

Portada Externa de Tesis

Juan Carlos Ledesma García
Ángel Jiménez Loredo

Mortero compuesto con material de
cambio de fase (PCM) para paneles
prefabricados ligeros

2018



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería



MORTERO COMPUESTO CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM) PARA PANELES PREFABRICADOS LIGEROS

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

INGENIERO CIVIL

Presentan:

Juan Carlos Ledesma García
Ángel Jiménez Loredo



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería Civil



**MORTERO COMPUESTO CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM) PARA
PANELES PREFABRICADOS LIGEROS**

Opción de titulación
TESIS COLECTIVA

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

INGENIERO CIVIL

Presentan:

Juan Carlos Ledesma García y Ángel Jiménez Loredo

Dirigido por:

Dr. José Luis Reyes Araiza

SINODALES

Dr. José Luis Reyes Araiza
Presidente

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Secretario

M.I. Rubén Ramírez Jiménez
Vocal

Firma

Firma

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre de 2018
México

RESUMEN

El presente trabajo de tesis expone la utilización de material cambio de fase (PCM) y material ligero (pomacita) en mezclas de mortero, en base de cemento portland, con el objetivo de mejorar las condiciones térmicas y mecánicas bajo esfuerzos de compresión y flexión en los morteros y con esto reducir la demanda energética en el sector residencial. Se realizó una primera mezcla de control con una relación de cemento-arena 1:3 y una fluidez de 110% +/- 5%, en base a ésta se elaboró una segunda mezcla sustituyendo por material ligero. La tercer y cuarta mezcla fue una relación 1:2 cemento-arena variando la cantidad de PCM y cambiando la proporción de la mezcla de control. La quinta y sexta mezcla fue una relación 1:1 cemento-arena y variando la cantidad de PCM y cambiando las proporciones de la mezcla de control. De cada dosificación se realizaron 10 probetas para ensayos a esfuerzos de compresión, y 10 para ensayos a esfuerzos de flexión con la finalidad de identificar las muestras con las mejores propiedades mecánicas. Adicionalmente, se realizaron 5 probetas para las dosificaciones que contienen únicamente PCM para obtener el comportamiento térmico de las muestras. Para todas las mezclas se obtuvo la fluidez, esfuerzos a compresión y a flexión en los morteros. Los resultados demuestran que una de las mezclas de mortero ensayada obtuvo una notable resistencia bajo esfuerzos de compresión y una mejora bajo esfuerzos de flexión. Por lo tanto, de acuerdo a los resultados se presume que el PCM podría representar una alternativa como agregado en paneles prefabricados.

(Palabras clave: PCM, material ligero, mortero, propiedades mecánicas, conductividad térmica)

SUMMARY

The present work of this thesis is showing the usage of phase change material (PCM) and lightweight material (pumice) that are mixed with mortars, which contains Portland cement to improve thermal and mechanical behavior. The mixes are tested under compression and bending stresses to cut down the energy demand in the construction industry. Six mixes were tested with different amounts of material and proportions of PCM and lightweight material. For such effect, the first mix has a ratio 1:3 cement–sand and fluidity of 110% +/- 5%. The second one, it was replaced lightweight material instead of sand. The third and fourth mixtures had a ratio 1:2 cement-sand which was changed the relation and these mixtures had a variety of amounts of PCM. The fifth and sixth mixtures had a ratio 1:1 cement – sand, which also changed the relation and their testes had a variety of amounts of PCM. Ten samples were made for every mixture to test under compression stresses and ten samples to test under bending stresses to find the best mixtures, which might have good mechanical properties. Additionally, five samples were made just for the mixtures which contain PCM material to test them and identify the thermal properties. All the samples were tested under compression stresses and bending stresses. The results show that one of the mortar mixtures got a remarkable compression stress and a better bending stress. Therefore according to the results it is presumed that the PCM could represent a good alternative of material to be used in prefabricated panels.

(Keywords: PCM, lightweight material, mortar, mechanical properties, thermal conductivity)

Al creador de todas las cosas, el que me ha dado la fortaleza para seguir adelante cuando a punto he estado de caer, a mi familia porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

Juan Carlos

A mi familia y amigos que me han acompañado en los momentos buenos y los más difíciles, a Dios por ser quien me guía.

Ángel

A DIOS:

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A MI FAMILIA:

A mis padres por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS:

Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora seguimos siendo amigos.

A MIS MAESTROS:

Por sus enseñanzas, consejos y experiencias que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario, y que me ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de la tesis.

Juan Carlos

A DIOS:

Por darme la oportunidad de soñar y permitirme llevar a cabo estos sueños, dándome la fortaleza, decisión, y perseverancia, y sobre todo por darme la oportunidad de estar rodeado de personas que me estiman y me quieren.

A MI FAMILIA:

Por estar siempre conmigo, mi padre por su dedicación y enseñanza a amar mi trabajo, mi madre por su apoyo incondicional y ser parte de mi inspiración, mis hermanas y mis hermanos por su unidad, apoyo y confianza.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS:

Por su amistad y compañerismo, sus consejos y convivencia al enfrentar retos que nos hicieron ser personas más firmes y seguras.

A MIS MAESTROS:

Por sus enseñanzas, consejos, experiencias, sabiduría y gran compromiso que tiene por sus alumnos para que nos superemos y podamos cada día ser los mejores profesionistas.

A LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO:

Por darme la gran oportunidad de forjarme como profesionista en esta gran casa de estudios.

Ángel

ÍNDICE

	Página
Resumen	i
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Índice	vi
Índice de cuadros	viii
Índice de figuras	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Antecedentes históricos	3
2.2 Morteros tradicionales	4
2.3 Pomacita (arenilla) como material ligero	5
2.4 Material cambio de fase (parafina y estearato de butilo)	5
2.5 Problemática Actual	6
2.6 Incorporación de PCM en materiales de construcción y elementos estructurales	9
2.7 Propiedades mecánicas y térmicas en la incorporación de PCM's en morteros y concretos	12
2.8 Justificación	13
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	14
VI. METODOLOGÍA	15
4.1 Materiales	15
4.1.1 Arena	15
4.1.2 Pomacita	16
4.1.3 Cemento portland	17
4.1.3.1 Propiedades del cemento	17
4.1.3.2 Tipos de cemento	17

4.1.3.3 Tipo de cemento utilizado	20
4.1.4 FSPCM (Form Stable Phase Change Material).....	21
4.1.4 Agua	22
4.2 Métodos	22
4.2.1 Caracterización física de arena y pomacita.....	23
4.2.1.1 Cuarteo de muestras.....	23
4.2.1.2 Granulometría	24
4.2.1.3 Contenido de materia orgánica	25
4.2.1.4 Modulo de finura	26
4.2.1.5 Peso volumétrico seco compacto.....	26
4.2.1.6 Peso volumétrico seco suelto.....	27
4.2.1.7 Porcentaje de absorción	28
4.2.1.8 Densidad relativa	30
4.3 Resultados caracterización de arena.....	31
4.4 Resultados caracterización de pomacita	34
4.5 Dosificación y preparación de morteros.....	37
4.5.1 Determinación de la cantidad de agua por el método de fluidez	40
4.5.2 Pruebas resistencia a compresión	43
4.5.3 Prueba resistencia a flexión	46
4.5.4 Conductividad térmica	47
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
5.1 Resultados de ensaye a esfuerzos de compresión	50
5.2 Resultados de ensaye a esfuerzos de flexión	51
VI. CONCLUSIONES.....	54
VII. LITERATURA CITADA.....	55
APÉNDICE	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla .	Página
4.1. Granulometría de la arena para mortero para aplanado de la capa base (Norma ASTM C33)	16
4.2. Resistencia mecánica a la compresión a 28 días (IMCYC)	18
4.3. Características del cemento. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto (IMCYC).	19
4.4. Resistencia a la compresión del cemento Moctezuma CPC 30R	20
4.5. Requerimientos de granulometría para agregados finos (ASTM C33). .	31
4.6. Granulometría de la arena	32
4.7. Requisitos granulométricos para los agregados ligeros usados en concretos estructurales.	34
4.8. Requerimientos de granulometría para agregados ligeros (ASTM C330).	35
4.9. Granulometría de la pomacita	35
4.10. Matriz de experimentos	38
4.11. Proporción de solución PCM's	38
4.12. Proporciones de matriz de experimentos	39
4.13. Dosificaciones prueba esfuerzos a compresión	39
4.14. Dosificaciones prueba esfuerzos a flexión	39
4.15. Dosificaciones prueba conductividad térmica	39
4.16. Fluidez de mezclas de mortero sometidos a esfuerzos de compresión.....	42
4.17. Fluidez de mezclas de mortero sometidos a esfuerzos de flexión.	43
4.18. Fluidez de mezclas de mortero Conductividad térmica	43
4.19. Tolerancias permisibles para ensaye de especímenes (ASTM C-109).....	44

5.1. Resultados de ensaye resistencia a esfuerzos de compresión.....	50
5.2. Resultados ensaye de resistencia a flexión	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
4.1 Clasificación de los distintos tipos de PCM's implementados en la construcción	21
4.2 Cuarteo representativo de muestras arena y pomacita para pruebas preliminares	23
4.3 Tamices para prueba de granulometría de la arena según norma ASTM C136-01.	25
4.4 Material en condición S.S.S. para prueba de absorción y densidad NMX-C-165-ONNCCE-2004.....	28
4.5 Arreglo para determinar de la densidad de la arena de acuerdo a la NMX-C- 165 –ONNCCE-2004.....	30
4.6 Curva granulométrica de la arena	32
4.7 Índice de materia orgánica contenida en la muestra.....	33
4.8 Curva granulométrica de la pomacita.....	36
4.9 Molde tronco-cono para la determinación de la fluidez de morteros.....	40
4.10 Determinación de la fluidez empleando la mesa de fluidez con 25 golpes en 15 seg.	41
4.11 Medición de cuatro diámetros para determinar la fluidez del mortero.....	42
4.12 Cabeceo de cilindros para ensaye a compresión	44
4.13 Ensaye de cilindros a compresión en maquina universal Tinius Olsen con capacidad de 300 KN	45
4.14 Probetas para ensayo a esfuerzos de módulo de ruptura	47
4.15 Configuración experimental del aparato de placa caliente.....	57
4.16 Construcción de probetas de ensaye por conductividad térmica	49
5.1 Ensaye de probetas a esfuerzos de compresión	51
5.2. Ensaye de probetas a tensión.....	52
5.3 Gráfica desplazamiento vs carga de ensaye a módulo de ruptura	53

I. INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción es uno de los consumidores dominantes de energía con un 30% del total del consumo a nivel mundial, lo cual causa grandes emisiones de gases de efecto invernadero directa e indirectamente. La demanda de energía en este sector ha estado en constante aumento debido al crecimiento de la población y al mejoramiento en los estándares de calidad de vida (Ali, 2014).

La dependencia a las energías derivadas de energías no renovables provenientes principalmente del petróleo ha provocado un déficit energético lo cual causará problemas sociales a las futuras generaciones. Recientes investigaciones se han enfocado en el desarrollo de nuevas tecnologías para abordar esta creciente problemática de la alta dependencia a las energías no renovables.

El desarrollo de energías renovables tal como la energía térmica ha sido un método que se ha venido desarrollando por la comunidad científica para brindar confort térmico en el sector residencial a través de material cambio de fase PCM (Phase Change Material), los cuales pueden ser adoptados por materiales tradicionales en el sector de la construcción para conservar la temperatura de un edificio por un cierto tiempo en un rango de temperatura debido a su comportamiento térmico durante los procesos de fusión y solidificación (Sierra, 2018).

Previas investigaciones han mostrado el potencial en la incorporación PCM en losas de concreto, blocks, ladrillos, y morteros los cuales han revelado la regulación en la fluctuación de temperaturas y que al incrementar las cantidades de PCM se reduce la conductividad térmica y aumenta la capacidad de absorción de la energía térmica reduciendo la demanda energética en edificios, sin

embargo, también muestran una reducción en la resistencia mecánica (Lecompte, Le Bideau, Glouannec, Nortershauser, & Le Masson, 2015).

En el presente trabajo se analizó esfuerzo a compresión, módulo de ruptura y la conductividad térmica de mezclas de mortero a base de agregados material cambio de fase en forma estable FSPCM (Form Stable Phase Change Material) y ligero (pomacita). Con la finalidad de comparar las propiedades físicas y mecánicas respecto a morteros tradicionales y así poder establecer la viabilidad del uso de estos materiales como agregados en morteros para ser utilizados en la industria de la construcción.

Se diseñó una primera mezcla de control con una relación de cemento-arena 1:3 y una fluidez de 110% +/- 5%, en base a ésta se elaboró una segunda mezcla sustituyendo por material ligero. La tercer y cuarta mezcla fue una relación 1:2 cemento arena variando la cantidad de PCM y cambiando la proporción de la mezcla de control. La quinta y sexta mezcla fue una relación 1:1 cemento arena y variando la cantidad de PCM y cambiando las proporciones de la mezcla de control.

Se realizaron pruebas mecánicas para obtener los esfuerzos a compresión y flexión de las diferentes dosificaciones en los morteros. Para obtener los esfuerzos a compresión de los morteros se ensayaron cilindros de 10 cm de alto por 5 cm de diámetro. La edad a ensayo fue a los 14 días y se elaboraron 10 probetas por cada proporción. Para obtener los esfuerzos a flexión se elaboraron probetas de 1 cm de alto, 5 cm de ancho y 45 cm de largo. Las edades de ensayo fueron a los 28 días y se elaboraron 10 probetas por cada proporción.

También se realizaron pruebas para obtener la conductividad térmica por medio del método de la placa caliente. Las dimensiones de las probetas ensayadas fueron 30 cm de ancho, 30 cm de largo y 5 cm de espesor. Se realizaron ensayos solo para las dosificaciones que contienen el agregado PCM.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes históricos

El empleo de materiales cementantes es muy antiguo, fueron utilizados por las primeras civilizaciones tal es el caso de los egipcios que utilizaban el yeso, los griegos y los romanos utilizaban caliza calcinada, los primeros morteros utilizados en la historia fueron de barro, el cual permitió acomodar con mayor facilidad las piedras irregulares (Bernal, 2008). Paralelamente otras importantes culturas en el continente americano, como las civilizaciones asentadas en México eligieron estructuras de mampostería de piedras naturales, dando muestra del desarrollo avanzado en el proceso de construcción. La utilización de mortero a base de barro fue común dentro de estas civilizaciones, por ejemplo, los olmecas utilizaron muros hechos con bloques de barro rojo.

Con el desarrollo del diseño de los materiales cementantes, Joseph Aspdin en 1824 descubre lo que hoy conocemos como cemento portland. El método de elaboración del cemento se basa calentando una mezcla de arcilla y caliza dura dentro de un horno, hasta eliminar el CO₂, el cemento es el producto obtenido por molienda fina de Clinker producido por calcinación hasta la temperatura de fusión incipiente de una mezcla de homogénea de materiales arcillosos y calcáreos. (Bernal, 2008).

En construcción se denomina cemento a un aglutinante o conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos y agua, crea una mezcla uniforme, manejable y plástica capaz de fraguar y endurecer al reaccionar con el agua, adquiriendo por ello consistencia pétreo. Los materiales aglomerantes, en forma de mortero, son ampliamente utilizados como materiales para la construcción debido a su bajo costo, durabilidad, su defecto radica en sus características de baja resistencia a la compresión, flexión y poco confort térmico en el interior de la construcción. (Martínez, 2012).

2.2. Morteros tradicionales

Con respecto a los morteros tradicionales o comunes (Martínez, 2012) señala que son mezclas plásticas que resultan de la combinación de un agregado fino y el aglomerante el cual puede ser cemento, cal o una mezcla de dichos materiales, estas mezclas por sus características tienen propiedades tales como trabajabilidad, capacidad de retención al agua, adherencia óptima al soporte, resistencia al agrietamiento, contracción volumétrica mínima. El mortero es un material ampliamente usado en la construcción, es una mezcla a base de aglomerante, agua y en ocasiones se añade aditivos para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas.

La adherencia de los morteros depende de su composición como de los materiales que se encuentra elaborado la mampostería sobre la cual será colocado, esta propiedad se puede entender como el grado de unión o conexión de la pasta en la base que será recubierta. Las propiedades mecánicas son muy variables y dependen principalmente del tipo de material que se utiliza como aglomerante y la relación agua cemento, los morteros de cemento registran resistencias a la compresión mucho más altas que los morteros a base de cal, estas resistencias a la compresión rondan entre 40 y 200 kg/cm², el módulo de elasticidad oscila entre 10,000 y 50,000 kg/cm² y 2 t/m³ como peso volumétrico.

Los agregados más usuales para estos compuestos son las arenas de forma redondeada que provienen de la acción de trituración o minas, también pueden emplearse las arenas provenientes de orillas de ríos y arroyos. Los morteros producidos con cales se distinguen por su buena plasticidad, aunque de menor resistencia como los elaborados a base de cemento. Los morteros a base de cemento portland son más resistentes, con adherencia y protección de elementos metálicos en el caso del hierro y acero. La dosificación debidamente elaborada para mortero se expresa indicando el número de partes en volumen o peso de sus componentes, primero el aglomerante o los aglomerantes y las partes

de agregados. Cabe señalar especial cuidado en la dosificación ya que es variable según el usuario, aunque dentro de ciertos parámetros.

Hoy en día existen morteros preparados, los cuales son vendidos en bultos listos para ser utilizados únicamente agregando agua. También hay morteros con cualidades especiales: adherencia mejorada, autonivelantes, expansivos, altas resistencias, etc.

2.3. Pomacita (arenilla) como agregado ligero

Para (Conshohocken, 1999) los agregados ligeros como la pomacita, tezontle, se usan en el concreto como primera consideración con la finalidad de reducir la densidad de los elementos de construcción.

Hay en general tres tipos de agregados ligeros como los agregados preparados por expansión, granulares o productos de sintetización como por ejemplo escorias de alto horno, arcilla y diatomita; agregados preparados por procesamiento de materiales naturales como piedra pómez, escoria o toba; y por último se tiene a los agregados que están compuestos en su mayoría de materia orgánica granular, ligero.

2.4. Material cambio de fase (Parafina y estearato de butilo).

Según (Ling & Poon, 2013) dentro de los Phase Change Material (PCM's) orgánicos se pueden describir con más detalle como parafinas y no parafinas, la mayoría de estos materiales son químicamente estables, seguros y no reactivos además tiene la capacidad de fundirse de manera proporcional sin segregación, son compatibles con la mayoría de los materiales de construcción tradicionales.

La cera de parafina es un hidrocarburo que tiene la estructura química C_nH_{2n+2} , la cera comercial generalmente tiene un punto de fusión que oscila

entre 20 C hasta 70 C todo esto depende del número de átomos de carbón, cuantos más átomos de carbono se encuentren en la cadena mayor será su punto de fusión, tiene una densidad de almacenamiento térmico razonable de 120 KJ/Kg hasta 210 KJ/Kg, conductividad baja de aproximadamente 0.2 W/ mK (Baetens, Jelle, & Gustavsen, 2010). su uso extensivo ha logrado resultados en la adherencia al concreto teniendo una temperatura de 26 C donde se logra el cambio de fase. La parafina es considerada como uno de los PCM más populares utilizados en concreto, sin embargo, este material tiene sus desventajas como ser inflamable y teniendo una baja conductividad térmica en su estado sólido. Diferentes PCM's sin parafina han sido estudiados con gran recelo para evaluar su idoneidad para su uso en concreto, dentro de los cuales se puede nombrar el estearato de butilo, dodecanol, polietileno, tetradecanol y dimetilsulfóxido. El estearato de butilo parece ser el material más adecuado debido a su costo relativamente bajo y punto de fusión adecuado a temperatura de confort humano, alto almacenamiento de calor latente.

2.5. Problemática actual

En los últimos años, a nivel global se observa un desmesurado consumo energético debido al crecimiento de la población y al uso inconsciente de tecnologías de alto consumo energético, el consumo de energía a nivel global incremento cerca del 300% desde 1965 al 2016, del 20 al 40 % del consumo de energía se asocia a las edificaciones incluyendo el sector residencial y comercial. Mas puntualmente el 50 % de la energía es consumida por equipos de climatización de espacios interiores (Sierra, 2018). De acuerdo con las estadísticas de la agencia internacional de energía los combustibles fósiles están dominando dentro del mercado de la energía, con una alarmante participación de alrededor del 81% y se estima que segura con esta tendencia en el mundo como energía primaria en el 2030 (Ali, 2014). En México, no todos los edificios comerciales presentan comportamientos similares, debido a que existen zonas al norte y al sureste del país, donde el uso de sistemas de climatización es una

necesidad para la alcanzar el confort térmico, llegando a representar cerca del 45 % del costo energético total del edificio (Quezada. 2017).

El sector de la construcción es el principal consumidor de energía dominante en todo el mundo con un total de 30% de participación en el consumo total de energía, la mejora del consumo energético de los edificios no solo reducirá la hasta hoy dependencia de los combustibles fósiles, sino que a su vez se tiene un impacto importante en las emisiones totales de gases de efecto invernadero (Ali, 2014).

Para solucionar esta problemática muchos investigadores han desarrollado métodos y materiales con la finalidad de minimizar la demanda de energía provocada por la climatización en los edificios, ya que esto no solo significara reducir gastos, sino también reducir el uso de combustibles tradicionales (Sierra, 2018), entre las múltiples soluciones propuestas surge un novedoso campo de investigación que ha sido la inclusión de material cambio de fase (PCM) en materiales para la construcción, dicha sustancia requiere gran energía térmica para cambiar de fase, el cual consiste en pasar de sólido a líquido y de líquido a sólido, estos pueden mejorar el confort térmico dentro del edificio garantizando un ahorro de energía (Quezada. 2017).

Los materiales de cambio de fase son compuestos capaces de almacenar y liberar energía térmica cuando cambia de un estado físico a otro principalmente de líquido a sólido y de sólido a líquido, para tener un confort térmico en el interior de las viviendas en lugar de bloquear la transferencia de calor en el techo y muros, la solución sería aumentar la inercia térmica utilizando materiales cambio de fase (Lecompte, Le Bideau, Glouannec, Nortershauser, & Le Masson, 2015). Para la aplicación del PCM en elementos constructivos se considera el cambio de fase de líquido a sólido, debido a que requiere menor energía para el estado de transición.

Existen diversos materiales que pueden incorporarse a elementos constructivos de un edificio, una alternativa presentada en este trabajo de investigación es la inclusión de un agregado a base de cera de soya y estearato de butilo en un mortero cemento-arena que contribuya a una mejora energética, debido a que los materiales de cambio de fase cuentan con propiedades que le permite almacenar calor para ser liberado en el momento requerido.

Los materiales cambio de fase se pueden utilizar mejorar el rendimiento energético de edificios y viviendas, a su vez proporciona confort térmico de sus ocupantes. Hay múltiples aplicaciones de los materiales cambio de fase dentro del área de la construcción, por ejemplo, se pueden incorporar en la construcción en envolventes así generara un aumento en su inercia térmica y la reducción de la fluctuación de la temperatura del interior del edificio, esto es bien conocido como una aplicación pasiva. Otra aplicación consiste en formar parte importante en las instalaciones activas de los sistemas de calefacción (Laurie, Mazo, Delgado, & Zalba, 2014).

Los PCM que pueden aplicarse en el área de la construcción sufren cambios de fase entre 5°C y 35°C aproximadamente. Estas transformaciones que son principalmente el almacenar o liberar calor permite un aumento significativo en el ahorro de energía en las edificaciones de esta manera a su vez se contribuye al desarrollo de nuevas soluciones constructivas en favor del medio ambiente (Campos, 2010).

Los principales PCM's utilizados en edificios son (a) materiales compuestos de PCM y yeso, (b) materiales compuestos por PCM y polímeros, (c) materiales compuestos de PCM y cemento. Como regla general, la adición del PCM reduce la densidad del material, la conductividad térmica y la resistencia a compresión. También se pueden integrar en compuestos de cemento por impregnación en agregados ligeros. Se han estudiado diferentes tipos de materiales porosos tales como pizarra expandida, piedra pómez, arcilla expandida. Mediante el método de

impregnación se puede incorporar cerca del 25 % de PCM en el agregado ligero (Haurie, Mazo, Delgado, & Zalba, 2014).

Es bien conocido que los materiales cambio de fase orgánicos tal es el caso de la parafina no supera problemas como la corrosión, sobre-enfriamiento o segregación. A pesar de los grandes beneficios que se obtienen al implementar estos PCM's orgánicos, varios autores han informado de la inflamabilidad de las parafinas como uno de los principales problemas al aumentar el uso de estos PCM's a los materiales de construcción. (Haurie, Mazo, Delgado, & Zalba, 2014).

2.6. Incorporación de PCM en materiales de construcción y elementos estructurales.

Según (Ali, 2014), el material cambio de fase puede incorporarse en materiales de construcción por incorporación directa, inmersión, encapsulación y material de cambio de fase en forma estable (FSPCM).

La incorporación directa. Este es el método más simple, el más usado y económico, debido a que el PCM se mezcla directamente con los materiales de construcción por ejemplo yeso, pastas de cemento, mortero o concreto durante su elaboración. Para la implementación con éxito de PCM sobre todos los materiales a base de cemento no debe interferir con el proceso de hidratación, afectar la unión entre el aglutinante y el agregado, afectar las propiedades mecánicas y afectar las propiedades de durabilidad.

Inmersión. Dentro de la técnica de inmersión consiste principalmente en sumergir los elementos de construcción tales como concreto, ladrillo, bloques, paneles prefabricados con PCM líquido, el cual es absorbido por acción capilar por los elementos de construcción, una desventaja de este método es que el PCM puede fugarse especialmente después de ser sometido a un gran número de

ciclos térmicos, puede afectar considerablemente las propiedades tanto mecánicas como de durabilidad de dichos elementos de construcción.

La encapsulación. En este método el PCM primeramente tiene que ser encapsulado antes de ser implementados en los elementos de construcción, la encapsulación del PCM debe cumplir con requisitos de resistencia, durabilidad, estabilidad térmica, fiabilidad, proteger el PCM al actuar como una barrera a partir de interacciones destructivas con el medio ambiente, ser estructuralmente estable y brindar una facilidad en su manejo. En general existen dos métodos de encapsulación que son microencapsulación y macroencapsulación.

La microencapsulación, dentro de este método las partículas del PCM son pequeñas que van de 1 μm a 1000 μm los cuales esta encerrados de forma hermética en una envoltura sólida y delgada hecha generalmente de polímeros naturales y sintéticos. Los materiales de cambio de fase con temperaturas de fase entre 10 °C y 80 °C pueden ser fabricados con esta técnica.

La microencapsulación tiene las siguientes ventajas, impide la salida del PCM durante la transición de fase por la construcción de una barrera de esta manera aumentando sus posibilidades de ser incorporado en diversos materiales de construcción y proporcionar una alta velocidad de transferencia de calor a través de su área de contacto. Así como este método tiene ventajas existen sus desventajas como la rigidez de la cubierta disminuye la velocidad de transferencia de calor, puede afectar las propiedades mecánicas de los materiales de construcción.

Macroencapsulación, dentro de esta técnica se utiliza una cantidad significativa de PCM estos materiales pueden envasarse en un recipiente como tubos, esferas y paneles para su futuro uso en elementos de construcción. La macroencapsulación tiene sus ventajas como facilidad en enviar y manejar, mejora la compatibilidad del PCM y su entorno, reduce los cambios de volumen

externo que son importantes para la aplicación. Dentro de las desventajas al utilizar la macro encapsulación se tiene una mala conductividad térmica, debe protegerse contra la destrucción mientras el edificio está en uso, evitar colocar clavos en paredes, más trabajo en sitio para su integración en los elementos de construcción. Por lo tanto, la encapsulación debe optimizarse para una efectiva tasa de transferencia de calor y al mismo tiempo debería ser resistente a la corrosión.

Los materiales de cambio de fase en forma estable consiste principalmente en la creación de un material compuesto a partir de dos elementos principales un portador y el PCM, el portador es el elemento predominante y tiene la función de actuar como el material que deberá contener tanto PCM como sea posible, por lo general se utilizan materiales porosos, unos de los métodos para lograr un material de cambio de forma estable son la inmersión y la impregnación al vacío de los portadores, (Serrano, 2015).

Actualmente en el mercado hay gran variedad de PCM's sin embargo sus aplicaciones reales son escasas, debido a la falta de información y divulgación sobre ellos. Profundizar un poco en este tema servirá a futuros constructores a convencerse de las ventajas que supone la incorporación de estos materiales para las edificaciones, así como la contribución a la eficiencia energética (Campos, 2010).

Es conveniente mencionar algunos de los productos que ya han sido desarrollados y comercializados hoy en día; (Kalnaes and Jelle, 2015) elaboran una recopilación de algunos productos distribuidos en la actualidad y proveedores, entre ellos se pueden encontrar paneles de materiales ligeros con PCM distribuidos por Dupont, Paneles de Yeso distribuidos por Knauf y BASF, Bloques de concreto con PCM distribuidos por H+H Deuchland, Azulejos de piso con PCM distribuidos por TATE, entre otros; todos ellos con temperaturas de cambio de fase entre los 18 y los 29°C.

2.7. Propiedades mecánicas y térmicas en la incorporación de PCM's en morteros y concretos.

La introducción y selección de un apropiado PCM y sus dosificaciones como agregado en una mezcla de concreto ha mostrado el mejoramiento de propiedades térmicas y estructurales, mostrando ampliamente ventajas en climas templados donde puede haber un almacenamiento de energía (Memon,2014). Según (Lecompte), la introducción de PCM's microencapsulados en concretos y morteros a base de cemento portland reducen su capacidad a los esfuerzos de compresión drásticamente debido a que requieren mayor cantidad de agua que los materiales tradicionales tales como arenas y gravas. También tienen una reducción debido al comportamiento del PCM durante la compresión ya que actúa como un lubricante y concluye que por esfuerzos de compresión no sería una buena opción para los morteros o concretos porque no tendrían una suficiente resistencia para soportar su propio peso por sí mismos. El comportamiento a la resistencia a esfuerzos de flexión presenta los mismos resultados que la resistencia a los esfuerzos de compresión, es decir tiene una reducción a la resistencia en la presencia de PCM's.

2.8. Justificación

Uno de los problemas actuales dentro del sector de la construcción es el consumo desmedido de energía con un total del 30% de participación en el consumo energético (Ali, 2014). Pese a que en la actualidad la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuenta con la capacidad para abastecer el 100% de la demanda energética a la totalidad de los sectores en México, el crecimiento esperado para los próximos años requiere cambiar la forma en la que se produce y consume la energía, garantizando así un desarrollo económico sustentable (Secretaría de Energía, 2011).

Los morteros a base de cemento portland y un agregado constituido por material cambio de fase (PCM) es una buena alternativa para ser implementado en los sistemas constructivos de edificios y viviendas, los usos más frecuentes en la escena de la construcción han sido en muros Trombe, paneles, sistemas de calentamiento subterráneo y plafones. La implementación de este agregado (a base de material cambio de fase a base y un material poroso como portador), puede disminuir la temperatura en el interior de la vivienda, pero se reduce la resistencia a compresión, flexión y baja conductividad térmica, según (Lucas et al., 2010) con la incorporación de un 20 % de la fracción de la arena no afecta considerablemente la resistencia y es posible obtener un mortero que mantenga la resistencia de uno tradicional, teniendo en cuenta que al aumentar el contenido de PCM hay más posibilidades que se presenten grietas por contracción por secado.

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1. Objetivo general

Desarrollar y caracterizar mecánicamente un mortero base cemento portland compuesto con material de cambio de fase (PCM) para su posible aplicación en paneles prefabricados ligeros.

3.2. Objetivos particulares

3.2.1. Obtener material cambio de fase en forma estable (FSPCM) mediante cera de soya y estearato de butilo al impregnarse al vacío en la pomacita.

3.2.2. Obtener los esfuerzos a compresión y flexión de los especímenes contruidos con mezclas de mortero diseñadas previamente y de acuerdo a la normativa del ASTM.

3.2.3. Realizar un análisis y evaluación de las propiedades mecánicas y térmicas, utilizando los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

3.3. Hipótesis

El material de cambio de fase (PCM) aumenta las propiedades mecánicas de un mortero base cemento portland, cuando es incluido de acuerdo a una proporción similar a un mortero tradicional.

IV. METODOLOGÍA

4.1 Materiales

Los materiales utilizados para el desarrollo de esta investigación son los siguientes:

4.1.1 Arena

Las arenas son minerales finos comúnmente con un espesor del orden de 0.1 a 1.0 mm de diámetro. Con frecuencia contienen cierta cantidad de agua, que debe tomarse en consideración al preparar una mezcla de concreto. Las arenas ayudan a llenar los huecos entre agregados más gruesos, reduce la cantidad de porosidad, así como problemas de desintegración debido a congelamiento y descongelamiento repetido. La arena llena prácticamente todo el volumen, mientras que la pasta de cemento llena todos los espacios vacíos entre las partículas de arena. Ya que la arena ocupa tan gran porcentaje del volumen, no es exagerada la importancia de cumplir con exactitud los requisitos de los agregados. Es de importancia primordial obtener una arena limpia, adecuada, con la granulometría apropiada de las partículas.

Muchas arenas de mortero pueden caer dentro de los límites de tamaño individual y porcentajes de peso; sin embargo, los tamaños combinados resultantes pueden ser difíciles de usar en la construcción.

Es deseable una granulometría uniforme que evite los límites de frontera. Son deseables agregados uniformemente graduados porque ellos producen un mortero para aplanado que es fácil de aplicar. Ciertas arenas fuera del límite pueden usarse para el mortero si se hacen modificaciones mientras se efectúan la proporción, y si se usa un método manual para la aplicación; no por medio de máquina. La prueba de la aceptabilidad de cualquier arena es su rendimiento funcional en el aplanado endurecido.

Tabla 4.1. Granulometría de la arena para mortero para aplanado de la capa base (Norma ASTM C33).

Retenido en mallas Estándar USA	Peso acumulado porcentaje retenido	
	Mínimo	Máximo
No.4 (4.75 mm)	-	0
No.8 (2.36 mm)	0	10
No. 16(1.18 mm)	10	40
No. 30(600 µm)	30	65
No. 50 (300 µm)	70	90
No. 100 (150 µm)	95	100
No. 200 (75 µm)	97	100

Es importante recalcar que hay varias razones para especificar los límites de granulometría y el tamaño máximo del agregado, siendo lo más importante su influencia en la trabajabilidad y en el costo. Por ejemplo, las arenas muy gruesas producen mezclas ásperas y difícilmente trabajables, y las arenas muy finas incrementan los requisitos de agua (por lo tanto, incrementan también el requerimiento del cemento para una relación dada de agua/cemento) y resultan antieconómicas; los agregados que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño en particular, producen las mezclas más trabajables y económicas (Kumar y Monteiro, 1998).

4.1.2 Pomacita

Para este estudio se utilizó pomacita disponible a nivel local de una mina superficial ubicada en la cabecera municipal Pedro Escobedo, Qro. entre el ejido San Clemente y la familia Presa. De ella se extrae pomacita de color blanca amarillenta, que se utiliza principalmente en la elaboración de bloques para la construcción. Este material es muy escaso en la región, por lo que tiene un gran potencial de comercialización en la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro.

La roca pomacita, también llamada piedra pómez o ipirita brinda ventajas como ligereza, bajo costo, disponibilidad y aislamiento térmico, esta última característica permite brindar una zona de confort térmico al interior del edificio.

4.1.3 Cemento portland

4.1.3.1 Propiedades del cemento

Los componentes principales en el cemento son: calcio (Ca) y monóxido de silicio (SiO), y los componentes secundarios son: óxido de aluminio (AlO), óxido ferroso (FeO) y yeso (SO_{Ca}-½H₂O). Además de elementos en pequeña proporción: álcalis, que suelen provenir de las impurezas feldespáticas de las arcillas; Magnesia Calcinada (MgO), aportado por arcilla o la caliza, y peligroso por encima de cierto límite (legalmente un 5%) por la lentitud con que se hidrata la magnesia calcinada y la dilatación que la acompaña; Cal libre (CaO), provoca problemas cuando hay exceso en la dosificación, o defecto de cocción o enfriamiento lento de clinker, que también hacen expandir al cemento.

4.1.3.2 Tipos de cemento

Los cementos se conocen por:

Tipo A

Los componentes básicos que definen el tipo de cemento. El consumidor podrá seleccionar, comprar y usar cementos de diferentes tipos, definidos a partir de su composición:

- CPO Cemento portland ordinario
- CPP Cemento portland puzolánico
- CPC Cemento portland compuesto

Tipo B

La resistencia mecánica a la compresión, que establece los valores mínimos y máximos en las clases 20, 30,40 y 30R.

Tabla 4.2. Resistencia mecánica a la compresión a 28 días (IMCYC).

Clase	Resistencia a 28 días(kg/cm ²)		a 3 días
	Mínima	Máxima	Mínima
20	204	408	-
30	306	510	-
40	408	-	-
30 R	306	510	204

Tipo C

Las características especiales de durabilidad ante agentes agresivos como sulfatos, agregados reactivos y calor de hidratación.

- RS, RESISTENCIA A LOS SULFATOS
- BRA, BAJA REACTIVIDAD DE ÁLCALI AGREGADO
- BCH, BAJO CALOR DE HIDRATACIÓN
- B, BLANCO

De acuerdo al respectivo uso al que sea destinado el cemento, deberá de elegirse, el Instituto Mexicano del Cemento y Concreto recomienda el uso como se describe en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Características del cemento. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto (IMCYC).

Producto	Normas de Calidad	Características y campos de aplicación
Cemento Portland Ordinario	NMX-C-414-ONNCCE-1999	El Cemento Portland Ordinario es excelente para construcciones en general, zapatas, columnas, trabes, castillos, dalas, muros, losas, pisos, pavimentos, guarniciones, banquetas, muebles municipales (Bancas, mesas, fuentes, escaleras), etc. Ideal para la elaboración de productos prefabricados (Tabicones, adoquines, bloques, postes de luz, lavaderos, balaustradas, piletas etc.
Cemento Portland Compuesto	NMX-C-414-ONNCCE-1999	Presenta excelente durabilidad en prefabricados para alcantarillados y a los concretos les proporciona una mayor resistencia química y menor desprendimiento de calor. Este cemento es compatible con todos los materiales de construcción convencionales como arenas, gravas, piedras, cantera, mármol, etc.; así como con los pigmentos (preferentemente los que resisten la acción solar) y aditivos, siempre que se usen con los cuidados y dosificaciones que recomienden sus fabricantes.
Cemento Portland Puzolánico	NMX-C-414-ONNCCE-1999	Ideal para la construcción de zapatas, pisos, columnas, castillos, dalas, muros, losas, pavimentos, guarniciones, banquetas, muebles municipales (Bancas, mesas, fuentes, escaleras), etc. Especialmente diseñado para la construcción sobre suelos salinos. El mejor para obras expuestas a ambientes químicamente agresivos. Alta durabilidad en prefabricados para alcantarillados como pozos de visita, coladeras pluviales, registros y tubería para drenaje.
Cemento Portland Ordinario Blanco	NMX-C-414-ONNCCE-1999	Excelente para obras ornamentales o arquitectónicas como fachadas, monumentos, lápidas, barandales, escaleras, etc. Gran rendimiento en la producción de mosaicos, terrazos, balaustradas, lavaderos, W.C. rurales, tirol, pegazulejo, junte adores, etc. En fachadas y recubrimiento de muros, ahorra gastos de repintado. Este producto puede pigmentarse con facilidad; para obtener el color deseado se puede mezclar con los materiales de construcción convencionales, siempre y cuando estén libres de impurezas. Por su alta resistencia a la compresión tiene los mismos usos estructurales que el cemento gris.
Cemento Portland Ordinario Resistente a los Sulfatos	NMX-C-414-ONNCCE-1999	El Cemento Portland Ordinario Resistente a los sulfatos proporciona mayor resistencia química para concretos en contacto con aguas o suelos agresivos (como sales) recomendable para la construcción de presas, drenajes municipales y todo tipo de obras subterráneas.
Cemento para albañilería (Mortero)	NMX-C-021-ONNCCE-2004	Diseñado especialmente para trabajos de albañilería: junteo o pegado de bloques, tabiques, ladrillos, piedra y mampostería; aplanado, entortado, enjarres, repellados y resanes; firmes, plantillas y banquetas. No debe utilizarse en la construcción de elementos estructurales.

4.1.3.3 Tipo de cemento utilizado

El cemento utilizado en todas las dosificaciones fue un cemento CPC 30R (Moctezuma). Este cemento está elaborado principalmente con Clinker gris, yeso natural, y otros materiales naturales estrictamente seleccionados. Este cemento corresponde a la clasificación de CPC (Cemento Portland Compuesto) de la actual norma mexicana para cementos en México, NMX-C-414-ONNCCE. El nivel de resistencia a la compresión del CPC 30R, sobrepasa los límites mínimos de la clase resistente 30 de la norma mencionada esto según el proveedor.

Tabla 4.4. Resistencia a la compresión del cemento Moctezuma CPC 30R.

	3 días	28 días	
	Mín.	Mín.	Máy.
CPC 30R	204 kg/cm ²	306 kg/cm ²	510 kg/cm ²

El cemento CPC 30 R/RS es muy adecuado para obras de concreto armado en las que se requiere un endurecimiento más rápido de lo normal, así como resistencia a los sulfatos.

El Cemento Portland Compuesto (CPC 30 R/RS) confiere una mayor protección contra la corrosión metálica a las armaduras, gracias a su formulación. Por ello, su uso es recomendable para concreto pretensado y en ambientes agresivos en sulfatos.

Se recomienda para el colado de elementos estructurales sujetos a ambientes agresivos en sulfatos (aguas negras, marinas y suelos salitrosos).

4.1.4 FSPCM (Form Stable Phase Change Material)

Los materiales cambio de fase son una de las formas más eficientes de almacenamiento térmico, se conocen internacionalmente por su acrónimo PCM Phase Change Material. Estos materiales mantienen constante la temperatura durante el cambio de fase mientras que el material almacena o cede energía. Su uso está ligado al de las energías renovables para ajustar los periodos de suministro a los de demanda.

En base a los materiales mayormente utilizados, se ha adoptado por la comunidad científica una única clasificación de los distintos materiales cambio de fase PCM's lo cual involucra tres principales tipo (orgánicos, inorgánicos y eutécticos).

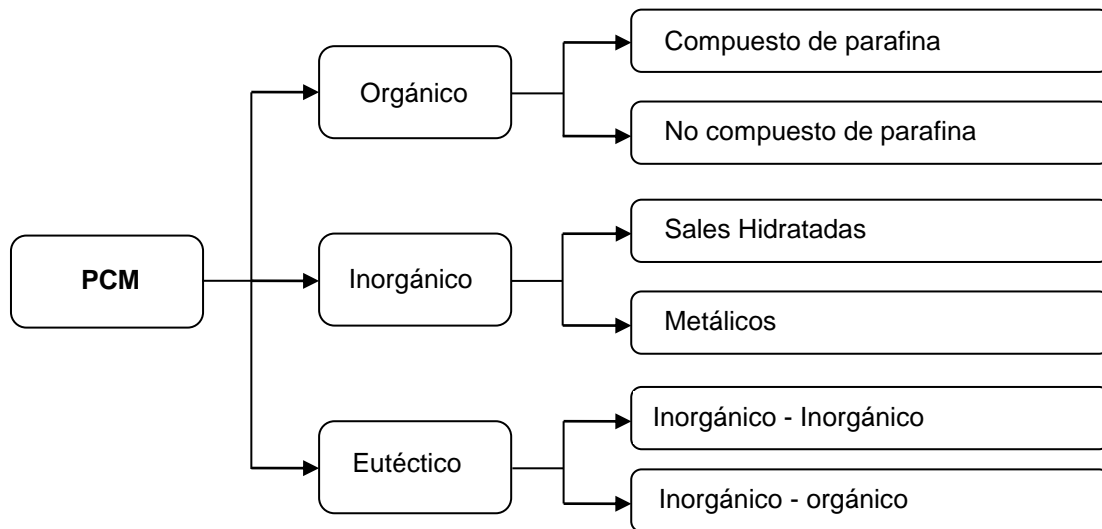


Figura 4.1. Clasificación de los distintos tipos de PCM's implementados en la Construcción.

En este trabajo de investigación se utilizará PCM de tipo orgánico, los cuales poseen unas características que los hacen muy útiles en su aplicación en determinados elementos constructivos para almacenamiento de calor latente. Los materiales considerados fueron pomacita triturada como portador, una mezcla de estearato de butilo y cera de soya como materiales de cambio de fase. El

estearato de butilo y la cera de soya fueron adquiridos en MEX-OCHEM S.A. DE C.V. y Natural Aromatic Candles respectivamente.

4.1.5 Agua

En general, el agua de mezclado raramente es un factor en la resistencia del concreto, porque en muchas especificaciones para elaborar mezclas de concreto, la calidad del agua está protegida por la cláusula que establece que el agua deberá ser adecuada para el consumo humano. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las impurezas en el agua utilizada para mezclar el concreto, cuando son excesivas, pueden afectar no sólo la resistencia del mortero si no también al tiempo de fraguado.

Durante el proceso de fraguado y primer endurecimiento del mortero, el agua tiene por objeto:

- Evitar la desecación
- Mejorar la hidratación del cemento
- Impedir una retracción prematura

4.2 Métodos

A continuación, se describe de manera breve y clara 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.

4.2.1 Caracterización física de la arena y pomacita

4.2.1.1. Cuarteo de muestras

Según NMX-C-170-ONNCCE-1997, el objeto de esta prueba es determinar los procedimientos para reducir las muestras de agregados obtenidas previamente en campo y se conserven representativas como la muestra de campo. Estos métodos son aplicables a muestras que son relativamente homogéneos.

Se coloca la muestra de campo sobre una superficie plana, donde no pueda haber pérdida de material o contaminación con otras materias ajenas a esta. Se mezcla el material completamente al traspalear manualmente toda la muestra en una pila cónica, depositando cada paleada sobre la anterior. Por medio de la pala se ejerce presión sobre el vértice, se aplana con cuidado la pila hasta que se obtenga un espesor y un diámetro uniformes, cuidando de que cada sector que abarque una cuarta parte de la pila resultante no se mezcle con los otros. El diámetro debe de ser aproximadamente de cuatro a ocho veces el espesor. Se divide la pila aplanada en cuatro partes iguales con la pala o la cuchara de albañil y se eliminan dos de las partes diagonalmente opuestas, incluyendo todo el material fino cepillando los espacios vacíos para limpiarlos. Se mezcla el material restante y se cuarteo sucesivamente hasta reducir la muestra al tamaño requerido para las pruebas.



Figura 4.2. Cuarteo representativo de muestras arena y pomacita para pruebas preliminares

4.2.1.2. Granulometría

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 y pomacita de diferentes tamaños por medio de cribas. Para esto se utilizan mallas con distintas aberturas desde la malla No.4 hasta la No.200.

Al inicio se toman aproximadamente 200 g de arena para corregir la distribución de interés por humedad, es decir, se obtiene el porcentaje de humedad al momento de realizar la prueba de granulometría. Posteriormente, se toman 500 g de muestra para realizar la prueba de granulometría, que se colocan en un vaso de aluminio, dejándola saturar durante 24hrs. Después de saturar el material, lo lavamos agitando con una varilla en forma de ocho durante 15s, lo dejamos reposar durante 30s y decantamos el agua a través de la malla No.200. Agregamos agua y repetimos el proceso anterior hasta que el agua que pase por la malla salga lo más limpia posible. El material que se retuvo en la malla No.200 se lava y se regresa al vaso, con el fin de no perder partículas durante el lavado.

Posteriormente el agua sobrante del vaso se decanta, con el cuidado de no tirar arena, para ponerlo después a secar a la parrilla, ya sea en el mismo vaso o en una charola redonda. El secado se hará a fuego lento o bien en el horno durante 24hrs a 100°C. El peso de la muestra seca y lavada se determina, se vacía el material en las mallas previamente colocadas en columna empezando por la de abertura mayor.

Se procede con el cribado agitando la columna ya sea en forma manual o con vibrador automático, para terminar con un cribado manual en cada malla por separado. Las fracciones obtenidas se pesan y se elabora una tabla para determinar los tamaños y los porcentajes de los retenidos de material. Al estar

cribando se procura tener cuidado de no tirar las partículas de la muestra para evitar errores en los pesos retenidos.



Figura 4.3. Tamices para prueba de granulometría de la arena según norma ASTM C136-01

4.2.1.3 Contenido de materia orgánica

Según NMX-C- 088-1997-ONNCCE, la cantidad de materia orgánica es una medición cualitativa del contenido de materia orgánica en una muestra de arena basado en un color base establecido y a partir de este se define si el material tiene o no contenido de materia orgánica.

Se preparan la solución al 2% de ácido tánico la cual contiene 10 c.c. de alcohol, 2 gramos de ácido tánico y 90 c.c. de agua, y la solución al 3% de NaOH con 9 gramos de NaOH y 300 c.c. de agua. Una vez preparadas estas soluciones se realiza la muestra patrón con 97.5 c.c. de solución al 3% de NaOH y 2.5 c.c. de solución al 2% de ácido tánico.

Una vez preparada la solución del color patrón, se introduce en el biberón 4 onzas de agregado ligero que pasen la malla No.4, se agrega la solución al 3% de

hidróxido de sodio hasta que el volumen del agregado y la solución se aproxime a 7.5 onzas, después agitarse vigorosamente. Se tapa la botella y se deja reposar 24 hrs.

Se determina la coloración de la muestra de la arena con la solución al 3% de hidróxido de sodio al compararla con la muestra patrón y se notara si es más clara, igual o más oscura. Si los colores son iguales a simple vista se considera que el contenido de materia orgánica es similar entre la muestra y la solución de patrón. Si el color es más claro que del patrón, se considera que el contenido de materia orgánica es bajo, y si es más oscuro la solución de medida tiene un excesivo contenido de materia orgánica.

4.2.1.4 Módulo de finura.

De acuerdo a NMX-C-111-ONNCCE-2004, el módulo de finura es la suma de los porcentajes retenidos acumulados a partir de la malla No.4 (4.75 mm) hasta la malla No.100 (0.150 mm) divididos entre cien, aplicable solo para agregado fino.

4.2.1.5 Peso volumétrico seco compacto

Según NMX-C-073-ONNCCE-2004, el peso volumétrico seco compacto se define como la cantidad en peso de un material compactado por metro cubico, dicha prueba se realiza con el objeto de encontrar el peso volumétrico seco compacto de los materiales de estudio como la arena y la pomacita (Kg/m^3), utilizando un recipiente metálico con peso y volumen conocido.

Se toma una muestra de agregado de acuerdo con el método de cuarteo descrito anteriormente, el recipiente se llena hasta un tercio de su volumen y la superficie se nivela con los ledos, una vez realizado se compacta con la varilla punta de bala dándole 25 penetraciones distribuidas uniformemente sobre la

superficie, evitando no tritular las partículas del agregado, a continuación se agrega material a las dos terceras parte de su volumen y se compacta con 25 golpes y después hasta llenar el recipiente y se enrasa mediante una operación de corte horizontal con una regla metálica

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/m^3).

4.2.1.6. Peso volumétrico seco suelto

De acuerdo a NMX-C-073-ONNCCE-2004, el peso volumétrico seco suelto, el recipiente se llena hasta que el nivel del agregado sobrepasa el borde sin que se derrame por medio de un cucharón, para esto se deja caer el agregado de una altura no mayor de 50 mm sobre el borde del recipiente, el enrase se hace de la misma forma descrita en el procedimiento del peso volumétrica seco compacto. Se calcula la masa neta del agregado en kg, contenida en el recipiente y se divide entre el volumen total del recipiente, obteniendo el peso volumétrico seco suelto (kg/cm^3).

La fórmula empleada para obtener el peso volumétrico suelto compacto y el peso volumétrico seco suelto.

$$PVSS(PVSC) = \frac{Pm}{Vr} \times 1000, \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

PVSS = Peso volumétrico seco suelto (Kg/m^3)

PVSC = Peso volumétrico seco compacto (Kg/m^3)

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

Vr = Volumen del recipiente (lt)

4.2.1.7. Porcentaje de absorción

Acorde a NMX-C-165–ONNCCE-2004, el porcentaje de absorción se define como el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante 24 horas a temperatura ambiente, este aumento de masa es debido al agua que se introduce en los poros del material. Esta prueba tiene por objeto obtener los pesos específicos relativos y absorción de la arena por métodos físicos.

Se toma una muestra de agregado fino, una vez realizado el cuarteo descrito anteriormente, se tomará una muestra representativa de 2000 gr de agregado que pase la malla No. 4, una vez hecho esto se satura el agregado durante 24 horas en una charola rectangular.

Después de cumplir las 24 hrs, decantar el exceso de agua cuidando la pérdida de finos después la charola se coloca sobre la parrilla para evaporar el agua excedente de la arena por ebullición, remover el material de la charola constantemente con la espátula con el fin de evitar la calcinación de las partículas finas. Esta operación se continua hasta que se acerque a la condición de saturado superficialmente seco (S.S.S.).



Figura 4.4 Material en condición S.S.S. para prueba de absorción y densidad
NMX-C-165-ONNCCE-2004

Una vez teniendo la arena en condición S.S.S. se fija el molde tronco cono con una mano bajo una superficie lisa, no absorbente y llenar con una porción del agregado hasta que sobrepase el borde superior del molde se compacta por la masa propia del pisón compactando la muestra 25 veces sin altura de caída.

A continuación, levantar el molde tronco-cono verticalmente, si el agregado conserva la forma del molde indica que el material hay presencia de exceso de humedad, continuar revolviendo la muestra y evaporando, se repite el procedimiento hasta que el agregado obtenga la condición de saturado y superficialmente seco (S.S.S.), la cual se identificara cuando al retirar el molde tronco-cono el material de la muestra se disgrega un poco perdiendo parcialmente su forma.

Tomar una muestra con una masa de 200 gr en condición S.S.S., se seca en el horno de secado a una temperatura de 100°C, dejar enfriar la muestra a temperatura ambiente y determinar la masa de la muestra seca.

La absorción de la arena se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\%A = \frac{P_w - P_s}{P_s} \times 100 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

%A = porcentaje de absorción de la arena (%);

P_w = Peso húmedo del material en condición S.S.S (gr);

P_s = Peso del material secado al horno (gr).

4.2.1.8. Densidad relativa

Según NMX-C-165-ONNCCE-2004, para la densidad relativa se toma una muestra con un peso no menor a 200 gr en estado S.S.S para realizar la prueba de densidad de la arena. Se colocan aproximadamente 200 gr de muestra de arena en estado S.S.S. en un matraz aforado previamente calibrado, con una capacidad de 500 c.c.

La arena se vacía con un embudo cuidando de no perder material previamente pesado. En el matraz, el contenido de agua se llena a la mitad o menos de su volumen. El matraz se coloca en la bomba de vacío para extraer el aire y después se afora hasta el nivel y se pesa con el material en agua.



Figura 4.5. Arreglo para determinar la densidad de la arena de acuerdo a NMX-C- 165 –ONNCCE-2004

Nuevamente se verifica la temperatura antes de pesar y se revisa si el matraz no está húmedo por dentro, en la parte de afuera y parte superior del nivel de aforo.

La densidad de la arena se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$D = \frac{Ps}{(Ps + PM + Agua) - (PM + m + Agua)} \quad Ec. 3$$

Donde:

D = densidad de la arena;

Ps = Peso del material seco (gr);

PM =Peso del matraz (gr);

Agua = peso del agua (gr);

m = material analizada en condición S.S.S (gr)

4.3. Resultados caracterización de arena

Es de importancia primordial obtener una arena limpia, adecuada, con la granulometría apropiada de las partículas. Los requerimientos de granulometría para agregados finos de las normas ASTM C33 son los mostrados en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Requerimientos de granulometría para agregados finos (ASTM C33).

Malla (mm)	Porcentaje que pasa (%)
No.4 (4.75 mm)	95 – 100
No.8 (2.36 mm)	80 – 100
No. 16(1.18 mm)	50 – 85
No. 30(600 µm)	25 – 60
No. 50 (300 µm)	5 – 30
No. 100 (150 µm)	0 – 10

Para este estudio se utilizó arena disponible a nivel local. La arena se caracterizó bajo las normas ASTM para obtener las propiedades del agregado dentro de la cual se muestra la granulometría en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Granulometría de la arena

Malla (mm)	Porcentaje que pasa (%)
No.4 (4.75 mm)	87.94
No.8 (2.36 mm)	76.24
No. 16(1.18 mm)	60.84
No. 30(600 μ m)	39.96
No. 50 (300 μ m)	18.22
No. 100 (150 μ m)	5.77

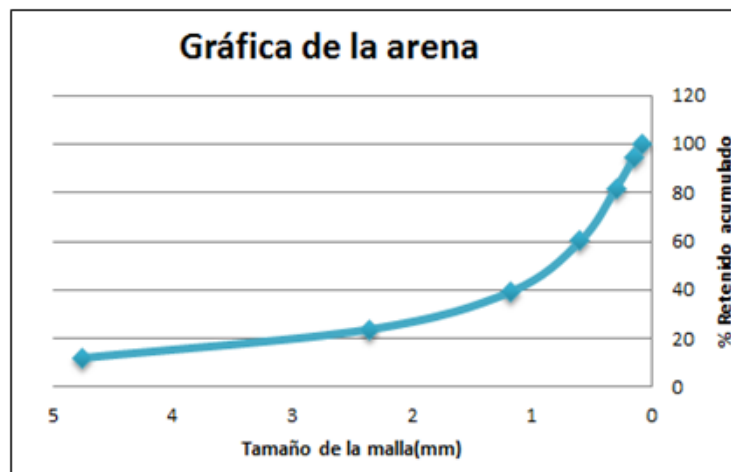


Figura 4.6. Curva granulométrica de la arena

Como se puede observar la arena está dentro de los límites a excepción del porcentaje que pasa la malla No. 4 y No.8 que han quedado ligeramente abajo del límite, por lo que se puede observar se cuenta con una arena gruesa. Según la norma ASTM C33 el módulo de finura para la arena debe estar entre 2.3 y 3.1 lo cual al caracterizar la arena se obtuvo un módulo del 3.1.

La cantidad de materia orgánica mide el índice de contaminación y proporciona en su caso, una advertencia de que son necesarias pruebas antes de su utilización. Según la norma NMX-C88 el color líquido que esta sobre el agregado es más oscuro que el color normalizado, puede considerarse que el agregado bajo prueba contiene compuestos orgánicos en cantidades perjudiciales para los morteros y concretos. El color de la muestra es prácticamente claro por lo tanto se concluye que la arena tiene nula materia orgánica.



Figura 4.7. Índice de materia orgánica contenida en la muestra

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, por lo cual durante el proceso de caracterización de la arena se tiene un valor de 3.11 como módulo de finura lo cual indica que la arena es óptima para ser utilizada para la etapa experimental.

En base a NMX-C-073-ONNCCE-2004, el peso volumétrico seco compacto es la masa de la arena por unidad de volumen, siendo el volumen ocupado por el material en un recipiente; el peso volumétrico seco compacto para la arena fue de 1346.43 kg/m^3 , mientras que peso volumétrico seco suelto fue de 1277.36 kg/m^3 .

La absorción, es el incremento de la masa de la arena cuando es saturado en agua durante un periodo de 24 horas, en cuanto a estos resultados se tiene para la arena un valor de 4.82% según NMX-C- 165 –ONNCCE-2004.

Peso específico relativo (densidad) con base en ASTM C 128 la densidad va del rango de 9.5 y 27 kg/m³, lo cual nos indica que la arena utilizada está en buenas condiciones para ser utilizada debido a que se obtuvo 21.2 kg/cm³.

4.4. Resultados caracterización de pomacita

Según la norma NMX C-299, los agregados ligeros deben cumplir con ciertas especificaciones para poderse utilizar como agregado para concreto estructural, los cuales tienen como objetivo la ligereza de masa y proporcionar buena resistencia a la compresión del concreto. La pomacita está clasificada como agregado natural procesado el cual debe de estar compuesto por materiales inorgánicos, ligeros, vesiculares y granulados. Los requerimientos de granulometría para agregados ligeros según la norma ASTM C330 son los mostrados en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Requisitos granulométricos para los agregados ligeros usados en concreto estructurales.

Tamaño nominal (mm)	25 mm (1 in)	19 mm (3/4 in)	12.5 mm (1/2 in)	9.5 mm (3/8 in)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	300 mm (No. 50)	150 mm (No.100)	75 mm (NO. 200)
Agregado finos:										
4.75 mm a 0				100	85-100		40-80	10-35	5-25	
Agregados gruesos:										
25 mm a 4.75 mm	95-100		25-60		0-10					0-10
19 mm a 4.75 mm	100	90-100		10-50	0-15					0-10
12.5 mm a 4.75 mm		100	90-100	40-80	0-20	0-10				0-10
9.5 mm a 2.36 mm			100	80-100	0-40	0-20	0-10			0-10
Agregados combinados finos y grueso										
12.5 mm a 0		100	95-100		50-80			5-20	2-15	0-10
9.5 mm a 0			100	90-100	65-90	35-65		10-25	5-15	0-10

Tabla 4.8. Requerimientos de granulometría para agregados ligeros (ASTM C330).

Malla (mm)	Porcentaje que pasa (%)
No.4 (4.75 mm)	85 – 100
No.8 (2.36 mm)	-
No. 16(1.18 mm)	40- 80
No. 30(600 µm)	-
No. 50 (300 µm)	10 – 35
No. 100 (150 µm)	5 - 25

Para asegurarse de obtener una uniformidad razonable de la granulometría de entregas sucesivas de agregados ligeros, debe determinarse el módulo de finura en muestras tomadas de las entregas a intervalos estipulados por el comprador.

Tabla 4.9. Granulometría de la pomacita

Malla (mm)	Porcentaje que pasa (%)
No.4 (4.75 mm)	96.79
No.8 (2.36 mm)	-
No. 16(1.18 mm)	32.04
No. 30(600 µm)	-
No. 60 (300 µm)	9.15
No. 100 (150 µm)	3.09

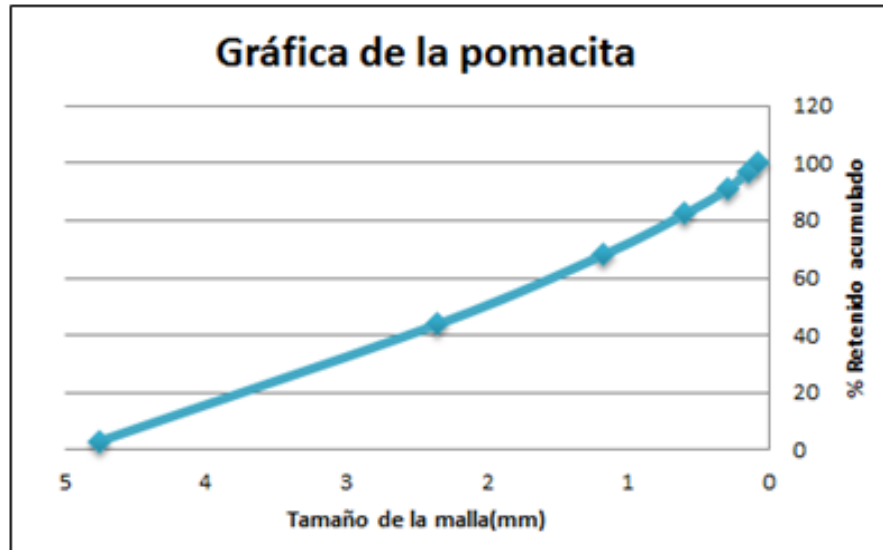


Figura 4.8. Curva granulométrica de la pomacita

El agregado ligero está dentro de los límites a excepción de las mallas No.16 y No.60 los cuales están ligeramente cerca de los límites de frontera y se podría solucionar con una compensación del material.

El módulo de finura es la suma de los porcentajes retenidos acumulados a partir de la malla No. 4 hasta la malla No. 100, aplicable a agregado fino. Según NMX-C-111-ONCCE-2004, indica que el módulo de finura debe estar comprendido entre 2.30 y 3.10, para la pomacita como material ligero se tiene 3.85 como módulo de finura, lo cual nos indica que esta fuera del rango aceptable.

Si el módulo de finura del agregado de cualquier entrega difiere en más de 7% de la muestra suministrada para pruebas de aceptación, debe rechazarse el cargamento de agregados.

En base a los resultados obtenidos en las pruebas de peso volumétrico seco suelto y peso volumétrico seco compacto para la pomacita como material ligero, se obtuvieron como resultados 533.47 kg/m³ para PVSC (peso volumétrico

seco compacto) y 442.10 kg/m^3 para PVSS (peso volumétrico seco suelto), según NMX-C-073-ONNCCE-2004.

El porcentaje de absorción para el material ligero a utilizar fue de 36.71, por lo cual se puede concluir que es un material altamente poroso, ideal para los fines de este trabajo, NMX-C-165-ONCCE-2014 indica que la absorción es el incremento en la masa de un agregado seco, cuando es sumergido en agua durante un periodo de 24 horas.

Según la norma ASTM C 128 para el peso específico relativo para la pomacita como material ligero se tiene una densidad 1.52 gr/cm^3 , se entiende que la densidad de la pomacita sea menor que la de la arena por ser un material ligero.

4.5. Dosificación y preparación de morteros

Los especímenes de mortero fueron elaborados con los materiales descritos anteriormente, elaborando seis muestras con diferentes proporciones.

Los morteros fueron elaborados con diferentes proporciones basada en la Norma ASTM C109/C 109M-02 para elaboración de probetas a compresión, elaborando tres especímenes por cada muestra.

La campaña experimental está basada en 10 especímenes de cada prueba para someterlos a pruebas de resistencia a compresión, módulo de ruptura y conductividad térmica.

Tabla 4.10. Matriz de experimentos

		Resistencia a Compresión	Modulo a la Ruptura (Flexión)	Conductividad Térmica
Patrón CP		10	10	-
Patrón CP-LWA		10	10	-
PCM1	A	10	10	5
	B	10	10	5
PCM2	C	10	10	5
	D	10	10	5

Las muestras PCM1 y PCM2 (Phase Change Material) contienen estearato de butilo, cera de soya y pomacita. La solución PCM1 y PCM2 contienen 1:2.5 pomacita.

Tabla 4.11. Proporción de solución PCM's

	Estearato de butilo (%)	Cera de Soya (%)
PCM1	10	90
PCM2	50	50

La primera muestra "Patrón CP", la cual solo contiene cemento portland y arena, es decir, un mortero común con proporción 1:2.75 elaborado según la norma ASTM C109/C 109M-02. Este mortero será la base de comparación con las siguientes muestras debido a que cambian las proporciones. La segunda muestra "Patron CP-LWA" contiene cemento portland y pomacita (material ligero).

La tercera muestra "PCM1 A" contiene cemento portland, arena y material cambio de fase (PCM1). La cuarta muestra "PCM2 B" contiene cemento portland, arena y PCM2. La quinta muestra "PCM1 C" contiene cemento portland, arena, pomacita y PCM1 y finalmente la sexta muestra contiene cemento portland, arena, pomacita y PCM2.

Tabla 4.12. Proporciones de matriz de experimentos

	CP	Arena	LWA	Agua	PCM1	PCM2
Patrón CP	1	3	-	1	-	-
Patrón CP-LWA	1	-	3	1	-	-
PCM1A	1	2	-	1	1	-
PCM2B	1	2	-	1	-	1
PCM1C	1	1	1	1	1	-
PCM2D	1	1	1	1	-	1

Tabla 4.13. Dosificaciones prueba esfuerzos a compresión

Espécimen	Cemento (gr)	Arena (gr)	Pomacita (gr)	Agua (gr)	PCM1 (gr)	PCM2 (gr)
Patrón CP	45.53	124.17	0.00	37.25		
Patrón CP-WLA	38.38	0.00	104.66	31.40	0.00	0.00
PCM1A	68.55	109.6	0.00	41.13	54.84	0.00
PCM2B	68.55	109.67	0.00	41.13	0.00	54.84
PCM1C	68.55	54.84	54.84	41.13	54.84	0.00
PCM2D	68.55	54.84	54.84	41.13	0.00	54.84

Tabla 4.14. Dosificaciones prueba esfuerzos a flexión

Espécimen	Cemento (gr)	Arena (gr)	Pomacita (gr)	Agua (gr)	PCM1 (gr)	PCM2 (gr)
Patrón CP	148.50	171.45	0.00	40.50	0.00	0.00
Patrón CP-WLA	148.50	0.00	59.67	40.50	0.00	0.00
PCM1A	168.75	114.30	0.00	33.75	36.45	0.00
PCM2B	168.75	114.30	0.00	33.75	0.00	36.45
PCM1C	168.75	57.15	19.89	33.75	36.45	0.00
PCM2D	168.75	57.15	19.89	33.75	0.00	36.45

4.15. Dosificaciones prueba conductividad térmica

Espécimen	Cemento (gr)	Arena (gr)	Pomacita (gr)	Agua (gr)	PCM1 (gr)	PCM2 (gr)
Patrón CP	-	-	-	-	-	-
Patrón CP-WLA	-	-	-	-	-	-
PCM1A	3375.00	2286.00	0.00	675.00	729.00	0.00
PCM2B	3375.00	2286.00	0.00	675.00	0.00	729.00
PCM1C	3375.00	1143.00	397.80	675.00	0.00	729.00
PCM2D	3375.00	1143.00	397.80	675.00	729.00	0.00

4.5.1. Determinación de la cantidad de agua por el método de fluidez

Equipo:

- ✓ Mesa de fluidez
- ✓ Molde tronco-cono de fluidez
- ✓ Vernier
- ✓ Pisón de $\frac{1}{2}$ " X 1" de sección y una longitud de 6".



Figura 4.9. Molde tronco-cono para la determinación de la fluidez de morteros

Procedimiento de prueba

Limpie cuidadosamente la mesa de fluidez y séquela, después colocar el molde tronco-cono para la prueba de fluidez en el centro de la mesa, colocar una capa de mortero de aproximadamente 25 mm de espesor en el molde y apisonar 20 veces con el pisón de madera de $\frac{1}{2}$ " X 1" de sección y una longitud de 6". Luego llene el molde con mortero y apisonar como se especifica para la primera capa, una vez hecho esto se enraza y con una espátula de abanicó al ras de la parte superior del molde.



Figura 4.10. Determinación de fluidez empleando la mesa de fluidez con 25 golpes en 15 segundos

La mesa alrededor del molde se limpia para quitar los residuos que pudieron caer por fuera, teniendo especial cuidado de eliminar el agua alrededor del borde del molde para que estos no afecten la expansión de la mezcla al momento de la prueba. Levante el molde con cuidado con cuidado 1 minuto después de completar la operación del mezclado. Inmediatamente después la mesa se deja caer 25 veces en 15 s. La expansión del mortero se mide con el vernier en cuatro líneas que están marcadas en la mesa con la precisión de un milímetro.

La fluidez es el aumento resultante en la base promedio del diámetro de la masa de mortero, expresado en porcentaje, expresado en porcentaje del diámetro de la base original, para el cálculo de la fluidez de un mortero se calcula a partir del promedio de cuatro lecturas en milímetros, menos el diámetro de la base interior original en milímetros dividido por el diámetro de la base interior original y multiplicado por 100.

Esta prueba está basada en la norma ASTM C1437-01, (Standard Test Method for Flow of of Hydraulic Cement Mortar), la cual indica que se debe tener una fluidez de 110 +/- 5% de acuerdo al diámetro del molde de fluidez.



Figura 4.11. Medición de cuatro diámetros para determinar la fluidez del mortero

Una buena fluidez se logra cuando no se produce segregación apreciable y el material se extiende en el diámetro permitido por los márgenes. El presente mortero tiene como finalidad servir como recubrimiento por lo cual se debe de tener una excelente fluidez para su trabajabilidad. Los datos obtenidos en laboratorio se muestran en la Tabla 4.18, 4.19 y 4.20, donde se observa que en porcentajes mayores de fibra de vidrio es requerida más agua.

Tabla 4.16. Fluidez de mezclas de mortero sometidos a esfuerzos de compresión.

Fluidez especímenes a compresión			
Espécimen	Agua (gr)	Fluidez (cm)	Fluidez (mm)
Patrón CP	400	21.47	214.75
Patrón CP-LWA	425	21.11	211.10
PCM A	258	21.75	217.50
PCM B	285	22.30	223.00
PCM C	250	22.65	226.50
PCM D	235	22.49	224.90

Tabla 4.17. Fluidéz de mezclas de mortero sometidos a esfuerzos de flexión.

Fluidéz especímenes a flexión			
Espécimen	Agua (gr)	Fluidéz (cm)	Fluidéz (mm)
Patrón CP	270	21.07	210.70
Patrón CP-LWA	300	22.50	225.00
PCM A	360	20.87	208.70
PCM B	380	21.50	215.00
PCM C	315	20.92	209.20
PCM D	330	20.85	208.50

Tabla 4.18. Fluidéz de mezclas de mortero – Conductividad térmica.

Fluidéz especímenes a conductividad térmica			
Espécimen	Agua (gr)	Fluidéz (cm)	Fluidéz (mm)
Patrón CP	---	---	---
Patrón CP-LWA	---	---	---
PCM A	4250	21.90	219.00
PCM B	4400	20.95	209.50
PCM C	4000	21.57	215.70
PCM D	4350	20.85	208.5

4.5.2. Prueba resistencia a compresión

La prueba del esfuerzo a compresión se basa en la norma ASTM-C39/C39M-03 (Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens) y en la norma mexicana NMX-c-083-ONNCCE-2014. El esfuerzo a compresión de los morteros se determina por medio de cilindros de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura, teniendo especial cuidado en el correcto cabeceo de los cilindros. Antes de la prueba, los especímenes estuvieron en la cámara de curado durante 14 días.

Los especímenes para la aceptación o rechazo de concreto deben ensayarse a la edad especificada con las siguientes tolerancias.

Tabla 4.19. Tolerancias permisibles para ensaye de especímenes (ASTM C-109)

Edad de ensayo especificada	Tolerancia permisible
24 hrs.	± 0.5 hrs.
3 días	± 2 hrs.
7 días	± 6 hrs.
14 días	± 12 hrs.
28 días	± 20 hrs.
90 días	± 48 hrs.



Figura 4.12. Cabeceo de cilindros para ensaye a compresión



Figura 4.13. Ensayo de cilindros a compresión en maquina universal Tinius Olsen con capacidad de 300 KN

Los especímenes correspondientes a ensayar se retiran del cuarto de curado (en el cual los especímenes tienen una edad de 14 días), se retira el excedente de agua con una franela para que el cilindro quede seco superficialmente y se preparan para el cabeceo. El cabeceo se realiza con azufre para darle una cara regular en las caras tanto inferior como superior, con esto, se asegura que el área de contacto sea uniforme al aplicar la carga.

Los especímenes a ensayar se probarán en una máquina universal Tinius Olsen con capacidad de 300 KN, el error de exactitud en la máquina de ensayo debe ser como máximo de $\pm 3\%$ de la carga aplicada. La máquina debe calibrarse o verificarse antes de ser puesta en operación. La carga debe controlarse para que sea aplicada a velocidad constante ya que un cambio brusco puede ocasionar distorsión en las lecturas. Una vez ensayados los cilindros se registra la carga máxima y con la carga obtenida se calcula el esfuerzo a compresión en kg/cm^2 .

4.5.3. Prueba resistencia a flexión

Este método de prueba cubre la determinación de la flexión máxima de resistencia en flexión y el límite elástico de secciones de hormigón armado mediante el uso de una viga simple de 1.0 pulg. (25.4 mm) o menos de profundidad. Para el procedimiento experimental se tomó en cuenta lo establecido en la norma ASTM C947. Se fabricaron tiras de mortero reforzadas con fibra con dimensión de 10x50x450 mm. Se procuró que la relación entre la longitud entre apoyos a espesor estuviera en el intervalo de 16 a 30 mm, además la longitud total de la muestra tiene 230 mm entre apoyos.

Se utilizó una máquina universal Tinius Olsen con capacidad de 300 KN para aplicar la carga. el error de exactitud en la máquina de ensayo debe ser como máximo de $\pm 3\%$ de la carga aplicada. La máquina debe calibrarse o verificarse antes de ser puesta en operación. La deflexión en el centro se registró con micrómetros de carátula con precisión de 0.01 mm y una anchura exacta de 0.25 mm. Con tales mediciones se calculó la resistencia última, se utilizó la siguiente ecuación.

$$F_y = \frac{P_y L}{b h}$$

Donde:

F_y = resistencia de fluencia

P_y = fuerza aplicada correspondiente al punto sobre la curva carga-deflexión, donde, la curva se desvía de la zona lineal

L = longitud entre apoyos

b = ancho de la muestra

h = espesor de la muestra



Figura 4.14. Probetas para ensayo a esfuerzos de módulo de ruptura

4.5.4. Conductividad térmica

Se calcula la conductividad térmica del material por el método de la placa caliente, que es un método absoluto o primario de medición de propiedades de transmisión de calor, en régimen estacionario, a través de probetas con forma de placa plana, para calcular sus propiedades de transmisión de calor.

El aparato es para dos probetas y consiste en una fuente caliente constituida por una placa calefactora que comprende una parte central y un anillo de guarda separados por un espacio no mayor de 15 mm. En la figura, la configuración para la determinación de la conductividad térmica en materiales para construcción de acuerdo con la norma ASTM C 177-85. Las probetas de la muestra a medir se colocan justo en medio de las placas frías y la placa caliente.

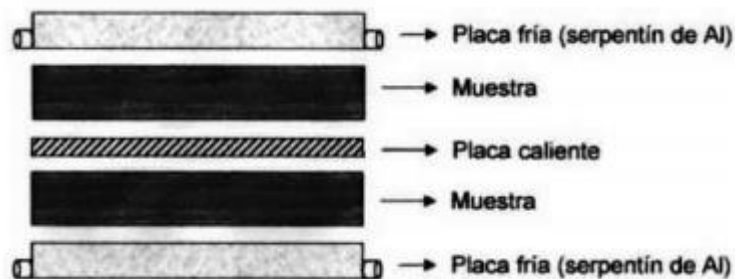


Figura 4.15. Configuración experimental del aparato de placa caliente.

Determinación de la conductividad térmica.

La conductividad se determina una vez que el equipo alcanzó el estado estacionario de transferencia de calor, cuando las temperaturas de ambas caras de la muestra no varían más. Los datos necesarios para el cálculo de la conductividad térmica son la diferencia de temperatura entre ambas caras, la potencia eléctrica suministrada a la resistencia del área de medición, el área de medición y el espesor de la muestra. De acuerdo con la Ley de Fourier para la conducción de calor, una vez que se ha alcanzado el régimen permanente, la velocidad de transmisión calorífica a través de una pared es:

$$q = -k * A * \left(\frac{dt}{dx} \right) \quad \text{Ec.4}$$

donde q es la velocidad de transmisión del calor a lo largo del espesor, en (cal/s), k es la conductividad térmica del material en (cal / m * s * °C), A es el área del material, perpendicular al flujo del calor, en (m²), dt la diferencia de temperatura entre la cara fría y la cara caliente, en (°C) y dx es el espesor en la dirección x, en (m).

De esta fórmula se despeja el coeficiente de conductividad térmica k, y se calcula en función de los parámetros ya vistos. La conductividad térmica se determina mediante la siguiente expresión:

$$k = \frac{e * \frac{1}{2} P}{\Delta t * A} \quad \text{Ec.5}$$

donde k es la conductividad térmica del material, en (watt / °C * m), e el espesor de la probeta, en (m), P la potencia eléctrica suministrada, en (watts) y Δt = diferencia de temperatura entre la cara fría y la caliente, en (°C).



Figura 4.16. Construcción de probetas de ensaye por conductividad térmica.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se mostrarán los resultados de ensayos de resistencia a la compresión y flexión con los que se discutirán los resultados.

5.1 Resultados de ensaye a esfuerzos de compresión

En la tabla 5.1. se pueden examinar los resultados de los ensayos debido a esfuerzos de compresión. Las resistencias promedio fueron diversas respecto a la muestra patrón CP debido a las distintas dosificaciones de PCM en las mezclas de mortero.

Tabla 5.1. Resultados de ensaye resistencia a esfuerzos de compresión

Muestra	Carga máxima promedio(kg-f)	Resistencia a compresión promedio (kg/cm ²)
Patrón CP	3369.14	171.68
Patrón CP-LWA	182.53	9.30
PCM1A	637.32	32.48
PCM2B	500.68	25.52
PCM1C	1557.11	79.34
PCM2D	1122.71	57.22

La mezcla Patrón CP muestra una resistencia promedio sobresaliente debido a que contiene proporciones de sus agregados comunes ya controlados. Destacando la mezcla PCM1C prometiendo una resistencia a esfuerzos de compresión promedio de 79.34 kg/cm² y una desviación estándar de 7.83kg/cm² la cual podría ser comparada con la resistencia de diseño a compresión de morteros tradicionales tipo II según las (NTC-CDMX, 2017) con resistencia a compresión menor que la del tipo I (125 kg/cm²) y mayor o igual que 75kg/cm². Los resultados obtenidos durante el proceso de experimentación tienden a ser resultados bajos debido al uso de PCM los cuales están comprometidos según previas

investigaciones desarrolladas sobre el uso de PCM en morteros y concretos reportando bajas resistencias a esfuerzos de compresión.



Figura 5.1 Ensayo de probetas a esfuerzos de compresion

5.2 Resultados de ensayo a flexión pura

Los resultados del ensayo a flexión pura para los especímenes de 1x5x45 cm se presentan en la tabla 5.2, en la cual se pueden contrastar el esfuerzo de fluencia promedio, el esfuerzo máximo promedio y el módulo de elasticidad a flexión de las diferentes muestras de mortero.

El espécimen patrón CP el cual presentó un esfuerzo de fluencia promedio de 1.63 MPa comparada con la probeta con mejores resultados a esfuerzos de flexión fue PCM1C con 3.58 MPa. En relación al esfuerzo máximo promedio se observan resultados semejantes para todos los especímenes que van desde 5.5 MPa hasta 6.53 MPa para los especímenes PCM2D y Patrón CP respectivamente.

Para el módulo de elasticidad a flexión el espécimen PCM1C registro un valor de 11.93 GPa como módulo de elasticidad a flexión y también fue la que registro el mayor esfuerzo a flexión.

Tabla 5.2 Resultados del módulo de ruptura

Muestra	Esfuerzo máximo Promedio (MPa)	Esfuerzo de Fluencia Promedio (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
Patrón CP	6.53	1.63	9.79
Patrón CP-LWA	5.92	2.11	10.41
PCM1C	6.36	3.58	11.93
PCM2D	5.5	2.96	13.34



Figura 5.2 Ensayo de flexion

En la figura 5.3 se observa una grafia del ensayo a esfuerzos de flexión pura de uno de los especimenes, puede observarse el punto donde hay un cambio de pendiente, el cual indica la fluencia del material y se puede asociar a un agrietamiento tenue del mortero sin colapsar el espécimen debido a que tiene una malla de refuerzo de fibra. Además, se puede observar el punto máximo

correspondiente al esfuerzo máximo por flexión, en este estado la probeta presenta las grietas inducidas que están a lo largo de todo el espesor y tienen un ancho aproximado de 1 a 2 mm.

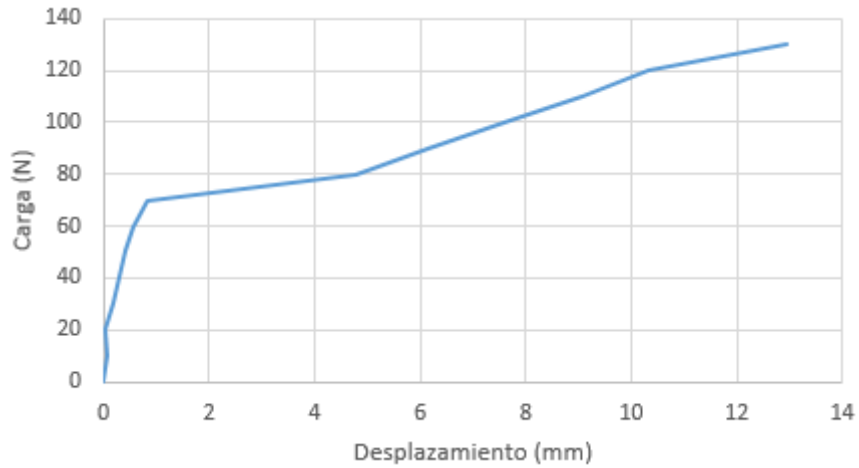


Figura 5.3 Grafica desplazamiento vs carga de ensayo a módulo de ruptura

VI. CONCLUSIONES

De las muestras analizadas y hasta los ensayos realizados podemos concluir que:

De las muestras analizadas y dosificaciones mencionadas anteriormente, se puede observar que la mezcla PCM1C, la cual, se comporta mecánicamente mejor comparada con las demás muestras que contiene material cambio de fase.

La mezcla PCM1C la cual al sustituir el 20% de FSPCM y 20% de material ligero en la mezcla Patrón CP, presentó un resultado a ensayo de esfuerzo a compresión de 79.34 kg/cm^2 comparando con la resistencia de diseño de 75 kg/cm^2 de un mortero tradicional tipo II según las (NTC-CDMEX,2017).

Se mejora la resistencia a esfuerzos de flexión en la muestra PCM1C respecto a la muestra Patrón CP, lo cual indica que dicho mortero mejora su propiedad mecánica al agregar el material cambio de fase debido a que se incrementa el esfuerzo de fluencia en la mezcla.

Si se escogiera una sola dosificación podría inclinarse por la mezcla PCM1C ya que presentó las mejores propiedades mecánicas de ensayo, la cual, puede ser comparada con un mortero tradicional tipo II. Sin embargo, se requiere mayor investigación con nuevas proporciones aglutinante-PCM-agregado inerte o con material PCM modificado superficialmente para mejorar la adherencia entre las partículas y la pasta de cemento portland o cualquier otro aglutinante. Además, se requiere concluir con la experimentación relacionada con la medición del coeficiente de conducción térmica (k , watt/mK°) para cada una de las proporciones propuestas, y así elegir la mejor proporción, la cual, muestre mejores propiedades mecánicas y de conducción térmica.

VII. LITERATURA CITADA

- Adm. Pública CDMX. (2017). Ntccdmx-17, (220). Retrieved from <https://www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf>
- Ali, S. (2014). Phase change materials integrated in building walls : A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 870–906. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.042>
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(9), 1361–1368. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>
- Bentz, D. P., & Turpin, R. (2007). Potential application of phase change materials in concrete technology. *Cement & Concrete Composites*.
- Bernal, Vladimir. (2008). Efecto de la ceniza volante en morteros fabricados con cemento Pórtland. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro, México.
- Campos, S. (2010). Incorporación de PCM en elementos constructivos para la mejora energética. Tesis de doctorado. Universidad politécnica de Catalunya.
- Cobrerros, Carlos. (2015). Paneles prefabricados termo-acústicos para vivienda industrializada a partir de paja de cereal y tierra estabilizada. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro, México
- Conshohocken, W. (1999). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete 1, 04, 4–7.
- Haurie, L., Mazo, J., Delgado, M., & Zalba, B. (2014). Fire behaviour of a mortar with different mass fractions of phase change material for use in radiant floor systems. *Energy & Buildings*, 84, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.026>
- Hernández, J. (2006). Construcción experimental con elementos prefabricados y aislantes térmicos para edificaciones de bajo costo. Tesis de doctorado. Santa Cruz Xotocotlán, Oaxaca.
- Kalnaes, S. E., & Jelle, B. P. (2015). Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, 94(7491), 150–176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.023>

- Konuklu, Y., Ostry, M., Paksoy, H. O., & Charvat, P. (2015). Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications. *Energy and Buildings*, 106, 134–155. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.019>
- Kumar Mehta P. y J.M. 1998 Monteiro Paulo. “Concreto estructura, propiedades y materiales”. Primera edición 1998. Instituto Mexicano del Cemento y de Concreto, A.C
- La, C. D. E., Edificación, C. Y., mexicana, N., Para, R., Pruebas, L. A. S., Requerido, T., ... Estructurales, Y. S. (1998). Organismo Nacional De Normalización Y “ Building Industry - Aggregates - Reducing Field Samples of.
- Lecompte, T., Le Bideau, P., Glouannec, P., Nortershauser, D., & Le Masson, S. (2015). Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material. *Energy and Buildings*, 94, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.044>
- Ling, T. C., & Poon, C. S. (2013). Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 46, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.031>
- Lucas, S., Pires, F., Felix, M., Aguilar, J., Barroso, V., & Braganca, L. (2010). Application of latent heat thermal energy storage in cement mortars. Proceedings of the third international world of construction project management conference.
- Martinez, D. (2012). Desarrollo de un mortero con vidrio reciclado y fibra de refuerzo para recubrimiento interno de horno artesanal para cocido de tabique de arcilla. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Memon, S. A., Cui, H. Z., Zhang, H., & Xing, F. (2015). Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete. *Applied Energy*, 139, 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.022>
- Normas, D. G. D. E. (1987). FOMENTO INDUSTRIAL NORMA MEXICANA NMX-C-299-1987 AGREGADOS LIGEROS BUILDING INDUSTRY-STRUCTURAL CONCRETE-LIGHWEIGHT.
- Normas, D. G. D. E. (1997, March 19). Determinación de impurezas organicas en el agregado fino. NMX-C-088-1997-ONNCCE, pp. 1–4.

- Normas, D. G. D. E. (2004, March 1). Fomento industrial Norma Mexicana NMX-C-073-ONNCCE-2004 Agregados, masa volumétrica y método de prueba. NMX-C-073-ONNCCE, pp. 1–8.
- Normas, D. G. D. E. (2004, July 27). NMX C 111 ONNCCE 2004 Agregado para concreto hidráulico. NMX-C-111-ONNCCE-2004, pp. 1–19.
- Normas, D. G. D. E. (2014, November 7). Norma Mexicana Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso. NMX-C-164-ONNCCE-2014, pp. 1–11.
- Oliver, A., Neila, F. J., & García-Santos, A. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de Construcción*, 62(305), 131–140. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.58010>
- Quezada, M. (2017). Análisis de transporte de calor a través de un sistema constructivo con cambio de fase. Tesis de maestría. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Reyes, J.L., 2014. Panel prefabricado termoacústico para vivienda industrializada basado en biocompuesto arcilloso estabilizado con cal y puzolanas provenientes de residuos agrícolas y reforzados con paja de cereal. Querétaro, México
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Sierra, José Carlos, 2018. Desarrollo y caracterización de agregado almacenador de calor. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Specification, S. (n.d.). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units 1, 04, 5–8. <https://doi.org/10.1520/C0331>
- Serrano, Jimena. 2015. Plásticos prefabricados para la construcción de vivienda de interés social. Distrito Federal.
- Ukrainczyk, N., Kurajica, S., & Šipušia, J. (2010). Thermophysical Comparison of Five Commercial Paraffin Waxes as Latent Heat Storage Materials. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 24(2), 129–137.

APÉNDICE

APÉNDICE

Durante la etapa de caracterización de los agregados finos para un mortero se utilizó arena y pomacita. Dentro de la caracterización se obtuvo peso volumétrico seco suelto, peso volumétrico seco compacto, densidad, absorción, granulometría, módulo de finura y contenido de materia orgánica.

Tabla A.1. Peso volumétrico Seco Suelto (P.V.S.S.) kg/m³ para la arena

Peso volumétrico Seco Suelto (P.V.S.S.) kg/m ³							
Peso del recipiente más material (kg)	Peso del recipiente (kg)	Peso neto del material (kg)	Volumen del recipiente (lt)	Volumen del recipiente (m ³)	PVSH (kg/m ³)	w (%)	P.V.S.S (kg/m ³)
5.553	1.831	3.722	2.876	0.002876	1294.159	0.908	1282.511
5.514	1.831	3.682	2.876	0.002876	1280.424	0.908	1268.900
5.539	1.831	3.708	2.876	0.002876	1289.291	0.908	1277.687
					1287.958	Promedio	1276.366

Tabla A.2. Peso volumétrico Seco compacto (P.V.S.S.) kg/m³ para la arena

Peso volumétrico Seco Compacto (P.V.S.C.) kg/m ³							
Peso del recipiente más material (kg)	Peso del recipiente (kg)	Peso neto del material (kg)	Volumen del recipiente (lt)	Volumen del recipiente (m ³)	P.V.S.H. (kg/m ³)	w (%)	P.V.S.C (kg/m ³)
5.750	1.831	3.918	2.876	0.002876	1362.483	0.908	1350.220
5.743	1.831	3.911	2.876	0.002876	1360.049	0.908	1347.808
5.724	1.831	3.892	2.876	0.002876	1353.442	0.908	1341.261
					1358.658	Promedio	1346.430

Tabla A.3. Absorción para la arena

Absorción de la arena		
Peso húmedo en S.S.S (gr)	Peso seco constante (gr)	Absorción(%)
200	190.8	4.82

Tabla A.4. Densidad para la arena

Densidad de la arena				
Peso matraz (PM)	Peso de la muestra Ph (gr)	Peso del matraz con agua Pi (gr)	Peso del matraz + agua+ arena (P2)	Densidad arena (gr/cm ³)
209	200	697.7	803.4	2.12

Tabla A.5. Granulometría para la arena

Granulometría de arena				
Numero de malla	Retenido (gr)	% retenido parcial	% retenido acumulado	% que pasa
4	53.1	12.06	12.06	87.94
8	51.5	11.70	23.76	76.24
16	67.8	15.40	39.16	60.84
30	91.9	20.88	60.04	39.96
60	95.7	21.74	81.78	18.22
100	54.8	12.45	94.23	5.77
200	25.4	5.77	100.00	0.00
Suma	440.2	----	----	----
Charola	421	----	----	----
Suma	861.2	----	----	----

Tabla A.6. Peso volumétrico seco suelto (P.V.S.S.) kg/m³ para la pomacita

Peso volumétrico Seco Suelto (P.V.S.S.) kg/m ³							
Peso del recipiente más material (kg)	Peso del recipiente (kg)	Peso neto del material (kg)	Volumen del recipiente (lt)	Volumen del recipiente (m ³)	PVSH (kg/m ³)	w (%)	P.V.S.S (kg/m ³)
3.055	1.831	1.223	2.876	0.002876	425.417	1.678	418.398
3.137	1.831	1.305	2.876	0.002876	453.929	1.678	446.439
3.181	1.831	1.349	2.876	0.002876	469.228	1.678	461.486
					449.525	promedio	442.108

Tabla A.7. Peso volumétrico seco compacto
(P.V.S.S.) kg/m³ para la pomacita

Peso volumétrico Seco Compacto (P.V.S.C.) kg/m ³							
Peso del recipiente más material (kg)	Peso del recipiente (kg)	Peso neto del material (kg)	Volumen del recipiente (lt)	Volumen del recipiente (m ³)	P.V.S.H. (kg/m ³)	w (%)	P.V.S.C (kg/m ³)
3.2835	1.831	1.452	2.876	0.002876	504.868	1.678	496.538
3.4655	1.831	1.634	2.876	0.002876	568.150	1.678	558.776
3.4255	1.831	1.594	2.876	0.002876	554.242	1.678	545.097
			promedio		542.420	promedio	533.470

Tabla A.8. Absorción para la arena

Absorción de la pomacita		
Peso húmedo en S.S.S (gr)	Peso seco ó constante (gr)	Absorción(%)
200	146.3	36.71

Tabla A.9. Densidad de la Pomacita

Densidad de la Pomacita				
Peso matraz (PM)	Peso de la muestra Ph (gr)	Peso del matraz con agua Pi (gr)	Peso del matraz + agua+ pomacita (P2)	Densidad pomacita (gr/cm ³)
209	200	697.7	766.4	1.52

Tabla A.10. Granulometría para la pomacita

Granulometría de pomacita				
Numero de malla	Retenido (gr)	% retenido parcial	% retenido acumulado	% que pasa
4	13.4	3.21	3.21	96.79
8	169.2	40.52	43.73	56.27
16	101.2	24.23	67.96	32.04
30	59.9	14.34	82.30	17.70
60	35.7	8.55	90.85	9.15
100	25.3	6.06	96.91	3.09
200	12.9	3.09	100.00	0.00
Suma	417.6	----	----	----
Charola	426	----	----	----
Suma	843.6	----	----	----

Para la obtención de las cantidades de material para la elaboración de los morteros se basó en la obtención del peso volumétrico suelto y de esta manera obtener los pesos aproximados de aglomerante y agregados para el mortero, como lo indica la tabla A.11, esto para tener la menor cantidad de desperdicios.

Tabla A.11. Cálculo de dosificación de cilindros a compresión

Materiales	Uni. Volumétricas	Porcentajes (%)	Peso volumétrico (kg)	Volumen del cilindro (cm ³)	Peso material (gr)
Cemento	1	25	3	196.35	147.26
Arena	1	20	1.27	196.35	49.87
LWA	1	20	0.442	196.35	17.36
PCM2	1	20	1.27	196.35	49.87
Agua	1	15	1	196.35	29.45

Para la obtención de dichos pesos se obtuvo primeramente los porcentajes de los agregados, teniendo cuidado con la relación agua-cemento, después se obtuvieron los pesos volumétricos de los materiales, y realizado lo anterior se obtiene el volumen del cilindro (10 cm de altura y 5 cm de diámetro), después solo basta con multiplicar el porcentaje, peso volumétrico y el volumen del cilindro para obtener el peso de cada agregado que constituye el mortero.

A continuación, se muestran tablas para ejemplificar los cálculos para las pruebas de modulo a la ruptura y conductividad térmica.

Tabla A.12. Cálculo de dosificación de probetas a módulo de ruptura

Materiales	Unidades volumétricas	Porcentajes (%)	Peso volumétrico (gr/cm ³)	Volumen del cilindro (cm ³)	Volumen por material.	Peso por cilindro (gr)
Cemento	1	25	3	225.00	56.25	168.75
Arena	1	20	1.27	225.00	45.00	57.15
LWA	1	20	0.442	225.00	45.00	19.89
PCM2	1	20	0.81	225.00	45.00	36.45
Agua	1	15	1	225.00	33.75	33.75

Tabla 3.2 cálculo de dosificación de probetas a conductividad térmica

Materiales	Unidades volumétricas	Porcentajes (%)	Peso volumétrico (gr/cm ³)	volumen (cm ³)	volumen por material.	peso por cilindro (gr)
Cemento	1	25	3	4500.00	1125.00	3375.00
Arena	1	20	1.27	4500.00	900.00	1143.00
LWA	1	20	0.442	4500.00	900.00	397.80
PCM2	1	20	0.81	4500.00	900.00	729.00
Agua	1	15	1	4500.00	675.00	675.00