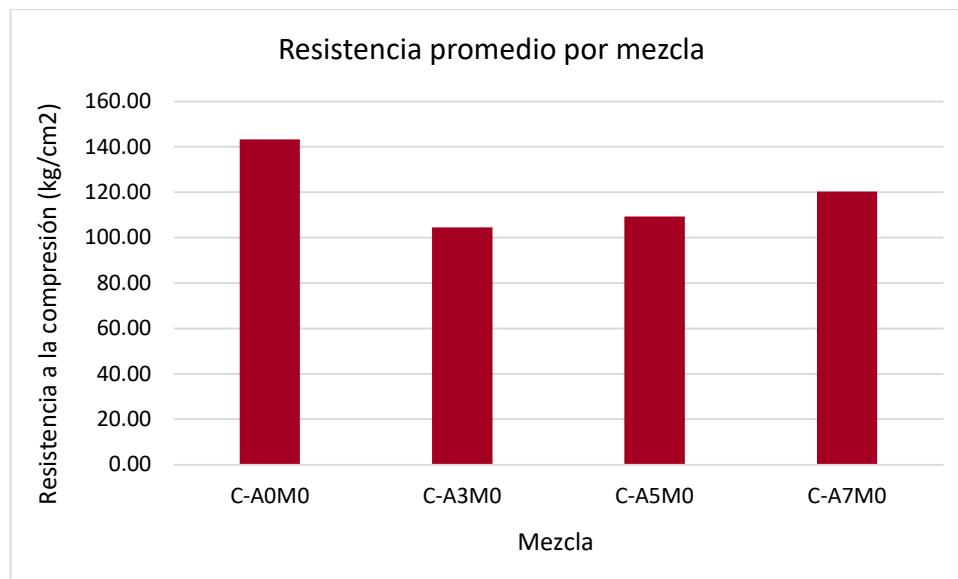


Figura 6. Resistencia a la compresión de mezclas sin microesferas. Elaboración propia.

Posteriormente, se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión de las mezclas con microesferas y sin aditivo. Se compararon las mezclas con 0%, 2% y 4% de microesferas. Como se observa en la Figura 7. Se pudo observar que al añadir mayor porcentaje de microesferas de vidrio la resistencia a la compresión va disminuyendo considerablemente. Se observa que al añadir hasta 6% de microesferas la resistencia se reduce en más del 50%.

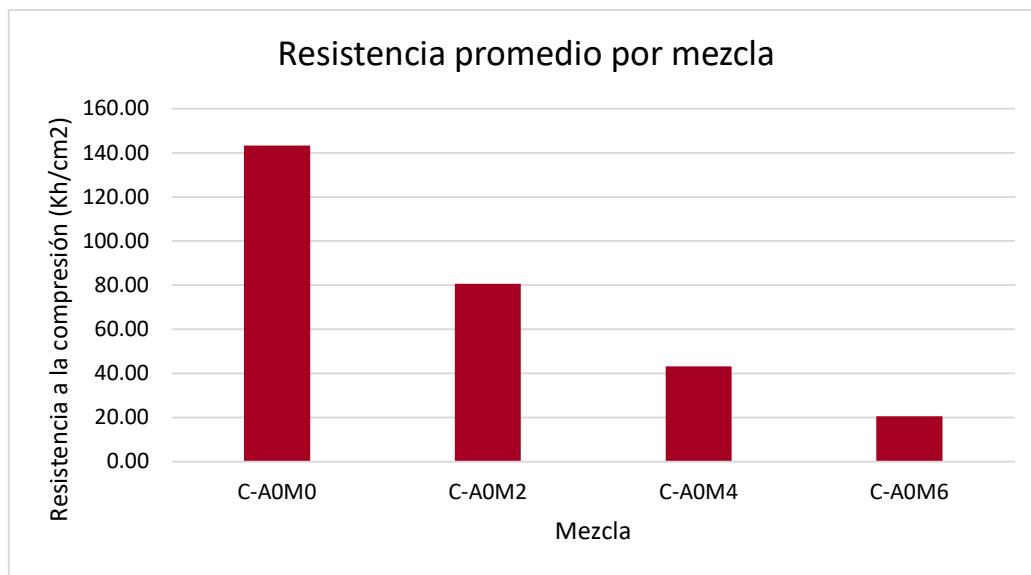


Figura 7. Resistencia de mezclas con microesferas y sin aditivo. Elaboración propia.

Al analizar las gráficas por grupos y la gráfica general de la resistencia a compresión de las mezclas se eligieron las mezclas con mejor resistencia y considerable adición de microesferas para posteriormente hacerles la prueba de transferencia térmica.

Las mezclas elegidas a partir de estos ensayos son “A0M0”, “A0M2”, “A0M4”, “A5M2” y “A7M2”, estas se evaluaron a través de pruebas de transferencia térmica para poder determinar la factibilidad de su uso en la construcción de muros.

A partir del análisis de las gráficas de resistencia a la compresión se observa que la mezcla de referencia (C-A0M0), es decir, sin adición de aditivo plastificante ni microesferas de vidrio, presentó la mayor resistencia. En segundo lugar, se encuentran las mezclas con 7% de aditivo plastificante, pero sin microesferas (C-A7M0), las cuales también arrojaron altos valores de resistencia. Este comportamiento sugiere que la incorporación de aditivo plastificante en una proporción adecuada puede beneficiar la trabajabilidad de la mezcla sin comprometer su resistencia mecánica.

Por otro lado, se observa una disminución en la resistencia a medida que se incrementa la cantidad de microesferas de vidrio en la mezcla independientemente de si tiene aditivo o no. Este comportamiento puede atribuirse a la resistencia mecánica propia de las microesferas y a la posible generación de zonas débiles en la matriz cementicia, lo cual afecta el desempeño bajo carga de la mezcla.

Estos resultados muestran que el uso de aditivo plastificante puede ser favorable hasta cierto punto, sin embargo, la incorporación de microesferas debe evaluarse cuidadosamente, ya que un alto contenido de estas compromete la resistencia del material.

5.2.1 GRÁFICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN DE PRUEBAS DE COMPRESIÓN

Con el objetivo de complementar el análisis mecánico a compresión de las mezclas seleccionadas, se realizaron curvas esfuerzo-deformación con los datos arrojados de los ensayos. Estas curvas permiten observar la resistencia máxima alcanzada por cada mezcla, y del mismo modo, su comportamiento frente a la carga, incluyendo aspectos como el módulo elástico, la ductilidad y la forma en que ocurre la falla. A partir de estas curvas fue posible obtener valores como la resistencia promedio, el acortamiento, el acortamiento a la ruptura y el módulo elástico, las cuales fueron organizadas en tablas que más adelante se muestran, para observar dichos parámetros que sirven para caracterizar el desempeño estructural del mortero estudiado en esta investigación.

Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas muestran algunas diferencias entre sí en su comportamiento, demostrando el efecto combinado del contenido de aditivo plastificante y de microesferas de vidrio (HGM). Como se muestra en la Figura 8, la mezcla A0M2, que no contiene aditivo y tiene un 2% de HGM, presenta un comportamiento rígido con una resistencia a la compresión promedio de 80.641 kg/cm². Su curva muestra un tramo elástico seguido de una ruptura, con acortamiento promedio de 1.798% en el tramo elástico y 3.054% a la ruptura, como se observa en la Tabla 10. Su módulo elástico promedio es de 4388.47 kg/cm², lo que indica que no se altera en gran medida la rigidez pese a la presencia de HGM.

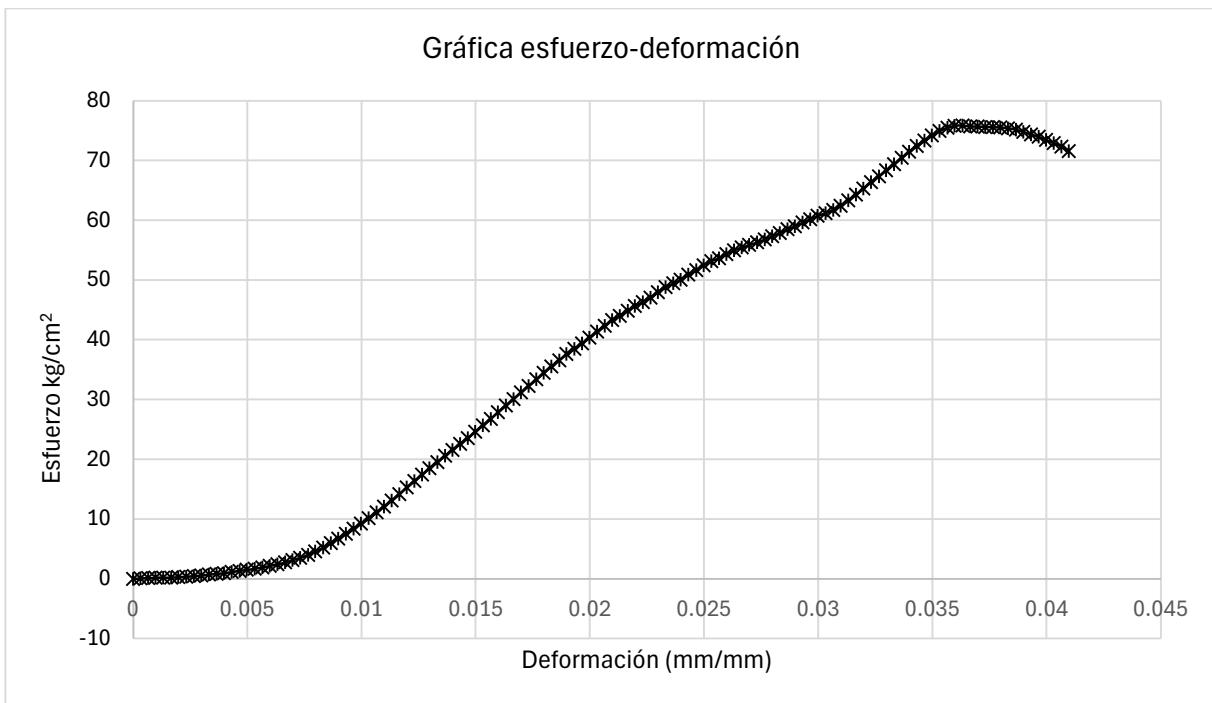


Tabla 10. Datos obtenidos de ensayo de resistencia a la compresión de mezcla A0M2. Elaboración propia.

Espécimen		Acortamiento elástico (%)	Alcortamiento a la ruptura (%)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Módulo elástico de compresión (kg/cm ²)
C-A0M2-1		2.098	3.632	75.867	3121.165
C-A0M2-2		1.864	3.232	81.884	4195.990
C-A0M2-3		1.432	2.298	84.172	5848.263
C-A0M2	μ	1.798	3.054	80.641	4388.473

Por su parte, se evaluó la gráfica de la mezcla A7M0 (Figura 9) que incorpora un 7% de aditivo y no contiene HGM, esta presenta una mayor resistencia a la compresión (120.646 kg/cm²). También presenta un acortamiento más alto tanto en el tramo elástico (3.534%) como a la ruptura (4.134%), así como un módulo elástico

más elevado, de 4650.41 kg/cm², como se muestra en la Tabla 11. Esta combinación de alta resistencia y mayor capacidad de deformación sugiere que el aditivo, en ausencia de HGM, puede mejorar el comportamiento elástico del mortero.

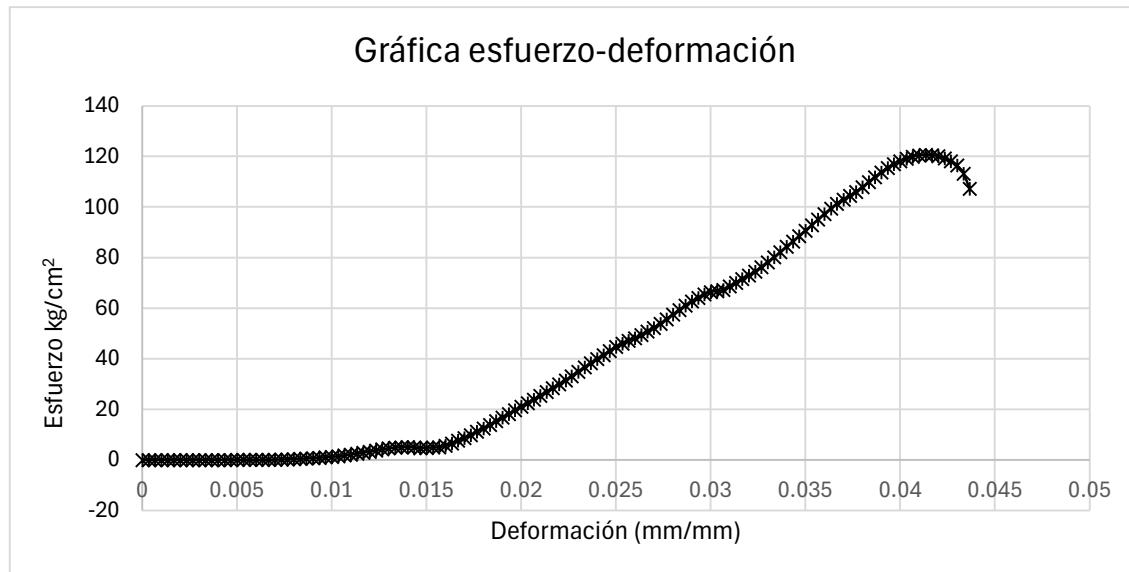


Figura 9. Gráfica esfuerzo deformación de ensayo de compresión de mezcla A7M0. Elaboración propia.

Tabla 11. Datos obtenidos de ensayo de resistencia a la compresión de mezcla A7M0. Elaboración propia.

Espécimen	Acortamiento elástico (%)	Acortamiento a la ruptura (%)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Módulo elástico de compresión (kg/cm ²)
C-A7M0	3.534	4.134	120.646	4650.410

Los resultados de este ensayo indican que la presencia de microesferas de vidrio tiende a disminuir tanto la resistencia como la rigidez del mortero, mientras que el uso del aditivo plastificante puede mejorar el comportamiento mecánico y aumentar el módulo de elasticidad, siempre que no se combine con altas proporciones de microesferas.

5.3 MÓDULO A LA RUPTURA

Para los ensayos de módulo a la ruptura se utilizaron especímenes rectangulares de 35cm de largo, 5cm de ancho y 2cm de espesor. Debido a que el laboratorio donde se está realizando la investigación no cuenta con moldes para este tipo de especímenes se fabricaron moldes de madera, los cuales se muestran en la Imagen 18.



Imagen 18. Moldes para especímenes de pruebas a flexión. Imagen propia.

Se realizaron las distintas mezclas propuestas en el diseño de mezclas y de cada una se obtuvieron 3 especímenes para este tipo de prueba. Se dejaron fraguar por 24 h y después de este tiempo se desmoldaron, como se observa en la Imagen 19 y la Imagen 20 respectivamente.



Imagen 19. Espécimen en molde para prueba de flexión. Imagen propia.



Imagen 20. Espécimen para prueba a flexión. Imagen propia.

Se dejaron curar después de desmoldar cada espécimen en el área de curado del laboratorio, como se observa en la Imagen 21, durante 7 - 28 días hasta su día de ensayo, lo cual se especifica en la Tabla 12.



Imagen 21. Especímenes para flexión en el área de curado. Imagen propia.

Tabla 12. Edad de ensayo de especímenes para pruebas de flexión. Elaboración propia.

Especímenes para ensayos de flexión			
Nomenclatura	Aditivo plastificante (%) peso del cemento	Microesferas de vidrio (%) vol. de la arena	Edad de ensayo
F-A0M0	0	0	14
F-A0M2		2	27
F-A0M4	0	4	15
F-A0M6		6	15
F-A3M0		0	14
F-A3M2	3	2	14

F-A3M4		4	16
F-A3M6		6	14
F-A5M0		0	7
F-A5M2		2	9
F-A5M4		4	9
F-A5M6		6	7
F-A7M0	5	0	7
F-A7M2		2	13
F-A7M4		4	8
F-A7M6		6	0

Se realizaron los ensayos en la máquina universal de 50kN, a la cual se le colocó la herramienta necesaria para hacer los ensayos a flexión en 3 puntos (Imagen 22). Se les aplicó a estos especímenes una carga a una velocidad de 5.1 mm/min.



Imagen 22. Ensayo a flexión en 3 puntos. Imagen propia.

Se realizaron los ensayos a todos los especímenes aplicando la carga hasta llegar a la ruptura (Imagen 23), los resultados se muestran en la Tabla 13. En esta tabla se especifican las cargas máximas que resistió cada espécimen, así como la edad de ensayo y un factor utilizado para estimar la carga máxima a la que podrían llegar las muestras a los 28 días y de esta manera poder comparar las mezclas y seleccionar las de mayor resistencia.



Imagen 23. Especímenes ensayados hasta su ruptura. Imagen propia.

Tabla 13. Resistencias de ensayos a flexión. Elaboración propia.

Resistencias de especímenes de ensayos de flexión					
Nomenclatura	No. espécimen	Edad de ensayo (días)	Carga máx. (Py) [N]	Resistencia (kg/cm ²) $F_y = 3P_yL/2bd^2$	Resistencia aproximada a 28 días
F-A0M0-1	1	14	42.1875	9.68	11.13
F-A0M0-2	2	14	109.3750	25.09	28.86
F-A0M0-3	3	14	14.0625	3.23	3.71
F-A0M2-1	1	27	104.6880	24.02	24.50
F-A0M2-2	2	27	92.1875	21.15	21.57
F-A0M2-3	3	27	101.5630	23.30	23.77
F-A0M4-1	1	15	39.0625	8.96	10.31
F-A0M4-2	2	15	39.0625	8.96	10.31
F-A0M6-1	1	15	31.2500	7.17	8.25
F-A3M0-1	1	14	64.0625	14.70	16.90
F-A3M0-2	2	14	26.5625	6.09	7.01
F-A3M0-3	3	14	38.2560	8.78	10.09
F-A3M2-1	1	14	56.2500	12.91	14.84
F-A3M4-1	1	16	50.0000	11.47	13.08
F-A3M4-2	2	16	50.0000	11.47	13.08
F-A3M6-1	1	14	40.6250	9.32	10.72
F-A3M6-2	2	14	17.1875	3.94	4.53
F-A3M6-3	3	14	34.3750	7.89	9.07
F-A5M0-1	1	7	60.9375	13.98	17.48
F-A5M0-2	2	7	92.1875	21.15	26.44
F-A5M0-3	3	7	131.2500	30.11	37.64
F-A5M2-1	1	9	67.1875	15.42	18.96
F-A5M2-2	2	9	71.8750	16.49	20.28
F-A5M2-3	3	9	68.7500	15.77	19.40

F-A5M4-1	1	9	46.8750	10.75	13.23
F-A5M4-2	2	9	39.0625	8.96	11.02
F-A5M4-3	3	9	48.4375	11.11	13.67
F-A5M6-1	1	7	14.0625	3.23	4.03
F-A7M0-1	1	7	134.3750	30.83	38.54
F-A7M0-2	2	7	23.4375	5.38	6.72
F-A7M0-3	3	7	118.7500	27.25	34.06
F-A7M2-1	1	13	70.3125	16.13	18.87
F-A7M2-2	2	13	60.9375	13.98	16.36
F-A7M4-1	1	8	29.6875	6.81	8.45
F-A7M4-2	2	8	29.6875	6.81	8.45

Una vez analizados los datos obtenidos se realizó una gráfica (Figura 10) a partir de la resistencia a la flexión promedio de cada mezcla para comparar el desempeño de cada una y poder seleccionar las que alcanzaron una mayor resistencia. Las mezclas elegidas son “A0M0”, “A0M2”, “A3M2”, “A5M2”, y “A7M2”, estas se evaluarán a través de pruebas de transferencia térmica para poder determinar la factibilidad de su uso.



Figura 10. Resistencia a la flexión promedio por mezcla. Elaboración propia.

Se realizaron también gráficas por grupos de resistencia a la flexión de las mezclas. Como se observa en la Figura 11. Las mezclas con mejor resistencia fueron las mezclas con aditivo en 5% y 7%.

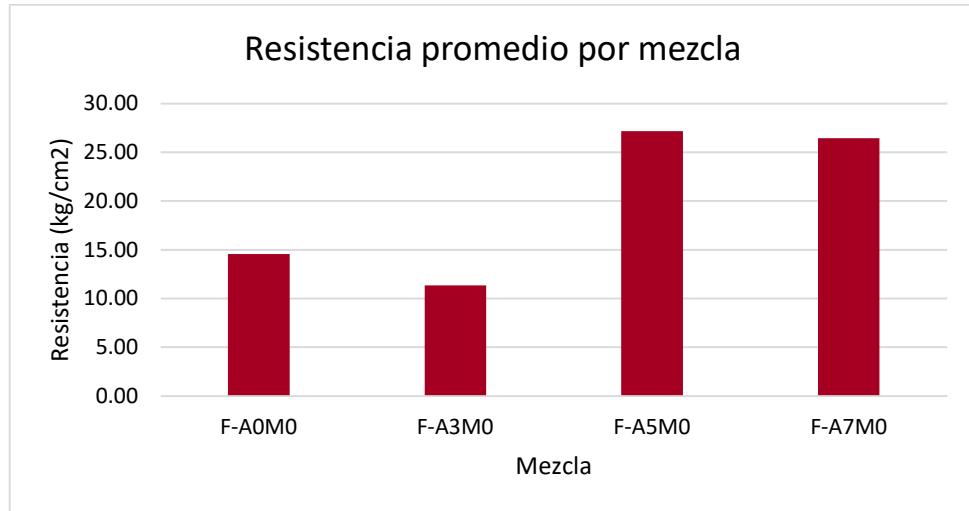


Figura 11. Resistencia a la flexión de mezclas sin microesferas de vidrio. Elaboración propia.

Por otro lado, al analizar la Figura 12 se observa que las mezclas sin aditivo obtuvieron una mejor resistencia al aplicar solamente un 2% de microesferas de vidrio, ya que las de 4% y 6% tuvieron una baja resistencia.

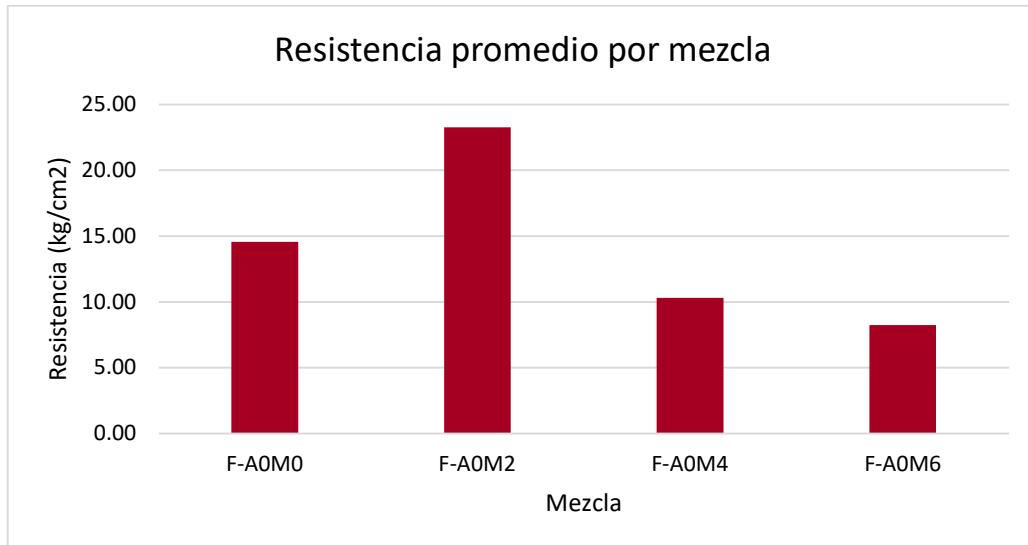


Figura 12. Resistencia a la flexión de mezclas sin aditivo. Elaboración propia.

Del mismo modo, se realizó una gráfica para visualizar de mejor manera el comportamiento a flexión de las mezclas (Figura 13).

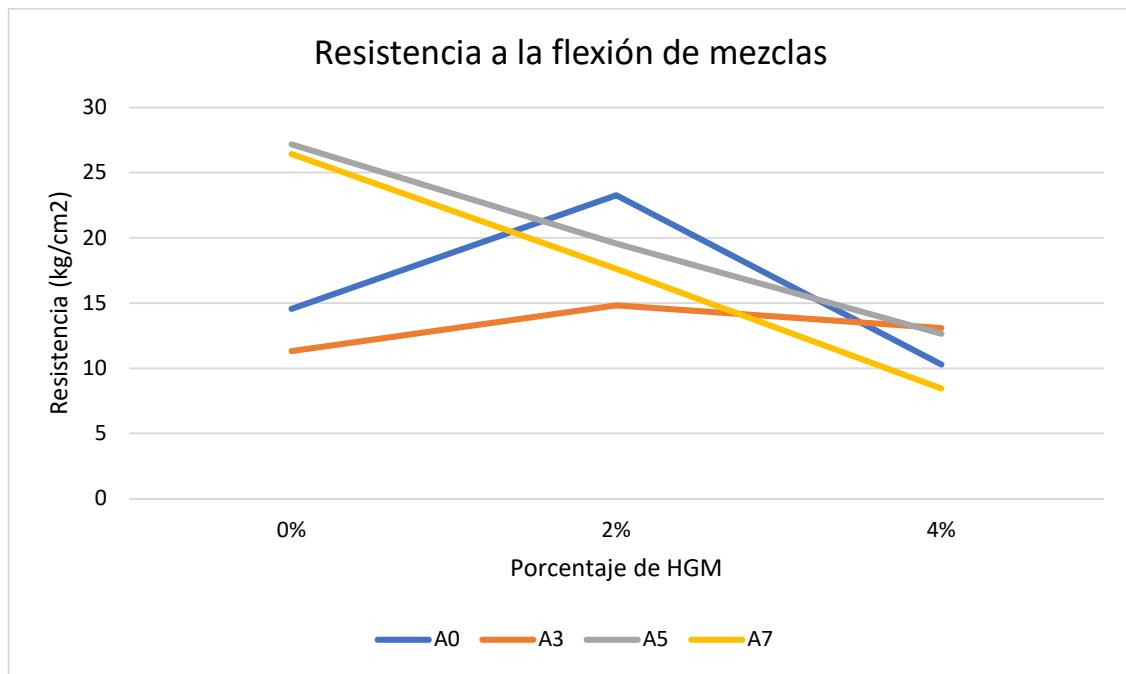


Figura 13. Gráfica de resistencia a la flexión de mezclas. Elaboración propia.

La Figura 13 muestra la variación de la resistencia a la flexión de las mezclas A0, A3, A5 y A7 al incorporar microesferas de vidrio (HGM) en porcentajes de 0 %, 2 % y 4 %. En general, se observa que todas las mezclas presentan sus valores más altos cuando no contienen HGM.

Al incorporar 2 % de HGM, algunas mezclas como A0 y A3 muestran un aumento en la resistencia, lo que sugiere que pequeñas cantidades de microesferas pueden mejorar la resistencia mecánica. En contraste, las mezclas A5 y A7 comienzan a disminuir su resistencia, lo que indica que el efecto del aditivo plastificante y las HGM no es favorable en esas proporciones. Con 4 % de HGM, todas las mezclas reducen en gran cantidad su resistencia a la flexión.

Con esta gráfica se puede establecer que el uso de microesferas tiene un comportamiento favorable cercano al 2 % en algunas mezclas, pero porcentajes mayores afectan negativamente la capacidad de resistencia del mortero.

En los resultados de resistencia a la flexión se observa una tendencia más dispersa en comparación con los valores de compresión, lo cual puede atribuirse a la naturaleza más frágil de este tipo de esfuerzo y a la pérdida de varios especímenes durante el ensayo, especialmente en las mezclas con mayor contenido de microesferas de vidrio, lo que afectó el número de datos disponibles y la confiabilidad estadística.

Además, en esta gráfica se observa que las mezclas con un contenido bajo de microesferas de vidrio, específicamente entre 0% y 2%, presentan los valores más altos de resistencia. Este comportamiento indica que una incorporación moderada de microesferas no afecta de forma significativa el desempeño a flexión, e incluso puede ser compatible con la presencia del aditivo. Sin embargo, a partir del 4% de HGM, la resistencia a la flexión tiende a disminuir, y en el caso del 6% se registran las menores resistencias, acompañadas además de fallas físicas en los especímenes incluso antes de aplicarles una carga.

Con este análisis se puede inferir que al incrementarse el porcentaje de microesferas se obtiene una disminución en la resistencia a la flexión. Este comportamiento puede ser ocasionado por una menor capacidad estructural de las microesferas frente a esfuerzos de tracción. Estos resultados muestran un límite en torno al 2% para tener un buen desempeño mecánico a flexión. Utilizar un porcentaje más alto provoca una pérdida gradual en la capacidad del material para resistir este tipo de cargas.

Al comparar los resultados de resistencia a la compresión y a la flexión, se observa que las mezclas con 0% de HGM mantienen un buen desempeño en ambas propiedades mecánicas, destacando las que contienen aditivo plastificante en proporciones del 5% y 7%. Asimismo, las mezclas con bajos contenidos de HGM (hasta 2%) muestran un comportamiento aceptable a la flexión y compresión. En cambio, las mezclas con 4% y 6% de HGM presentan una disminución significativa en ambos ensayos, además de fallas físicas previas a la aplicación de cargas y en

el proceso de desmolde en los especímenes con un contenido del 6%, tal como se observa en la Imagen 24 y la Imagen 25.



Imagen 24. Especímen con 6% de HGM. Imagen propia.



Imagen 25. Especímenes con 6% de HGM. Imagen propia.

Con base en este análisis, se seleccionaron para la etapa de evaluación térmica aquellas mezclas que ofrecieron un equilibrio favorable entre desempeño mecánico y contenido de microesferas, las cuales son “A0M0”, “A0M2”, “A0M4”, “A3M2”, “A5M2”, “A7M0” y “A7M2”. En las imágenes 26-31 se muestran imágenes de los especímenes de algunas de las mezclas seleccionadas.



Imagen 26. Especímenes de mezcla A2M0. Imagen propia.



Imagen 27. Especímenes de mezcla A4M0. Imagen propia.



Imagen 28. Especímenes de mezcla A2M4. Imagen propia.



Imagen 29. Especímenes de mezcla A2M4. Imagen propia.



Imagen 30. Especímenes de mezcla A7M2. Imagen propia.



Imagen 31. Especímenes de mezcla A7M2. Imagen propia.

Especificamente, se eligieron mezclas que permitieran aprovechar el potencial de las HGM como material de cambio de fase sin comprometer significativamente la resistencia estructural del mortero. Con esta selección se busca obtener un comportamiento térmico eficiente manteniendo al mismo tiempo niveles adecuados de desempeño mecánico para aplicaciones en la construcción.

5.3.1 GRÁFICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN DE PRUEBAS DE FLEXIÓN

Con el objetivo de complementar el análisis mecánico a flexión de las mezclas seleccionadas, se realizaron también curvas esfuerzo-deformación con los datos arrojados en los ensayos. Estas curvas permiten observar la resistencia máxima alcanzada por cada mezcla, y su comportamiento frente a la carga, incluyendo los mismos aspectos que en el análisis a compresión, aspectos como el módulo elástico y la forma en que ocurre la falla. A partir de estas curvas fue posible obtener valores como el alargamiento elástico, el alargamiento a la ruptura y el módulo elástico.

Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para las mezclas seleccionadas en el ensayo de flexión presentan un comportamiento característico de materiales frágiles, con una fase inicial de incremento del esfuerzo hasta alcanzar un valor máximo, seguido de una caída pronunciada, como se muestra en la Figura 14. Esta forma de curva indica una baja capacidad de deformación posterior a la carga máxima, es decir, una fractura sin comportamiento dúctil.

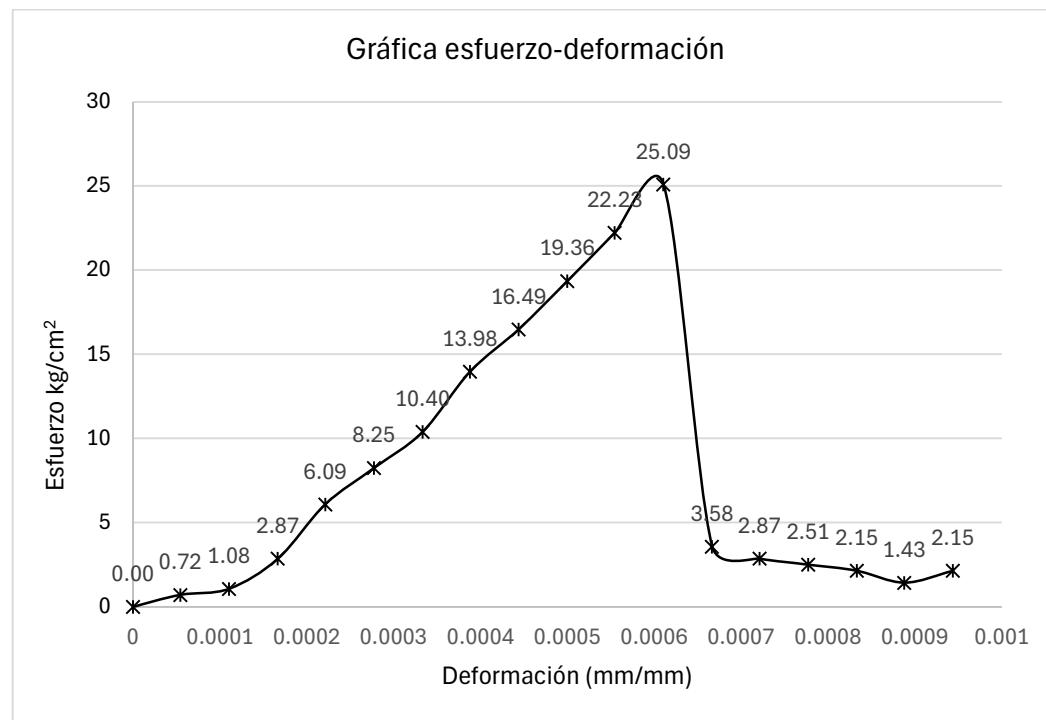


Figura 14. Gráfica esfuerzo-deformación de ensayo de flexión de mezcla A0M0. Elaboración propia.

Entre las mezclas analizadas, la mezcla A0M0 (sin aditivo ni HGM) alcanza el mayor esfuerzo máximo con una pendiente inicial pronunciada, lo que refleja una mayor rigidez. Por otro lado, las mezclas con 2% de HGM, como A0M2 (Figura 15) y A5M2 (Figura 16), muestran reducciones en el esfuerzo máximo, así como una pendiente inicial menos inclinada, lo que indica una disminución en rigidez. Sin embargo, estas mezclas aún presentan un comportamiento frágil, con rupturas repentinas después del pico de carga.

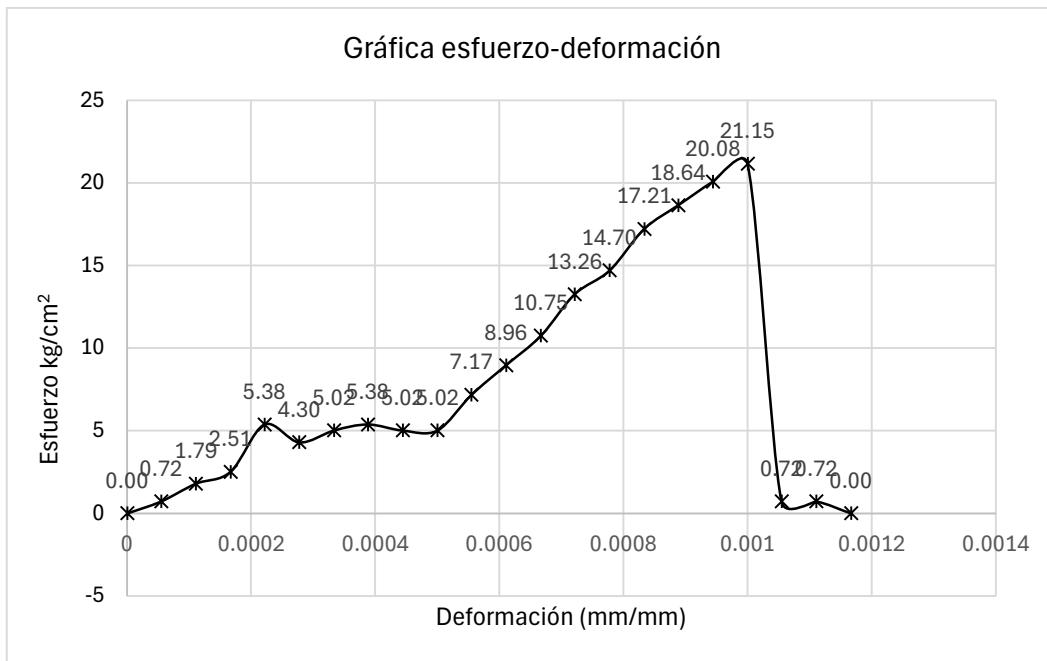


Figura 15. Gráfica esfuerzo-deformación de ensayo de flexión de mezcla A0M2. Elaboración propia.

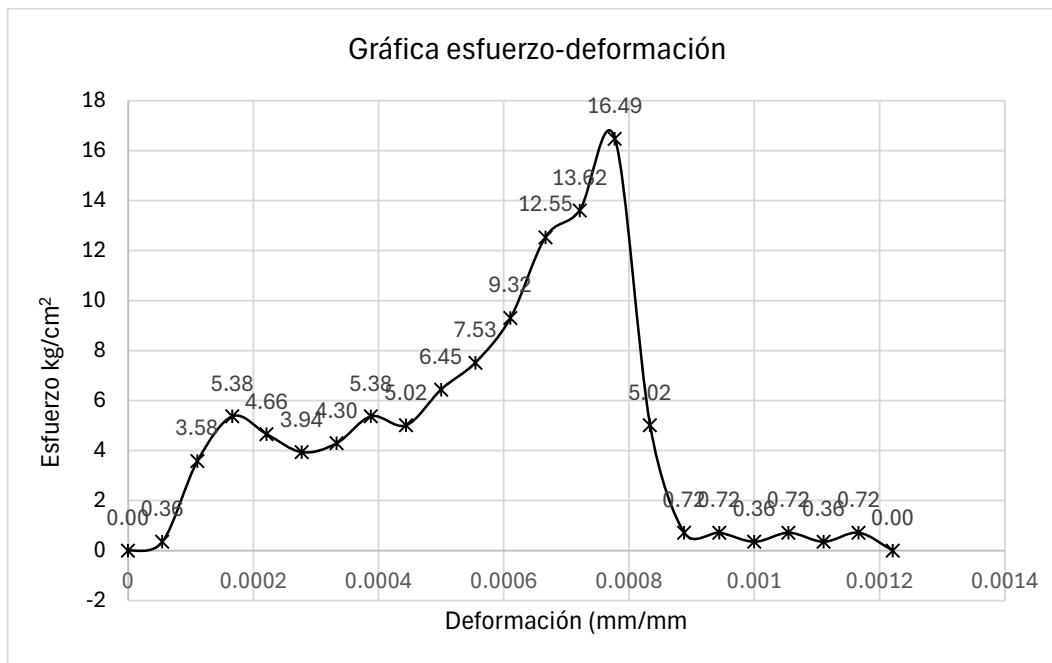


Figura 16. Gráfica esfuerzo-deformación de ensayo de flexión de mezcla A5M2. Elaboración propia.

En cuanto a la adición del aditivo plastificante, este parece no modificar significativamente la forma general de la curva, el carácter frágil de todas las mezclas se mantiene como tendencia predominante.

En general, las curvas confirman que la resistencia a la flexión en estos morteros está dominada por una falla tipo frágil, y que tanto el contenido de microesferas de vidrio como el del aditivo influyen moderadamente en la rigidez inicial y en el punto de fractura, sin generar un cambio representativo hacia un comportamiento dúctil.

5.4 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Se realizaron ensayos a los especímenes de las diferentes mezclas seleccionadas en los ensayos realizados de comportamiento mecánico.

Para estos ensayos se empleó un método experimental basado en termografía infrarroja para obtener la respuesta térmica superficial de los especímenes. La cámara termográfica registra la radiación infrarroja emitida por la superficie de cada espécimen. Esta radiación depende de la temperatura y de la emisividad del objeto.

Los especímenes se colocaron al sol durante un día dirigiendo una cara directamente hacia el sol como se muestra en la Imagen 32.Imagen 32. Especímenes para pruebas con cámara termográfica. Imagen propia.



Imagen 32. Especímenes para pruebas con cámara termográfica. Imagen propia.

Se tomaron imágenes de las superficies de cada espécimen tres veces en un día. Primeramente, en la mañana a las 9am, después cuando se encontraban en su punto de más alta temperatura (3pm) y posteriormente a las 6pm, cuando bajó la temperatura.

En las Imágenes 33-36 se muestran algunas de las imágenes tomadas a las 9am, destacando que no había mucha varianza en las temperaturas de los especímenes, registrando entre 11.9 °C y 13.6°C.

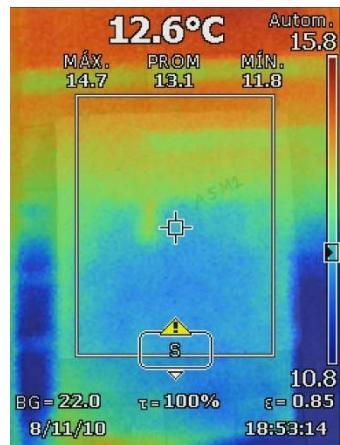


Imagen 33. Fotografía de cámara termográfica.
Imagen propia.

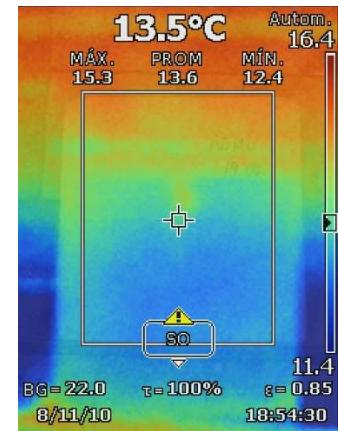


Imagen 34. Fotografía de cámara termográfica.
Imagen propia.

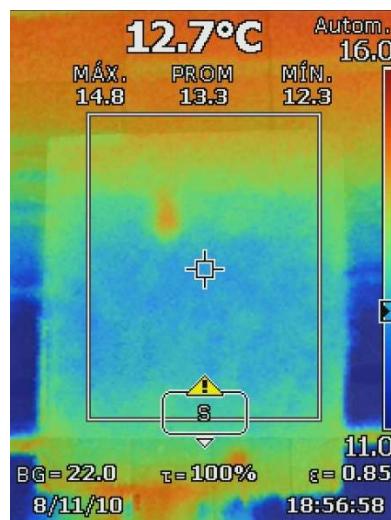


Imagen 35. Fotografía de cámara termográfica.
Imagen propia.

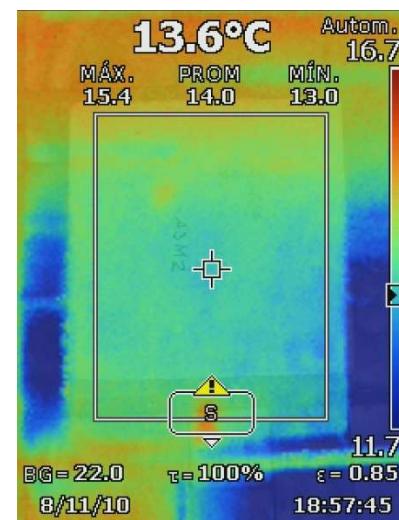


Imagen 36. Fotografía de cámara termográfica.
Imagen propia.

En la segunda medición fue donde se observaron variaciones considerables entre los especímenes de distintas mezclas y se pudieron sacar conclusiones a partir de su análisis. En las Imágenes 37-42 se muestran algunas de las imágenes captadas a las 3pm.

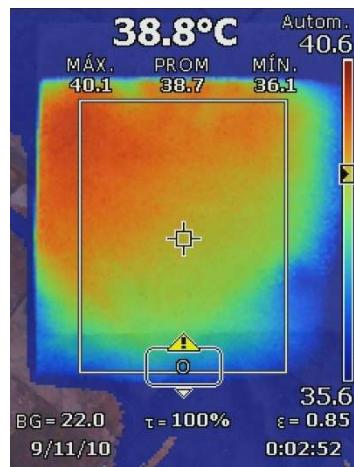


Imagen 37. Fotografía de cámara termográfica.
Imagen propia.

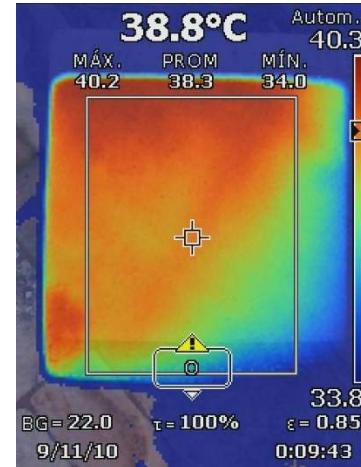


Imagen 38. Fotografía de cámara termográfica.
Imagen propia.

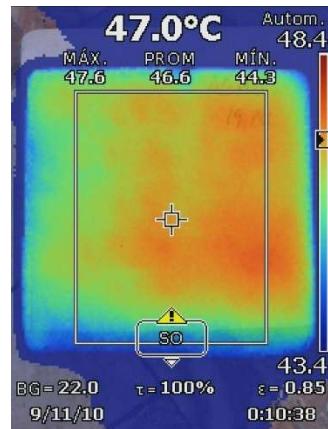


Imagen 39. Fotografía de cámara termográfica.
Imagen propia.

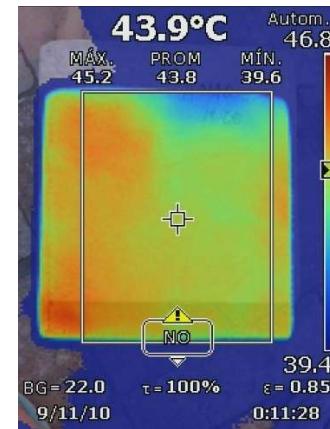


Imagen 40. Fotografía de cámara termográfica.
Imagen propia.



Imagen 41. Fotografía de cámara termográfica.
Imagen propia.



Imagen 42. Fotografía de cámara termográfica.
Imagen propia.

Con los valores obtenidos de las imágenes se realizó una tabla (Tabla 14) donde se calculó el porcentaje de transferencia de calor de las placas de las distintas mezclas.

Tabla 14. Porcentaje de calor transferido. Elaboración propia.

Porcentaje de calor transferido			
Mezcla	Temperatura 1	Temperatura 2	%
A0M0 a	45.4	41.1	90.53
A0M0 b	47	41.3	87.87
A0M0 c	43.9	41.2	93.85
A0M2 a	38.2	36.8	96.34
A0M2 b	44.6	39.5	88.57
A0M2 c	46.6	40.9	87.77
A3M2 a	46	40.8	88.70
A3M2 b	47.1	40.9	86.84
A3M2 c	48.2	40.8	84.65
A3M4 a	44.5	39.5	88.76
A3M4 b	47.6	41.1	86.34
A3M4 c	45.2	41.6	92.04
A5M2 a	36.4	37.4	102.75
A5M2 b	41.2	38.8	94.17
A5M2 c	40	38.8	97.00
A7M2 a	34.8	36.8	105.75
A7M2 b	41.4	37.9	91.55

Los valores obtenidos representan el porcentaje de calor que logró atravesar el espesor de cada espécimen, calculado a partir de la relación entre la temperatura registrada en la cara expuesta a la fuente de calor y la temperatura medida en la cara posterior. Los porcentajes más altos representan una mayor transferencia térmica a través del material, mientras que porcentajes menores indican una mayor capacidad de amortiguamiento térmico, lo cual se atribuye a la presencia de las microesferas de vidrio en la mezcla de mortero.

La mezcla de control (A0M0), que no contiene ni aditivo plastificante ni microesferas, presentó valores de transferencia de calor entre 87.87% y 93.85%. Estos resultados corresponden al comportamiento típico de un mortero sin aislamiento térmico.

En la mezcla A3M2 se registraron los valores más bajos de transferencia térmica con porcentajes entre 84.65% y 88.70%. Esta disminución demuestra que la presencia del aditivo pudo haber favorecido a una mejor distribución de las microesferas dentro de la matriz cementante, por lo cual se pudo aprovechar de mejor manera la capacidad amortiguamiento térmico de las microesferas.

Se observa también que, a partir de contenidos mayores de aditivo plastificante, el desempeño térmico del material disminuyó. Las mezclas A5M2 y A7M2, correspondientes a dosificaciones del 5% y 7% de aditivo, registraron los porcentajes más altos de transferencia térmica.

6. CONCLUSIONES

En la presente investigación, los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos han permitido identificar el comportamiento estructural de las mezclas de mortero con distintas proporciones de aditivo plastificante y microesferas de vidrio. Se observó que la incorporación de las microesferas tiende a reducir la resistencia a la compresión y la rigidez del material, mientras que el uso del aditivo plastificante, en proporciones adecuadas, puede mejorar tanto la resistencia como la capacidad de deformación, particularmente cuando no se combina con altos contenidos de microesferas.

Las curvas esfuerzo-deformación para compresión y flexión proporcionaron una visión más detallada del desempeño mecánico, evidenciando que todas las mezclas presentan un comportamiento predominantemente frágil, aunque aquellas con aditivo mostraron mayor capacidad de deformación antes de la ruptura.

Con base en estos resultados, se seleccionaron seis mezclas representativas para su evaluación térmica, priorizando aquellas que ofrecieron un equilibrio entre comportamiento mecánico aceptable y potencial beneficio térmico derivado de la incorporación de las microesferas de vidrio

Los resultados de las pruebas térmicas demuestran que la incorporación de las microesferas de vidrio sí contribuye a reducir la transferencia de calor, sin embargo, su desempeño depende en gran medida de la forma en que el aditivo plastificante modifica la trabajabilidad y la distribución de las microesferas dentro del mortero. La combinación que mostró el mejor comportamiento térmico fue A3M2, correspondiente a 3% de aditivo y 2% de microesferas. Además, esta mezcla también tuvo un buen comportamiento mecánico, por lo cual se puede establecer que es la mejor mezcla del presente estudio para emplearse en recubrimientos, teniendo en cuenta que tiene buenas propiedades térmicas y mecánicas en comparación con un mortero convencional.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Sierra Reveles, "Desarrollo y caracterización de agregado almacenador de calor," Universidad Autónoma de Querétaro, 2017.
- [2] V. A. Perfilov, "Fibre-reinforced foam concrete with hollow glass microspheres," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/687/2/022014.
- [3] J. L. Reyez-Araiza *et al.*, "Thermal energy storage by the encapsulation of phase change materials in building elements—a review," Mar. 02, 2021, *MDPI* AG. doi: 10.3390/ma14061420.
- [4] M. C. Carvajal Vega and G. Cortés Pomar, "EVALUACIÓN DEL USO DE ADITIVOS SOBRE LA MEZCLA CONVENCIONAL DE CONCRETO EN MORTEROS DE CEMENTO ART PARA EL AUMENTO DE SU RESISTENCIA," FUNDACIÓN UNIVERSIDAD AMÉRICA FACULTAD DE INGENIERÍAS, Bogotá D.C, 2019.
- [5] B. Németh, Á. S. Németh, J. Tóth, A. Fodor-Kardos, J. Gyenis, and T. Feczkó, "Consolidated microcapsules with double alginate shell containing paraffin for latent heat storage." [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961200000338>
- [6] Global Alliance for Buildings and Construction, "2023 Global Status Report for Buildings and Construction Beyond foundations," 2024. doi: 10.59117/20.500.11822/45095.
- [7] L. Derradji, F. B. Errebai, and M. Amara, "Effect of PCM in Improving the Thermal Comfort in Buildings," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, Feb. 2017, pp. 157–161. doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.159.
- [8] Sercalia, "MICROESFERAS EN CONSTRUCCIÓN." Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://sercalia.com/construccion-microesferas/>

- [9] M. A. Pulungan, S. Sutikno, and M. S. M. Sani, "Analysis of Bulletproof Vest Made from Fiber Carbon Composite and Hollow Glass Microsphere (HGM) in Absorbing Energy due to Projectile Impact," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Apr. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/506/1/012001.
- [10] D. Prasad Acharya and T. Raj Gyawali, "Investigation of the performance of natural molasses on physical and mechanical properties of cement mortar," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.asej.2023.102355.
- [11] G. Fredi *et al.*, "Bioinspired polydopamine coating as an adhesion enhancer between paraffin microcapsules and an epoxy matrix," *ACS Omega*, vol. 5, no. 31, pp. 19639–19653, Aug. 2020, doi: 10.1021/acsomega.0c02271.
- [12] M. Wydra, P. Dolny, G. Sadowski, and J. Fangrat, "Flexural behaviour of cementitious mortars with the addition of basalt fibres," *Materials*, vol. 14, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/ma14061334.
- [13] Q. Al-Yasiri and M. Szabó, "Paraffin As a Phase Change Material to Improve Building Performance: An Overview of Applications and Thermal Conductivity Enhancement Techniques," *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, vol. 6, p. 38, 2021, doi: 10.1051/rees/2021040.
- [14] S. Serrano, C. Barreneche, A. Navarro, L. Haurie, A. Inés Fernandez, and L. F. Cabeza, "Study of fresh and hardening process properties of gypsum with three different PCM inclusion methods," *Materials*, vol. 8, no. 10, pp. 6589–6596, 2015, doi: 10.3390/ma8105324.
- [15] J. C. Ledesma García and Á. Jiménez Loredo, "MORTERO COMPUESTO CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM) PARA PANEÑES PREFABRICADOS," Tesis de grado, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, 2018.

- [16] V. Z. Vargas, L. J. Claros-Marfil, G. F. B. Sandoval, B. H. Rojas, A. G. Santos, and F. J. N. González, “Experimental assessment of energy storage in microencapsulated paraffin PCM Cement mortars,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e02959.
- [17] S. Cunha, J. Aguiar, and F. Pacheco-Torgal, “Effect of temperature on mortars with incorporation of phase change materials,” *Constr Build Mater*, vol. 98, pp. 89–101, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.077.
- [18] Y. Safaralipour and M. E. Karagüler, “Improving the Thermal and Insulation Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Facade Panels Using Phase Change Material (PCM): An Experimental Analysis,” *Civil Engineering and Architecture*, vol. 11, no. 4, pp. 2201–2218, Jul. 2023, doi: 10.13189/cea.2023.110438.
- [19] A. Muciño-Vélez, C. A. Guillén Guillén, A. Tahuiton-Mora, and E. Orozco-Mendoza, “Influencia de la arena en la resistencia mecánica del mortero empleando diferentes marcas de cemento,” *CIENCIA ergo-sum*, vol. 29, no. 1, Apr. 2022, doi: 10.30878/ces.v29n1a9.
- [20] “I UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL INFLUENCIA DEL ADITIVO PLASTIFICANTE PARA AUMENTAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN HIDRÁULICO CON F'C 240 kg/cm² USANDO.”
- [21] “FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL.”
- [22] S. Cunha, P. Leite, and J. Aguiar, “Characterization of innovative mortars with direct incorporation of phase change materials,” *J Energy Storage*, vol. 30, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101439.
- [23] A. Vicente and Z. Vargas, “Mortero acumulador de energía mediante parafina microencapsulada.” [Online]. Available: www.hormigonsustentable.cl

- [24] S. S. Lucas and J. L. Barroso De Aguiar, "Multifunctional wall coating combining photocatalysis, self-cleaning and latent heat storage," *Mater Res Express*, vol. 5, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.1088/2053-1591/aaa82f.
- [25] M. A. Piscoya, V. Asesor, J. Enrique, and A. Ruffran, "UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL Evaluación técnico-económica de la incorporación de microesferas de vidrio en las propiedades mecánicas del concreto autocompactante TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL AMBIENTAL AUTOR." [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0002-5321-8500>
- [26] 3M Company, "Microesferas de Vidrio 3M." Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: https://www.3m.com.mx/3M/es_MX/p/c/materiales-avanzados/microesferas-vidrio/i/diseno-y-construccion/
- [27] 3M Company., "3M Safety Data Sheet," 2024.
- [28] BROCHURE, "ADITIVOS PARA CONCRETO," 2023. [Online]. Available: WWW.TOXEMENT.COM.CO
- [29] C. A. Méndez, "ASOCRETO - TECNOLOGÍA DE ADITIVOS PARA EL CONCRETO EN OBRAS HIDRÁULICAS," *TECNOLOGÍA*, 2013.