

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Minas

Maestría en Ingeniería Urbana



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**

Trabajo escrito:

**ESTUDIO DE DEMANDAS ENERGÉTICAS EN VIVIENDA EN BASE
AL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE MEZCLAS ALIGERADAS
EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS.**

**Que para obtener el Grado de Maestría en Ingeniería Urbana
Línea Terminal Construcción**

Presenta

Dalia Rosa Payne Deliz

Directora de Tesis

Dra. Ana Cecilia Borbón Almada

Hermosillo, Sonora

Agosto del 2022

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

MIEMBROS DEL JURADO:



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA
Maestría en Ingeniería Urbana
Opciones Construcción y Valuación

Hermosillo, Sonora 6 de julio de 2022

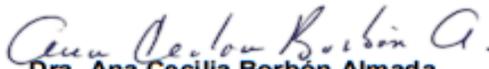
Dr. Jesús Quintana Pacheco
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Urbana
Presente

Por este medio, los abajo firmantes miembros del jurado para llevar a cabo la evaluación en la fase escrita y oral de la **Ing. Payne Deliz Dalia Rosa** con número de expediente **220230124**, que presenta el trabajo de tesis titulado ***"Estudio de demandas energéticas en vivienda en base al comportamiento térmico de mezclas aligeradas en sistemas constructivos"***.

Consideramos que el documento se encuentra listo para ser presentado en la fase oral de esta evaluación.

En espera que se realicen los trámites correspondientes, quedamos a su disposición para cualquier aclaración al respecto.

ATENTAMENTE


Dra. Ana Cecilia Borbón Almada
Directora de Tesis


Dr. Jesús Fernando García Arvizu
Secretario


Dr. Marco Antonio Ramos Corella
Sinodal


M.I. Arturo Duarte Gaxiola
Sinodal

RESUMEN:

En este trabajo se determinan las demandas energéticas en una vivienda económica de tipología tradicional mexicana, donde se estudió el efecto que resulta de la aplicación en diferentes partes de la envolvente constructiva, de morteros cemento arena aligerados con diferentes porcentajes de sustitución de perlita mineral por arena en volumen absoluto. En base a un diseño específico de morteros aligerados existente, que cumplen con propiedades mecánicas de acuerdo a la normatividad mexicana, se procede a estudiar sus propiedades térmicas, por medio de medición de conductividad térmica en laboratorio de muestras en estado seco, utilizando equipos especializados, lo que permite hacer un estudio de la resistencia térmica por metro cuadrado de varios sistemas constructivos de techo y muro propuestos para mejorar la envolvente térmica de la vivienda.

Después de estudiar el comportamiento termo-físico de estos morteros tanto mecánica como térmicamente se decide utilizar estas mezclas en la conformación de sistemas constructivos de sobrelecho y enjarres en diversas combinaciones para estudiar su efecto en la vivienda desde el punto de vista de comportamiento térmico.

Se realizó una simulación térmica utilizando el software DEEVi, donde se determinaron las demandas energéticas de la vivienda dependiendo de las aplicaciones de los morteros aligerados estudiados, para diferentes combinaciones de sistemas constructivos de muros y techos.

Los resultados muestran que las aplicaciones de morteros aligerados en los sistemas constructivos propuestos para la vivienda logran reducir las demandas de energía en esta vivienda hasta un 20 % con respecto al sistema tradicional y que los morteros más útiles fueron los que son de 60% de sustitución para enjarre, mientras que para sobretechos la sustitución de perlita mineral por arena al 100% ofrece los mejores resultados. Además de las reducciones en las demandas de energía se obtuvieron disminuciones de emisiones de CO₂ en la vivienda caso de estudio con respecto al sistema constructivo tradicional.

Palabras claves: perlita mineral, mortero aligerado, resistencia térmica, evaluación energética.

ABSTRACT:

In this work, the energy demands are determined in an economic dwelling of traditional Mexican typology, where the effect resulting from the application in different parts of the constructive envelope, of lightened sand-cement mortars with different percentages of substitution of mineral perlite by sand, was studied. in absolute volume. Based on a specific design of existing lightweight mortars, which comply with mechanical properties according to Mexican regulations, their thermal properties are studied by measuring thermal conductivity in the laboratory of samples in a dry state, using specialized equipment. which allows a study of the thermal resistance per square meter of various roof and wall construction systems proposed to improve the thermal envelope of the house.

After studying the thermo-physical behavior of these mortars, both mechanically and thermally, it was decided to use these mixtures in the conformation of construction systems of screeds and screeds in various combinations to study their effect on the house from the point of view of thermal behavior.

A thermal simulation was carried out using the DEEVi software, where the energy demands of the house were determined depending on the applications of the lightened mortars studied, for different combinations of wall and ceiling construction systems.

The results show that the applications of lightweight mortars in the construction systems proposed for the house manage to reduce the energy demands in this house up to 30% with respect to the traditional system and that the most useful mortars were those with 60% substitution. for screeding, while for ceilings the substitution of mineral perlite for 100% sand offers the best results. In addition to the reductions in energy demands, reductions in CO₂ emissions were obtained from the housing case study with respect to the traditional construction system.

Keywords: mineral perlite, lightweight mortar, thermal resistance, energy evaluation.

DEDICATORIA:

A mis padres por su entrega incondicional, por ser mi motor impulsor, por estar siempre junto a mí.

A mi hermana por ser mi mejor ejemplo en la vida.

A mi esposo por ser mi mayor apoyo y el mejor crítico de mi obra en la vida.

A todos los ingenieros civiles del mundo que con sus conocimientos, esfuerzo y dedicación materializan tantos sueños.

AGRADECIMIENTOS

A el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por apoyarme como becaria de ese prestigioso organismo.

A toda mi familia por ser parte de este proceso de mi superación profesional.

A mis suegros por darme ánimos y apoyo para continuar en este empeño.

A mis amigos, los que han estado más cerca y a los que desde lejos me dieron sus buenos deseos para que continuara realizando este sueño profesional.

A mi profe Jesús Fernando, su esposa Julieta y su familia por acogerme como parte de sus seres queridos y apoyarme en todo momento.

A mis compañeros, profesores y comité académico de la maestría en Ingeniería Urbana de la Universidad de Sonora.

A mi tutora Ana Cecilia Borbón Almada que con paciencia y dedicación siempre me acompañó en este arduo camino.

A mi comité tutorial por sus oportunos y fructíferos comentarios y recomendaciones.

Al Dr. Jesús Quintana Pacheco, coordinador de la maestría en Ingeniería Urbana de la Universidad de Sonora., por su apoyo incondicional y guía en este posgrado.

Al técnico del laboratorio de Ingeniería Civil Martín Alberto Gaxiola Ruiz por su compromiso y dedicación para con este proyecto de investigación.

ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Justificación	3
1.3. Antecedentes	4
1.4. Planteamiento del Problema	6
1.5. Objetivo general	7
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
3. MARCO TEÓRICO	16
3.1. Propiedades de los morteros.....	16
3.2. Características de los materiales que componen los morteros.	17
3.3. Características de los Agregados ligeros.	18
3.4. Sistemas constructivos de losa y muro de bloque de concreto hueco.	20
3.4.1 Losa de vigueta de concreto y casetón de poliestireno	20
3.4.2 Muro de bloques de concreto hueco	22
3.5. Propiedades térmicas de materiales y sistemas constructivos.....	23
3.5.1. Sistemas constructivos homogéneos y no homogéneos.....	23
3.6. Normatividad mexicana para evaluación energética de viviendas	25
3.7. Simulación energética de edificios.	27
3.8. Consumos de energía eléctrica y emisiones de CO ₂	29
4. METODOLOGÍA	31
4.1. Determinación de los morteros a estudiar y sus propiedades físicas.	31
4.2. Medición de conductividad térmica.....	32
4.3. Propuesta de sistemas constructivos para losas y muros aplicando las propiedades de los materiales estudiados.	36
4.5. Determinación de las demandas consumos y emisiones de CO ₂ para cada sistema constructivo de la vivienda estudiada.....	43
4.6. Simulación térmica de la vivienda caso de estudio.....	43
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
5.1. Resultados de la simulación térmica de la vivienda caso de estudio.....	52
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
6.1. Conclusiones	59
6.2. Recomendaciones	60

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXOS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.3.1. Gran Pirámide de Ghiza	4
Figura 1.3.2. Máscara de Jericó	5
Figura 1.3.3. Cisterna griega de Micenas	6
Figura 3.4.1. Sistema constructivo de losa con viguetas pretensadas y casetón de poliestireno.....	21
Figura 3.4.2. Sistema constructivo de Muro de Block Hueco.....	22
Tabla 3.6.1. Valores de Resistencia Térmica Total (Valor "R") de un elemento de la envolvente.....	26
Figura 4.2.1. Muestras de Mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral al 0, 20, 40, 60, 80 y 100%. (Elaboración propia)	32
Figura 4.2.2. Lamda meter EP 500- Equipo de medición de la conductividad térmica del material	33
Figura 4.2.3 Colocación de la muestra, la placa aislante de 5 mm y el material aislante en el centro del equipo de medición.....	34
Figura 4.3.1. Tipos comunes de piezas huecas	36
Figura 4.3.2. Colocación de sistema constructivo de losa con casetón de poliestireno.....	38
Figura 4.3.3. Sistema constructivo de losa con viguetas pretensadas y casetón de poliestireno.....	38
Figura 4.3.4. Ficha técnica del casetón de poliestireno	38
Figura 4.4.1. Planta arquitectónica de vivienda caso de estudio.....	41
Figura 4.4.2. Elevaciones de la vivienda caso de estudio	42
Figura 4.5.1. Presentación del Software DEEVi.....	43
Figura 4.6.1. Sistema constructivo 1	46
Figura 4.6.2. Sistema constructivo 2.....	46
Figura 4.6.3. Sistema constructivo 3.....	47
Figura 4.6.4. Sistema constructivo 4.....	47
Figura 4.6.5. Sistema constructivo 5.....	48
Figura 4.6.6. Sistema constructivo 6.....	48
Figura 4.6.7. Sistema constructivo 7.....	49
Figura 4.6.8. Puerta Multypanel.	49
Figura 4.6.9. Sistema constructivo 9.....	50

Figura 5.1.1. Simulación 1 caso base.	52
Figura 5.1.2. Simulaciones 2 y 3 con muro de bloques 12x20x40 con sustitución de perlita mineral por arena en un 20% y techo de losa de vigueta y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero con perlita mineral en sustitución de arena al 80 y 100%.....	53
Figura 5.1.3. Simulaciones 4 y 5 con muro de bloques 12x20x40 con sustitución de perlita mineral por arena en un 40% y techo de losa de vigueta y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero con perlita mineral en sustitución de arena al 80 y 100%.....	53
Figura 5.1.4. Simulaciones 6 y 7 con muro de bloques 12x20x40 con sustitución de perlita mineral por arena en un 60% y techo de losa de vigueta y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero con perlita mineral en sustitución de arena al 80 y 100%.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Figura 3.6.1. Zonas Térmicas de la República Mexicana. NMX-C-460-ONNCCE-2009 (2009).....	26
Tabla 4.1.1. Proporcionamientos base morteros en volumen absoluto y fluidez de 110+/-5%.....	31
Tabla 4.1.2. Resultados de las pruebas de resistencia a compresión del mortero.	31
Tabla 4.2.1. Resultados de la medición de la Conductividad Térmica.	35
Tabla 4.3.1. Espesores de paredes para bloques lisos.	37
Tabla 4.3.2. Sistema constructivo # 1, Caso base con 0% de sustitución de perlita mineral por arena en el mortero para enjarre.....	39
Tabla 4.3.3. Sistema constructivo # 2 con 20% de sustitución de perlita mineral por arena en el mortero para enjarre.	39
Tabla 4.3.4. Sistema constructivo # 3 con 40% de sustitución de perlita mineral por arena en el mortero para enjarre.	39
Tabla 4.3.5. Sistema constructivo # 4 con 60% de sustitución de perlita mineral por arena en el mortero para enjarre.	39
Tabla 4.3.6. Sistema constructivo # 5. Caso Base con 0% de sustitución de perlita mineral por arena en el mortero para enjarre.....	39
Tabla 4.3.7. Sistema constructivo # 6 con perlita mineral en sustitución de la arena al 80% en el mortero para sobretecho.....	40
Tabla 4.3.8. Sistema constructivo # 7 con perlita mineral en sustitución de la arena al 100% en el mortero para sobretecho.....	40
Tabla 4.4.1. Área neta de los muros exteriores de la vivienda.	42
Tabla 4.6.1. Valores de Resistencia Térmica de los sistemas constructivos de muros	50
Tabla 4.6.2. Valores de Resistencia Térmica de los sistemas constructivos de techo	51
Tabla 5.1.1. Tabla Resumen con los sistemas constructivos simulados.....	54
Tabla 5.1.2. Resultados de la simulación térmica de la vivienda.	55

ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfica 5.1.1. Evaluación de Demandas.....	57
Gráfica 5.1.2. Evaluación de Emisiones de CO ₂	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A.	¡Error! Marcador no definido.6
ANEXO B.....	¡Error! Marcador no definido.7
ANEXO C.	68
ANEXO D	69
ANEXO E.....	70
ANEXO F.....	71

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El calentamiento de la Tierra no es algo exclusivo de nuestra época. Desde que se formó el planeta, ha experimentado un cambio constante y permanente, y su temperatura media ha aumentado. El efecto invernadero se produce por la acción de varios componentes de la atmósfera planetaria: dióxido de carbono, metano, el vapor de agua, el óxido de nitrógeno y el ozono son algunos de ellos. Sin los gases de efecto invernadero, la temperatura promedio de la superficie terrestre sería alrededor de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, en lugar de la media actual de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. No obstante, esto no es excusa para mantener los niveles de calentamiento global y efecto invernadero de la actualidad. La diferencia es que hasta hace poco era un proceso natural, ahora no: ha sido acentuado en las últimas décadas por la acción del hombre con la emisión de, esencialmente, dióxido de carbono y metano, principales causas del cambio climático. Así que el fenómeno beneficioso del efecto ha sido alterado provocando modificaciones en el clima y generando múltiples cambios en el equilibrio de los ecosistemas (OXFAM Intermón, 2019).

Entre las preocupaciones actuales está el fomentar el ahorro de energía y reducir el efecto medioambiental negativo debido a la generación de energía eléctrica, principalmente en países cuyo mayor porcentaje de generación es a partir de fuentes no renovables.

En México el Inventario Nacional de Emisiones de GEI presentado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) contiene la estimación de las emisiones antropogénicas de gases y compuestos de efecto invernadero y de la absorción por los sumideros en el país, en cuya última actualización se reportó para el año 2014 un total de emisiones de 436,085.809 Gg de CO_2eq . Los sectores del inventario son: generación eléctrica; petróleo y gas; fuentes móviles de autotransporte y carreteras; industria; agropecuario; uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUSS); residuos, residencial y comercial.

Es preciso señalar que en el sector de generación eléctrica se reportan las emisiones por el uso de combustibles fósiles en las centrales eléctricas operadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y los Productores Independientes de Energía (PIE), quienes proveen de energía eléctrica para el servicio público. Los gases reportados para este sector son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) por consumo de combustible;

al respecto, en 2014, el sector de generación de electricidad contribuyó con 115,819.376 Gg de CO₂eq, lo que correspondió en ese año al 26.55% de las emisiones totales de GEI a nivel nacional (Ibarra, 2018).

Las principales políticas públicas en materia de eficiencia energética se han enfocado al sector residencial y han reducido su intensidad energética de manera progresiva. Las más importante por su alcance e impacto han sido las Normas Oficiales Mexicanas de Eficiencia Energética (NOM-ENER) que entraron en vigor desde mediados de la década de 1990 (De Buen et. al., 2010).

Para el caso de los edificios, dicha eficiencia se puede lograr reduciendo considerablemente el flujo de calor que ingresa, a través de un diseño térmico adecuado. En un buen diseño térmico, se considera la orientación de la edificación, el diseño arquitectónico y la resistencia térmica de los sistemas constructivos que conforman la envolvente del mismo (Duarte, 2019).

En estados desérticos como el de Sonora, prevalecen temperaturas muy altas, por esta razón el consumo eléctrico aumenta su demanda, debido a la necesidad de buscar un equilibrio térmico dentro de las viviendas y centros laborales. Diversos estudios apuntan a la utilización de morteros ligeros capaces de reducir la transferencia del calor en las viviendas al actuar como aislantes térmicos, logrando así un confort en las mismas (Borbón et. al 2020).

El mortero es una mezcla de aglutinantes inorgánicos, agregados finos y agua, y posibles aditivos. Se utilizan generalmente para rellenar los espacios que quedan entre los bloques o ladrillos, para aplanado de muros o como revestimiento de paredes. Las aplicaciones de los morteros en la construcción son para hacer detalle de albañilería, enjarres de muros, enrasas de puertas y ventanas o pretilas, empastados o pendientes pluviales y pegado de bloques de barro o cemento. Los morteros constituyen la envolvente de las edificaciones ya sean viviendas, naves industriales, obras civiles, etc., de ahí que su empleo como aislante térmico sea de gran importancia en la implementación de viviendas sustentables, a través de las cuales se inhiba la entrada progresiva del calor permitiendo el confort de sus habitantes (Borbón et. al 2019).

Muchas son las alternativas constructivas que se investigan mundialmente con el fin de obtener materiales reciclables que provienen, en su mayoría, de los procesos productivos de acero, de hormigón, etc. Esta búsqueda de materiales alternativos en sustitución de los materiales convencionales no solo busca mejorar las condiciones ambientales, sino también

lograr un ahorro económico en la construcción de viviendas y espacios sociales. La presente investigación persigue la finalidad de estudiar el desempeño de una combinación de sistemas constructivos de muros y techos, a partir de la utilización de perlita mineral como agregado para morteros aligerados. Se busca demostrar la factibilidad del material empleado a través del estudio de la resistencia térmica del mortero obtenido y demostrar la reducción de consumos de energía eléctrica mediante el método de simulación térmico-energética.

1.2. Justificación

El uso de los morteros ligeros ha hecho posible la construcción de rellenos y pendientes en estructuras donde la reducción de los pesos de cargas muertas es un factor importante. Sus propiedades permiten eliminar la fabricación de las mezclas en obra, y agilizan las tareas de construcción.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad, este material induce al ahorro de materiales y en consecuencia al ahorro de energía y materia prima en la producción de material de construcción. En ese orden de ideas también contribuye por sus cualidades de aislamiento térmico al ahorro de energía para el acondicionamiento de la temperatura al interior de la vivienda o edificación (Huerta, 2009).

La humanidad está llamada a tomar conciencia en cuanto a la utilización de materiales constructivos que no solo preserven el medio ambiente, sino que también desarrollen una capacidad productiva que haga mucho más perdurables las obras civiles. Los materiales de construcción son recursos limitados para muchos países, por eso de su uso consciente depende su explotación futura. El empleo de materiales alternativos permite en gran medida un ahorro de los agregados y del cemento en general, a partir de la realización de esta tesis se busca validar la propuesta de la utilización de la perlita mineral como material sustituyente de los áridos en la obtención de morteros aligerados, capaces de ser resistentes térmicamente.

Al realizar este estudio, primeramente, se explora la posibilidad de obtener un material capaz de reducir el empleo de áridos; y, en segundo lugar, basándonos en las propiedades estudiadas de los materiales constituyentes de la mezcla de mortero aligerado, se puede contribuir a una mejor resistencia térmica para los sistemas constructivos combinados de muros y techos, pues se logran obtener materiales con propiedades estructurales y térmicas como aislante. Esto favorecería en gran medida al confort de las viviendas construidas con este tipo de materiales.

1.3. Antecedentes

Existen muchos ejemplos que acreditan el uso que hacían de los morteros en la Antigüedad, principalmente del yeso, la cal, los betunes, etc. Los griegos y los etruscos conocían asimismo su uso. Se habla de un depósito para agua en Esparta construido con guijarros y argamasa, y las grutas sepulcrales de Tarquinio están embarradas de un estuco pintado. La necesidad habría hecho adaptar el uso del mortero y de los cementos a todos los pueblos.

Una de las primeras aplicaciones de la cal apagada fue como tinte en pinturas en cuevas (Malinowski, 1991). En Turquía, en la villa neolítica de Çatal Hüyük (6000 a de C) el "enyesado" que recubre suelos y muros, y que sirve de soporte a pinturas y al modelado de animales en los templos, es una arcilla blanca autóctona aplicada tal cual; en cuanto al mortero de tierra, utilizado para la construcción de las paredes, negro y rico en cenizas y restos de huesos, todavía no disponía de un auténtico ligante.

La perfección del mortero o cemento de los antiguos ha pasado a proverbio. Los egipcios no lo empleaban en la construcción de los grandes edificios de piedra. Sin embargo, como observó Jacques-Joseph Champollion, entre los bloques calizos del revestimiento de la Gran Pirámide se utilizó una especie de mortero, posiblemente para facilitar su deslizamiento y óptimo ajuste al colocarlos. Se puede afirmar que fue en Egipto donde se logró en la Antigüedad el mayor conocimiento del yeso, de su preparación y aplicaciones, y también donde prácticamente se utilizó por primera vez el yeso puro como mortero (Álvarez, 2017).

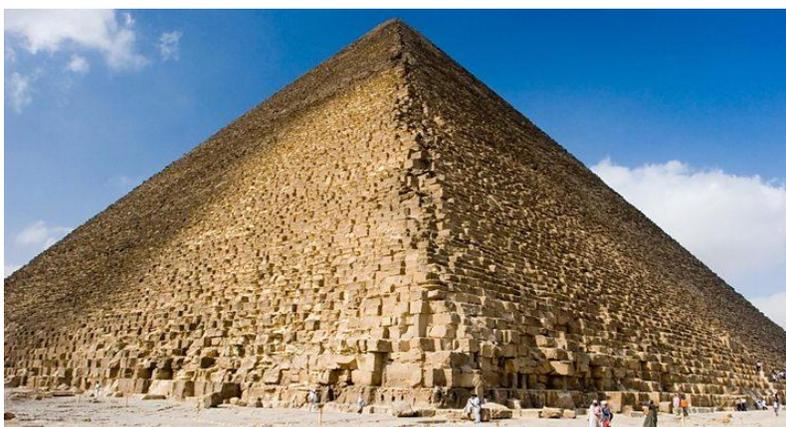


Figura 1.3.1. Gran Pirámide de Ghiza. Noticiero Universal (2020)

El uso de morteros sólo de cal tiene su primer empleo conocido en la Máscara de Jericó, una calavera cubierta con un emplasto de cal pulido, que data del año 7.000 a. J.C. Estas

excavaciones en Jericó, la más antigua ciudad neolítica fortificada conocida, supuso una revolución en las ideas que sobre este período se tenían.

Se han encontrado casas construidas con ladrillos, y con suelos hechos de un mortero de cal con superficies pulidas (llamadas “enlucidos” o “emplastes” por los arqueólogos), y, a menudo, superficies con una capa de emplasto duro coloreado. Granos de cereales y otros restos orgánicos presentes en el mortero han permitido datarlo alrededor del 7.000 a. J.C., mediante la técnica del carbono-14. El nivel estratigráfico más profundo se ha estimado que es del 9.000 al 8.000 a. J.C (Álvarez, Martín y García, 2005).



Figura 1.3.2. Máscara de Jericó. El imperio de Des (2014)

Las civilizaciones griega y romana perfeccionaron los procesos para la obtención del mortero de cal, añadiendo arena fina y aditivos para hacerlo más consistente y estable. La cisterna griega de Micenas, por ejemplo, es una buena muestra del empleo de mortero pulido de alta calidad hace ya 3000 años.

En definitiva, parece ser que la alta calidad de estos morteros se debía a la cuidada selección de las materias primas, la homogeneidad y adecuada proporción de la mezcla, la perfecta cocción y extinción de la cal y a su cuidada aplicación.

No obstante, tendrían que transcurrir muchos años hasta la invención del mortero autonivelante de nuestros días.

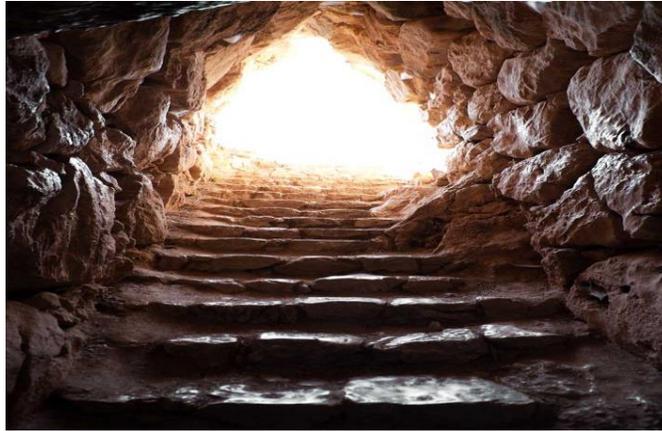


Figura 1.3.3. Cisterna griega de Micenas. GRECOTOUR (1998)

El surgimiento de los morteros está ligado al descubrimiento y perfeccionamiento de agentes aglomerantes naturales o artificiales, así surgen los morteros de yeso, cal, puzolánicos, de cemento portland y los de limo los cuales fueron empleados con fines estructurales y estéticos y su desarrollo se ha visto influenciado por los avances tecnológicos y la aparición de nuevos materiales para la construcción (León y Torres, 2012).

En la actualidad se puede decir que los morteros se han convertido en los grandes incomprendidos de la construcción. Esto es paradójico puesto que los morteros de pega, de acabados en paredes y pisos son algunos de los materiales que por más tiempo ha usado la humanidad. Lo más sorprendente es que, a falta del cemento hidráulico que tenemos en la actualidad, algunas civilizaciones utilizaron otros aglutinantes. Por supuesto, hoy en día estos aglutinantes han sido reemplazados por otros de mejor desempeño, como el cemento hidráulico y sus mezclas de cementantes complementarios. Este desconocimiento sobre la tecnología del mortero tal vez explica porque en la actualidad se hace más énfasis en la capacitación sobre el concreto y sus aplicaciones. Y por alguna razón, no se hace lo mismo en las propiedades y usos de los diferentes tipos de mortero. Pero lo cierto es que un volumen considerable de cemento encuentra su uso en la elaboración de diferentes tipos de morteros, muy por encima de la cantidad de cemento usado para hacer el concreto estructural (Arango, 2021).

1.4. Planteamiento del Problema

México es considerado un país líder en mitigación y adaptación climática, por ello la nación continúa apostando por la búsqueda de soluciones que tengan un impacto positivo en los efectos del cambio climático. En 2012, se aprobó un proyecto de ley integral sobre cambio

climático que estableció el objetivo de que el país genere el 35% de su energía a partir de fuentes de energía limpia para el 2024 y logrando reducir las emisiones en un 50% para el 2050, a partir de tomar como nivel base las emisiones del 2000.

Cuando se habla de climas extremos en el país mexicano, sin dudas se menciona el estado desértico de Sonora, el cual muestra temperaturas muy elevadas en épocas de verano, en algunas localidades, que conllevan a la utilización de equipos de climas que permitan alcanzar zonas de confort térmico en el interior de las viviendas. El uso de manera regular de estos equipos para la reducción del calor origina un consumo creciente de energía eléctrica y con ello un gasto económico a considerar. Las emisiones que tienen lugar durante este proceso de generación de energía eléctrica traen consigo efectos sobre el medio ambiente.

La baja resistencia térmica de los materiales utilizados para la construcción de viviendas conlleva a que, en climas cálidos, se generen ganancias de calor muy elevadas y como consecuencia las condiciones de habitabilidad intramuros se encuentren fuera de la zona de confort (Pérez, et. al. 2011). Esto origina, sin lugar a dudas, un problema en la construcción de viviendas y el confort térmico.

La mayor parte de las cargas térmicas de la vivienda se da por la envolvente, siendo mucho más vulnerable si los sistemas constructivos no ofrecen la resistencia a la transferencia de calor. Los morteros forman parte de la envolvente en una vivienda, por ende, son muy utilizados en la construcción de este tipo de edificios. Este material se emplea para pegar o emplastar en forma de enjarres, así como para elaborar sistemas constructivos a base de mamposterías, que son de los componentes más utilizados en la vivienda en México.

Con base en lo anteriormente planteado se expone como problema de esta investigación: ¿Cómo influye la adición de perlita mineral en un mortero ligero con el fin de lograr el aumento de la resistencia térmica de una combinación de sistemas constructivos de muros y techos para disminuir las emisiones de CO₂ y ahorrar energía?

1.5. Objetivo general

Determinar la resistencia térmica de una combinación de sistemas constructivos de muros y techos en una vivienda tipo, utilizando morteros aligerados con sustitución de perlita mineral por arena, en diferentes porcentajes para disminuir demandas y emisiones de CO₂.

Objetivos específicos:

- Determinar los morteros a estudiar y sus propiedades físicas.

- Obtener de manera experimental la conductividad térmica de los morteros estudiados.
- Plantear una propuesta de sistemas constructivos para losas y muros aplicando las propiedades de los materiales estudiados.
- Determinar teóricamente la resistencia térmica por metro cuadrado de cada uno de los sistemas constructivos propuestos
- Establecer las demandas y emisiones de CO₂ para cada sistema constructivo propuesto, aplicado a una vivienda tradicional mexicana en clima cálido seco, por medio de simulación.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación, se presentan algunas referencias bibliográficas para alimentar el estado del arte en cuanto a la temática de este trabajo, lo que ofrece una referencia acerca de otras investigaciones realizadas en diferentes ámbitos.

En Madrid, Lorrio (2011) realizó un análisis del comportamiento térmico de las zeolitas como material alternativo a la arcilla expandida, en hormigones para formación de pendientes. El objetivo principal de este trabajo fue conocer las diferencias, en cuanto a características técnicas, de dos materiales de construcción como componentes principales en la conformación de pendientes en cubiertas planas: la arcilla expandida y las zeolitas naturales o artificiales. Se compararon las propiedades físicas de ambos materiales mediante ensayos experimentales, valiéndose posteriormente de un sistema informático de simulación virtual. Finalmente se logró llegar a la conclusión de que la zeolita artificial tiene un mejor comportamiento térmico que la arcilla expandida por ofrecer una mayor resistencia al paso del flujo del calor.

En Barcelona, Costa (2012) logró hacer un estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla. Se utilizaron gránulos de plástico reciclado como agregado en la mezcla de morteros en sustitución de una fracción de áridos o agregados naturales. Se redujo la densidad del mortero con el consiguiente aumento del aislamiento térmico y al mismo tiempo se da un nuevo uso al PVC reciclado. La investigación estudia diferentes dosificaciones y determina las características mecánicas y térmicas de cada una de ellas.

En Costa Rica, Quesada (2014) elaboró un estudio exploratorio en diseños de mezclas de concreto liviano para Holcim (Costa Rica) S.A. En esta investigación se obtuvieron resultados en los cuales se aprecia como los altos contenidos de aire en la mezcla afectan directamente la resistencia a la compresión; por lo tanto, la manera más adecuada de reducir la densidad, sin afectar demasiado la resistencia, es con la implementación de materiales de baja densidad, como el poliestireno expandido, en lugar del agregado grueso convencional. Sin embargo, con los resultados obtenidos hasta ahora no se pueden llamar concretos estructurales. Tanto el concreto liviano no estructural como el estructural de baja densidad alcanzan su resistencia neta a una edad aproximada de 3 días. Esto puede ser asociado a la

utilización de cemento MP-AR, ya que éste logra alcanzar altas resistencias a edades tempranas. También, se obtuvo como resultado que el manejo del poliestireno expandido presenta ciertas complicaciones, especialmente a la hora de su dosificación por peso, lo cual podría provocar ocasionalmente variaciones en la mezcla si no se maneja con cuidado.

En Bogotá, Correa y Ratti (2015) evaluaron el efecto de la variación de la dosificación de agregado ligero de arcilla expandida en las propiedades físicas y mecánicas de un concreto estructural aligerado. En este trabajo de grado se desarrolla una investigación acerca de las propiedades físicas y mecánicas del producto conocido como arcilla expandida térmicamente y su uso en un concreto ligero estructural. Adicional a esto, se desarrolla un análisis con el fin de identificar los beneficios del uso de un concreto estructural ligero con base en arcillas expandidas térmicamente en una estructura aporticada, a través del programa numérico conocido como SAP 2000 y teniendo como datos de ingreso al programa los resultados de los ensayos, con respecto a las propiedades mecánicas. Finalmente, se muestra un análisis de costos de hacer un concreto ligero estructural y de su uso en una estructura aporticada.

En Bogotá, Terreros y Carvajal (2016) analizaron las propiedades mecánicas de un concreto convencional adicionando fibras de cáñamo. Con este trabajo investigativo se determinaron y analizaron las propiedades mecánicas (compresión y flexión) de un concreto convencional adicionando fibra de cáñamo; siguiendo un método experimental fundamentado en la realización de ensayos y pruebas de laboratorio para comparar los concretos en estudio, la idea fundamental es conocer, comprender, y analizar la viabilidad del concreto con fibra de cáñamo. Como resultado de los ensayos, se analizó y concluyó que la adherencia entre los materiales y la fibra, generaron una mayor resistencia a la flexión y una resistencia al agrietamiento sin pérdida de material al momento de la rotura; representando una alternativa de desarrollo en el sector de la construcción, como material sostenible.

En Cajamarca, Rodríguez (2017) desarrolló una tesis para estudiar el concreto liviano a base de poliestireno expandido para la prefabricación de unidades de albañilería no estructural a partir de la determinación de sus propiedades físico - mecánicas. Finalmente, se realizó un análisis de aumento del costo de los bloques livianos elaborados, este incremento de costo es debido únicamente al precio actual de venta de las perlitas de poliestireno expandido. Sin embargo, el mayor costo del agregado liviano es compensado con el ahorro

en transporte, el aumento en el rendimiento en la ejecución de los trabajos y debido a que no requiere de acabados, por lo tanto, se obtienen economías de tiempo y dinero al utilizar bloques con estas características.

Paulino y Espino (2017) realizaron un análisis comparativo de la utilización del concreto simple y el concreto liviano con perlitas de poliestireno como aislante térmico y acústico aplicado a unidades de albañilería en el Perú. En los resultados finales de la investigación se expone que las resistencias obtenidas a 7, 14 y 28 días del concreto simple (177, 195 y 223 kg/cm²) así como del concreto liviano (75, 91 y 121 kg/cm²), permitieron evidenciar que este último presenta una menor resistencia, en 52% de la resistencia del concreto simple. También, los resultados del ensayo de aislamiento térmico al bloque de concreto liviano con perlitas de poliestireno permitieron obtener un coeficiente de conductividad térmica de 0.59 W/mK, siendo esta solo el 34% de la conductividad de un bloque de concreto simple (1.73 W/mK) y teniendo una reducción de la conductividad de un 65%.

En Perú, Villalva (2018) hizo una investigación sobre la resistencia térmica y mecánica de un mortero al sustituir al cemento en un 16% de polvo de cáscara de arroz y polvo de conchas de abanico. Así mismo la combinación del polvo de cáscara de arroz y la concha de abanico se pudo establecer los principales componentes que son dióxido de silicio y óxido de calcio, 39.179% y 46.443 % respectivamente. Siendo elementos químicos más importantes que también tiene el cemento como parte de su composición. Se determinó que la combinación cáscara de arroz y concha de abanico en 16%, puede ser usada en obras de construcción, brindándole a la población estructuras de resistencia térmica y mecánica.

En Lima, Egoavil (2018) elaboró una tesis para la determinación del coeficiente de conductividad térmica del concreto con aditivo de poliuretano residual. En este trabajo se busca la mejora del aislamiento térmico de una mezcla de concreto mediante el empleo de residuos de placas de poliuretano, al que se puede definir como un conjunto de materiales y técnicas de instalación que se aplican en los elementos de construcción para limitar un volumen de control y reducir su transferencia de calor. En tal sentido, esta investigación desarrolla cálculos de transmisión de calor de elementos de construcción.

Bustamante, Martínez y Macías (2018) lograron una caracterización térmica y mecánica de bloques de concretos fabricados en la región de Pichincha de Ecuador. Se determinaron magnitudes como resistencia a la compresión, contenido de humedad y conductividad

térmica. En los resultados de la conductividad térmica se mostraron valores menores a los de las referencias consultadas. Esto demuestra que tienen mejores características aislantes.

En Monterrey, Elizondo (2006) hizo una caracterización del concreto celular elaborado con espuma preformada. El objetivo general de esta investigación consistió en realizar un estudio analítico del concreto celular elaborado con espuma preformada, cubriendo desde una base teórica de los diferentes tipos de concretos celulares hasta la fabricación y caracterización de un concreto celular elaborado con espuma preformada que cumpliera con las características requeridas para el sistema Pretecasa. Los requisitos del concreto celular con espuma es el de tener una resistencia a compresión de 150 Kg/cm^2 con el peso volumétrico más pequeño posible. A pesar de que el valor de resistencia térmica es mayor en los bloques de concreto celular producidos con el sistema Hebel, el concreto celular elaborado con espuma preformada ofrece una mayor ventaja: se puede colar en sitio.

En Monterrey, Espinal (2007) realizó la evaluación del comportamiento térmico y estructural en una vivienda típica de interés social. Los esfuerzos generados por efectos de la temperatura en algunas ocasiones no son tomados en cuenta, a través de esta investigación, se observa mediante la simulación para el prototipo-1, como estos pueden causar agrietamiento en los recubrimientos exteriores de las viviendas típicas de interés social. El análisis efectuado en el prototipo-1 no sólo consideró las cargas térmicas experimentales determinadas en el período de estudio, sino también se amplió el análisis para las máximas temperaturas del 2007, así como para las temperaturas extremas de los últimos treinta años. Con base en los resultados del prototipo-1 se observó que el recubrimiento en el exterior de la vivienda (estuco) al presentar un módulo de elasticidad alto y un módulo de ruptura bajo, sufría agrietamientos por efectos de los cambios de temperatura. Los resultados obtenidos muestran un incremento en los esfuerzos del 25 % al pasar de las máximas temperaturas del 2007 a las temperaturas extremas de los últimos treinta años.

En Nuevo León, Campos (2014) realizó una tesis para el desarrollo de morteros ligeros base cemento portland con propiedades térmicas optimizadas mediante la incorporación de un micro co-polímero. Como resultado de esta investigación se logró la caracterización térmica, mecánica y física de los morteros producidos, así como la evaluación del efecto de distintos tipos de curado sobre la resistencia a la compresión, la evaluación del efecto de la

humedad sobre la conductividad térmica y el desarrollo de morteros con conductividad térmica competitiva con materiales aislantes comerciales base cemento portland.

En Yucatán, Herrera (2015) propuso una investigación sobre las propiedades mecánicas, térmicas y acústicas de un mortero aligerado con partículas de poliestireno expandido (EPS) de reciclaje para recubrimientos en muros y techos. Los valores de resistencia mecánica a compresión van desde 50.99 Kg/cm² hasta 132.56 Kg/cm² MPa, lo cual satisface la resistencia requerida para los morteros de recubrimiento. Los valores de aislamiento térmico mostraron mejoras de hasta un 40 % aproximadamente. Para las formulaciones de alto contenido de EPS y en cuanto a las pruebas acústicas se obtuvieron valores moderadamente mejorados.

En Guanajuato, Villalobos, Chávez y Morales (2017) publicaron un material acerca del concreto ligero. En el mismo desarrollaron varias pruebas a los materiales (grava y arena) tales como granulometría que es la distribución de tamaños de partículas determinando mediante el análisis por mallas según la norma ASTM – C – 136; así como pruebas de densidad y humedad superficial y absorción. Estas pruebas se les realizaron a los agregados pétreos del concreto. A los cilindros de concreto (curados a 7, 14 y 28 días), se le realizaron pruebas de resistencia.

En Hermosillo, Sonora se han realizado diversas investigaciones de impacto nacional e internacional en relación con las propiedades térmicas y aislantes de concretos ligeros incorporándoles materiales de baja densidad que permitan obtener resultados óptimos en cuanto a la resistencia de las mezclas de concreto en las que son empleados. Por solo citar algunas investigaciones se presentan las siguientes:

(Pérez et. al. 2010) realizaron un estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico. En este estudio se analiza el efecto de colocar aislamiento térmico por la cara exterior y en sus cavidades. El modelo teórico para estado permanente, fue resuelto numéricamente con diferencias finitas y validado con resultados experimentales de la literatura. Las resistencias térmicas promedio para los bloques de 0.12 m y 0.15 m son de 0.159 m²K/W y 0.171 m²K/W respectivamente. Cuando se rellenan las cavidades con aislamiento térmico son de 0.407 m²K/W y de 0.530 m²K/W, respectivamente. Al aplicar el mismo volumen de aislante de la cavidad rellena, sobre la cara

exterior, se obtienen valores de $1.555 \text{ m}^2\text{K/W}$ y $2.147 \text{ m}^2\text{K/W}$, para los bloques de 0.12 m y 0.15 m respectivamente.

Borbón (2016) elaboró un estudio del comportamiento térmico y mecánico de morteros aligerados con perlita mineral. En este trabajo se plantea la problemática de falta de información de las propiedades mecánicas y térmicas de morteros utilizados en la construcción con características aislantes. En gran parte del estado de Sonora durante el verano se presentan temperaturas muy altas, que sobrepasan los 35°C y llegan hasta los 48°C , haciendo que sus habitantes tengan que utilizar sistemas de aire acondicionado de forma habitual. La investigación plantea utilizar la perlita, arena clasificada, cemento, agua y en casos comparativos incluso de aire, para crear un mortero 1:4 cemento-arena donde ese reemplazará la arena por perlita en diferentes proporciones. Esto para encontrar una mezcla óptima que cumpla con pruebas de compresión y de termicidad de acuerdo a la normatividad vigente, cubriendo las necesidades planteadas para utilizarlo en los muros de las viviendas para fabricar viviendas más confortables para sus habitantes.

(Borbón, et. al. 2018) realizaron un análisis termofísico de mortero, cemento y arena proporción 1:4 sustituyendo arena por perlita sintética. En este proyecto se experimenta con la sustitución de arena en diferentes porcentajes, por materiales aligerantes, con la intención de probar el comportamiento termofísico en función de las variaciones en el peso volumétrico, densidad, esfuerzo a la compresión y conductividad térmica.

Borbón (2018) desarrolló el diseño termofísico de componentes constructivos aligerados, con características térmicas para elaborar muros de vivienda de interés social. El objetivo de esta investigación fue diseñar, construir y caracterizar termofísicamente componentes constructivos óptimos, tipo bloques o paneles para la conformación de muros de vivienda de interés social de concretos ligeros que conserven la resistencia mecánica y mejoren la resistencia térmica de los tradicionales, así como evaluarlos en su comportamiento mecánico y térmico de acuerdo a normas. El resultado de este proyecto se espera en el sentido de presentar un producto que sea el que mejor comportamiento ofrezca en cuanto a las pruebas de resistencia a la compresión, porcentaje de absorción y resistencia térmica.

(Borbón, et. al. 2019) elaboraron un trabajo acerca de materiales reciclados aligerados y su influencia en el consumo de energía eléctrica en viviendas económicas. En esta investigación se obtiene experimentalmente la conductividad térmica, calor específico y

densidad volumétrica de materiales de construcción como lo son: el ladrillo de barro recocido, el bloque aligerado, el mortero cemento-arena natural y el mortero cemento-arena reciclado, este último fabricado con materiales reciclados de la demolición de concreto. Los resultados de simulación obtenidos muestran disminución en las ganancias de calor en muros y en el consumo de energía eléctrica por enfriamiento. La disminución es superior a 8%, utilizando sistemas constructivos conformados con materiales aligerados y reciclados.

En el año 2019 Borbón, Rodríguez y Najera publicaron en la revista "Sustainability" un artículo titulado: Energy and Economic Impact on the Application of Low-Cost Lightweight Materials in Economic Housing Located in Dry Climate. En dicho artículo se hace referencia a la fabricación de un compuesto cementoso ligero de bajo costo constituido por mortero de perlita. Se probaron la conductividad térmica y la capacidad calorífica del compuesto propuesto.

Duarte (2019) realizó una tesis en la cual se hace referencia al cumplimiento de la NOM-020-ENER-2011 utilizando mortero aligerado con poliestireno expandido en la envolvente de una vivienda tradicional. En dicho trabajo de investigación se desarrollaron pruebas de laboratorio para estudiar las propiedades en estado fresco y endurecido del mortero aligerado con poliestireno expandido a partir de la elaboración del diseño teórico de la mezcla. En estado fresco se determinaron la fluidez, masa unitaria y su contenido de aire; en estado endurecido se definió la resistencia a compresión simple, adherencia, así como su conductividad térmica. Se llevó cabo también, un estudio comparativo de ganancias de calor, a través de la envolvente entre una vivienda recubierta con el mortero ligero y otra vivienda de referencia sin este material.

La investigación bibliográfica ha permitido mostrar los avances que se han generado en el tiempo, en proyectos de investigación al respecto de la utilización de materiales ligeros, con marcada tendencia a descubrir sus comportamientos y transitar hacia un mejor conocimiento en el diseño de nuevos materiales de construcción que sean más ligeros, menos densos y menos conductivos, lo que genera ventajas desde diferentes perspectivas para la industria de la construcción en México.

3. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se expone el marco teórico conceptual para afianzar algunos conceptos relacionados con las características de los materiales que se abordarán en este estudio, así como de sistemas constructivos, su comportamiento térmico, normatividad y aspectos de simulación térmica de edificaciones; además de aspectos relacionados con el ahorro de energía.

3.1. Propiedades de los morteros

Los morteros son mezclas plásticas que en estado pastoso tienen la propiedad de poderse moldear, de adherirse fácilmente a otros materiales, de unirlos entre sí, protegerlos, endurecerse y alcanzar resistencias. Los morteros varían según los materiales con los que son elaborados y comúnmente se elaboran de forma manual, mecánicamente o bien, premezclados. Los tipos de morteros se definen en relación al conglomerante que se utiliza (NIASA MEXICO, 2018)

Para atender la normatividad mexicana, con respecto a las características de los morteros, se cuenta con la norma mexicana NMX-C-486-ONNCCE-2014, que determina el esfuerzo a la compresión que debe soportar un mortero o tabique de mampostería de acuerdo al tipo de aplicación.

Los morteros pueden clasificarse:

- Por su fabricación: hecho en obra o industrializado
- Por su uso: para pegar piezas, y para relleno
- Por su resistencia a la compresión: Tipo I, Tipo II y Tipo II

Dentro de las prestaciones que ofrece un mortero debemos distinguir dos etapas diferenciadas por su estado físico, que se denominan *estado fresco* y *estado endurecido*. Las propiedades relativas al estado fresco se relacionan con la puesta en obra e influirán principalmente en el rendimiento y la calidad de la ejecución. Los requisitos derivados, por tanto, responden a las exigencias del constructor y operarios. Las propiedades en estado endurecido son estipuladas por las prescripciones de proyecto y por el cumplimiento de las exigencias normativas y reglamentarias. Estas propiedades competen fundamentalmente a la figura del arquitecto o prescriptor. En *estado fresco*, los morteros, poseen propiedades como: consistencia, densidad, adherencia, contenido de iones cloruros, capacidad de retención de

agua, etc.; mientras que en *estado endurecido* los morteros pueden adquirir propiedades tales como: resistencia mecánica, adherencia, retracción, absorción de agua, densidad, permeabilidad al vapor de agua, comportamiento térmico y comportamiento ante el fuego (CONSTRUMATICA, 2018).

3.2. Características de los materiales que componen los morteros.

El mortero es una mezcla homogénea producto de la unión de arena, agua y un conglomerante inorgánico, el cual puede ser cal, yeso o cemento.

La arena, es el de mayor proporción en la mezcla; desde un 40% hasta un 80%. Es un material mineral y granular, el cual puede ser de naturaleza caliza o silícea y cuyo tamaño máximo ha de ser 4 mm. Este componente es la piedra angular de los morteros, la base en la cual la hidratación del aglutinante se lleva a cabo, ya que es un material inerte, incapaz de reaccionar químicamente con otros compuestos. La arena controla la retracción y contribuye a la resistencia mecánica.

El agua se ocupa de disponer el entorno químico propicio para la hidratación del conglomerante, por ello, es la causante principal de la plasticidad del mortero. La cantidad de agua en la mezcla varía según las condiciones térmicas, el conglomerante, la cantidad de arena y la consistencia esperada. Además, esta cantidad es inversamente proporcional a la resistencia mecánica del mortero, pero, es directamente proporcional a su retracción y a su porosidad. El agua de mezclado debe presentar un pH mínimo de 5, así como concentraciones bajas de iones sulfatos y cloro, hidratos de carbono y compuestos orgánicos.

El conglomerante es el componente clave, puesto que se encarga de originar la unión completa entre la arena y el agua, produciendo una sustancia homogénea y estable. Comúnmente, su estructura está compuesta de partículas muy finas como un polvo, o puede poseer una estructura de consistencia pastosa. El conglomerante más empleado es el cemento, seguido por la cal y el yeso (BECOSAN, 2019).

El uso de materias primas e inertes de diferentes densidades para la fabricación de morteros es ampliamente conocido y explotado desde la época de los griegos y romanos. Sin embargo, el comienzo generalizado del empleo de áridos ligeros en la construcción se produce con el descubrimiento de la expansión de esquisto, un agregado ligero con suficiente fuerza y calidad adecuado para su uso en aplicaciones estructurales de hormigón. El proceso

fue desarrollado por Stephen Hayde a principios del siglo XX en Kansas, Missouri (Junco, 2012).

El empleo de la perlita permite el ahorro en cimentaciones y losas lo cual es obtenido gracias a la ligereza que proporciona este agregado, al ser mezclado en concretos y/o morteros para plantillas y rellenos de blocks. En cuanto a su ligereza se plantea que el mortero cemento-arena común tiene un peso aproximado de 1,900 a 2,100 kg/m³ y al ser mezclado con perlita puede llegar a pesar de 1.025 a 1,100 kg/m³, lo que conlleva a una reducción del peso del mortero (Alfa-Gamma, 2022).

Este tipo de mortero conformado con la perlita es empleado en: plantillas, rellenos niveladores, aplanado de muros, rellenos de block y en aplicaciones comerciales, mientras que no es recomendable su uso en concretos estructurales; pero por su ligereza puede ser mezclada con el concreto o mortero y ser utilizada aún en construcciones o lugares que requieran su aplicación a varios metros de altura.

3.3. Características de los Agregados ligeros.

Los agregados ligeros son los agregados finos o gruesos que, por su baja densidad, se utilizan en la fabricación de concreto estructural, de baja masa volumétrica y resistencia limitada a la compresión, constituidos predominantemente por materiales inorgánicos de estructura celular, preparados por expansión, calcinación o fusión incipiente de productos tales como escorias de altos hornos, arcillas comunes, diatomitas, cenizas volantes, lutitas y pizarras, o bien, mediante otros tratamientos de materiales naturales tales como piedra pómez, perlitas, tezontles, escorias y tobas.

En general los agregados se han clasificado de varias maneras a través del tiempo, pero principalmente desde los puntos de vista de su procedencia, densidad, tamaño, forma y textura (Rivera, 2013).

Las propiedades de los agregados ligeros o ultraligeros que influyen de manera apreciable en el hormigón, antes del fraguado, en el endurecimiento o después de ellos, están dadas por:

La forma de los granos que influye en la granulometría del árido y como en el hormigón normal en la manejabilidad de la mezcla, en el contenido de cemento y la cantidad de agua en la mezcla. El tamaño de los granos también influye en las propiedades de la mezcla, ya que, en su elaboración, al aumentar el tamaño puede disminuir su densidad, rigidez y

resistencia, por lo que el diámetro no debe ser mayor a 25 mm (1"); para alta resistencia se recomienda que éste no sobrepase los 19 mm (3/4").

La obtención de la densidad aparente del árido se efectúa basados en el principio de Arquímedes (volumen desalojado). La densidad real de un árido se define como la relación entre la masa y el volumen de la parte sólida; todos los poros pueden eliminarse mediante un molido fino. La densidad real de los áridos varía entre límites relativamente estrechos (2,6 a 3,0 kg/dm³). En la mayoría de las arcillas y pizarras expandidas está alrededor de 2,7 kg/dm³.

La masa unitaria del árido se define como el cociente entre la masa de una cantidad de árido y el volumen ocupado por el mismo incluidos en aquel todos los poros. Para estos agregados, se pueden obtener valores de masa unitaria entre 0,40 y 0,80 kg/dm³, para granos comprendidos entre 8 y 19 mm.

Como en el concreto normal, en el hormigón ligero la resistencia depende en forma decisiva no sólo de la calidad de la pasta de cemento, sino también de la calidad del grano y, sobre todo, de la rigidez de los áridos. El módulo de elasticidad y la resistencia propia de los granos son, por ello, características importantes del árido.

Los áridos ligeros debido a su estructura porosa, tienen una mayor capacidad de absorción que los agregados normales. La absorción de agua de los áridos debe de tenerse en cuenta al verter el agua de amasado, puesto que influye en la manejabilidad del hormigón, en la eficaz relación agua / cemento, en la resistencia y la densidad del hormigón y en propiedades del hormigón que están en dependencia con ellas, como la deformabilidad en función del tiempo (retracción y fluencia). La absorción de agua es la relación entre el agua absorbida en un tiempo determinado y la masa seca del árido.

Los agregados ligeros para hormigón, que muy a menudo están expuestos a cambios de congelación y descongelación cuando todavía están húmedos, deben poseer una resistencia suficiente; la cantidad de agregados destruidos por esta razón debe ser menor al 4%. El aumento de un 10% en volumen que sufre el agua en los poros al congelarse, es una de las causas que puede dañar los áridos ligeros; los áridos en los que la totalidad de sus poros se llenan de agua corren especial peligro. Por fortuna, aún después de mucho tiempo sumergido dentro del agua, los poros de las partículas del agregado ligero no se llenan en su totalidad, y los huecos restantes que quedan con aire, sirven para absorber el aumento de volumen ocasionado por el hielo.

El coeficiente de dilatación de los áridos y su relación con el coeficiente de dilatación de la pasta de cemento influyen en las presiones internas que aparecen en el hormigón al variar la temperatura. No se han establecido valores cuantitativos de dilatación térmica, pero se presume que debe ser similar que para los ladrillos (por ser materiales cerámicos). Una de las ventajas del hormigón ligero armado respecto al normal es su mejor comportamiento como aislante térmico, esto se debe a la menor conductividad térmica de los áridos ligeros, por la porosidad de los mismos. Debido a la alta temperatura alcanzada en su fabricación los áridos ligeros son muy refractarios.

Los agregados no deben reblandecerse con el agua, ni descomponerse, ni formar combinaciones desfavorables con los elementos del cemento; no deben influir negativamente sobre la hidratación ni amenazar la protección contra la corrosión del refuerzo. Según la cantidad y distribución pueden ser nocivos los siguientes componentes: polvos capaces de entrar en suspensión, materias de origen orgánico, determinados componentes de azufre, elementos con tendencia al reblandecimiento, la hinchazón o el enmohecimiento, combustibles y materiales que puedan favorecer la corrosión, como por ejemplo cloruros. Si no se está seguro, que no existen materias desfavorables en cantidad peligrosa, deben analizarse los áridos (Rivera, 2013).

3.4. Sistemas constructivos de losa y muro de bloque de concreto hueco.

En esta sección del trabajo se describe una tipología de losas para techo a base de viguetas de concreto y casetón de poliestireno, así como de muros a base de bloques de concreto hueco, ambos ampliamente utilizadas en el Noroeste de México, sobre todo en vivienda en serie y algunos otros tipos de construcciones no habitacionales.

3.4.1 Losa de vigueta de concreto y casetón de poliestireno

Este sistema se compone de viguetas de concreto armado. La vigueta es el elemento portante y tiene una resistencia que permite cubrir claros mayores sin aumento de peralte y con menor uso de cimbra. Estos elementos estructurales están compuestos por una armadura de acero y un patín de concreto en su parte inferior y a todo lo largo de la misma. Su patín sirve de apoyo a las bovedillas y como cimbra a la hora de colar la losa. La vigueta es la parte más importante del sistema de losa vigueta-bovedilla, ya que es la responsable de proveer resistencia a la estructura. Dichos elementos estructurales son de concreto presforzado (FANOSA, 2021)

El casetón de poliestireno expandido se utiliza en el área de la construcción como aligerado de losas, azoteas, losas de entrepiso y losas de cimentación. Las formas comúnmente utilizadas son tipo pirámides cuadradas, rectangulares y triangulares. Sin embargo, se pueden fabricar en cualquier forma y medida. Se vende por densidad y medida. Las densidades más comunes son 10, 12, 15, 20 y 25 kg/m³. También se puede fabricar en base a requerimiento del proyecto. Por sus características, el casetón ayuda a reducir costos en la construcción, puesto que su uso permite:

- Ahorro por peso de carga de la losa.
- Ahorro de hormigón y acero.
- Reducción de materiales adicionales.
- Ahorro en el transporte de materiales.
- Facilidad de manipulación.
- Mejor rendimiento de mano de obra al realizar más metros de trabajo por cada jornada laboral (TECNOPOL, 2020).

Entre los marcados beneficios que tiene este sistema constructivo se pueden destacar la generación de un menor peso de carga propia de la losa, la durabilidad y fuerza en la estructura, así como el aislamiento térmico y acústico.

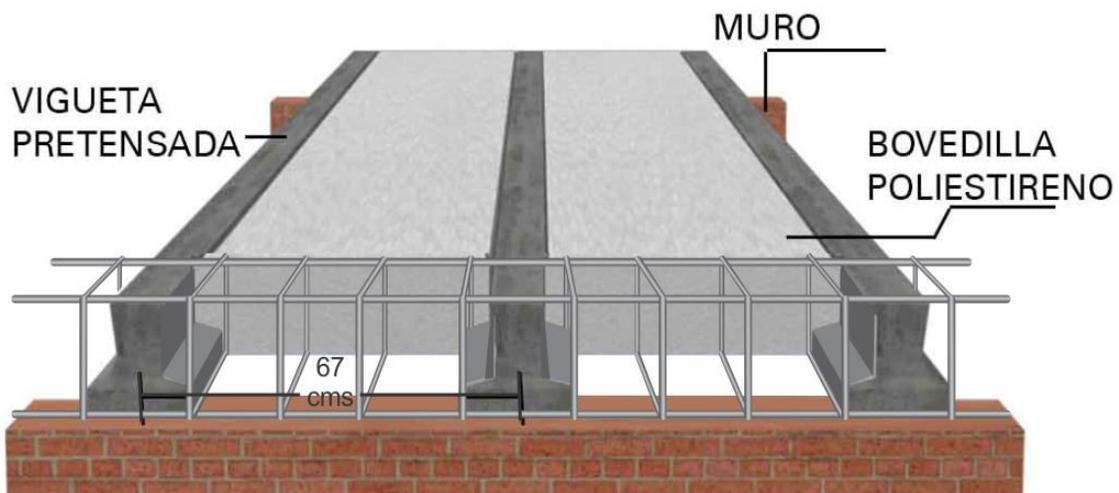


Figura 3.4.1. Sistema constructivo de losa con viguetas pretensadas y casetón de poliestireno. TRABIS (2020)

3.4.2 Muro de bloques de concreto hueco

Este tipo de materiales son ampliamente utilizados en la construcción no solo en México sino en otros países, considerado como un material apto para construir en tiempo y costo, así como un material apto para solicitaciones estructurales dependiendo de su diseño.

Un bloque de hormigón es un mampuesto prefabricado, elaborado con hormigones finos o morteros de cemento, utilizado en la construcción de muros y paredes. Los bloques tienen forma prismática, con dimensiones normalizadas, y suelen ser esencialmente huecos. Sus dimensiones nominales en centímetros son 15×20×40, 12×20×40, 10×20×40, 20×20×40.

Los bloques de cemento son elementos de forma paralelepípedo ortogonal, sólidos o huecos fabricados de mortero de cemento portland o de concreto hidráulico con distintos tipos de agregados. Se usan en la construcción de muros interiores y exteriores, de carga o de relleno y en registros, entre otros. Las piezas huecas tienen el propósito de mejorar las condiciones de aislamiento térmico y acústico, así como de alojar los elementos de refuerzo y tuberías. Son utilizados en sistemas de mampostería simples o estructurales, esto debido a la posibilidad de reforzar las piezas en ambos sentidos de su plano.

Sus principales aplicaciones son:

- Muros simples o divisorios
- Muros estructurales
- Bardas perimetrales
- Muros de contención

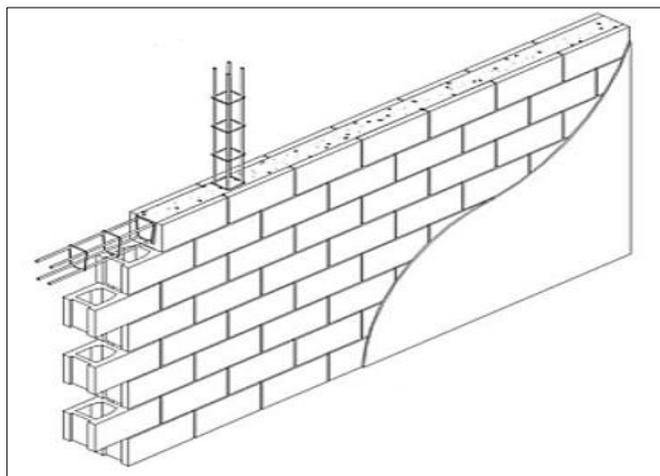


Figura 3.4.2. Sistema constructivo de Muro de Block Hueco. Fábrica Mayo 3 (2018)

3.5. Propiedades térmicas de materiales y sistemas constructivos.

La principal propiedad térmica que define el desempeño de elementos constructivos es la resistencia térmica. La resistencia térmica es la resistencia al paso del calor a través de un elemento. Se expresa en unidades de $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$. Un elemento indispensable para calcular R de los sistemas constructivos es conocer el valor de la conductividad térmica k. La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la velocidad con la que se transfiere el calor a través de un medio. En otras palabras, la conductividad térmica se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura (Cengel & Ghajar, 2011).

En el Sistema Internacional de Unidades, la conductividad térmica se mide en $\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor de calor; en cambio, cuando el valor es bajo quiere decir que es un mal conductor de calor, en otras palabras, es un buen aislante (Cengel & Ghajar, 2011).

A partir de la utilización de la norma internacional ASTM-C177, y la norma mexicana NMX-C-189-ONNCCE se pueden realizar mediciones del coeficiente de conductividad térmica, basadas en el método de la placa caliente aislada. Existen equipos en el mercado que son capaces de medir con mucha precisión estas propiedades; entre otros están Thermal Conductivity Test Tool λ -Meter EP500e; las mediciones deben hacerse en laboratorio, con las condiciones ambientales que exigen dichas normas.

3.5.1. Sistemas constructivos homogéneos y no homogéneos

De acuerdo a la normatividad mexicana NMX-C-460-ONNCCE-2009, NOM-020-ENER-2011 y NOM-008-ENER-2001, para determinar la evaluación de la resistencia térmica de sistemas constructivos, esto se dividen en dos tipos de sistemas, homogéneos y no homogéneos, los cuales se calculan con las expresiones dadas a continuación.

Una capa homogénea es aquella que tiene un solo material y no tiene huecos de aire. Una capa no homogénea es aquella que tiene dos o más materiales o presenta huecos de aire en su interior. Cuando se selecciona con una capa no homogénea, el sistema constructivo puede tener además otras capas homogéneas.

Los sistemas constructivos homogéneos son aquellos formados por varias capas de diferentes materiales, con diferentes propiedades, que se conforman de una manera continua; mientras que los sistemas constructivos no homogéneos son aquellos formados por varias

capas de diferentes materiales, con diferentes propiedades, que se conforman de una manera discontinua.

La envolvente de un edificio está compuesta por: muros exteriores, techos, superficies inferiores, ventanas y puertas. Al mejorar las características térmicas de estos componentes, podemos reducir la cantidad de calor que entra al edificio.

El aislamiento térmico total de una porción de la envolvente del edificio para uso habitacional, formado con capas térmicamente homogéneas y perpendiculares al flujo del calor, deben calcularse con la siguiente ecuación:

$$M = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{l_n}{\lambda_n} \quad (1)$$

Donde:

M es el aislamiento térmico total de una porción de la envolvente del edificio, de superficie a superficie, en m^2K/W ;

h_i es la conductancia superficial interior, en W/m^2K . Su valor es 8,1 para superficies verticales; 9,4 para superficies horizontales con flujo de calor arriba (del piso hacia el aire interior o del aire interior hacia el techo) y 6,6 para superficies horizontales con flujo de calor hacia abajo (del techo al aire interior o del aire interior al piso).

h_e es la conductancia superficial exterior, y es igual a 13 $W/m^2 K$;

n es el número de capas que forman la porción de la envolvente del edificio;

l es el espesor de cada uno de los elementos que componen la porción de la envolvente del edificio, en m;

λ es el coeficiente de conductividad térmica de cada uno de los materiales que componen la porción de la envolvente del edificio para uso habitacional, en W/mK .

El aislamiento térmico total de las porciones de la envolvente del edificio para uso habitacional, formado con capas térmicamente homogéneas y térmicamente no homogéneas paralelas a la superficie, como se muestra en la ecuación (1), se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$M = \frac{1}{\frac{F_1}{M_{parcial} + g/\lambda_1} + \frac{F_2}{M_{parcial} + g/\lambda_2} + \dots + \frac{F_m}{M_{parcial} + g/\lambda_m}} \quad (2)$$

$$M_{parcial} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{l_n}{\lambda_n} \quad (1)$$

- M_{parcial} es el aislamiento térmico parcial de una porción de la envolvente del edificio para uso habitacional, de superficie a superficie, en $\text{m}^2\text{K/W}$. Es la suma de todos los aislamientos térmicos de todas las capas y aislamientos superficiales que componen la parte de la envolvente del edificio para uso habitacional, excepto lo de la capa no homogénea.
- n es el número de materiales que forman la capa no homogénea.
- F es la fracción del área total de la porción de la envolvente del edificio para uso habitacional, ocupada por cada material en la capa no homogénea.
- g es el espesor o grueso de la capa no homogénea.

3.6. Normatividad mexicana para evaluación energética de viviendas

Además de las NOM- 020 y 008 de carácter obligatorio emitidas por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) en México, las cuales determinan el cumplimiento de la demanda de energía en edificios habitacionales y no habitacionales, existe la norma mexicana no obligatoria, NMX-C-460-ONNCCE-2009, las cuales exponen que la mayor parte de la carga térmica se pierde o gana debido a la envolvente compuesta por muros, techos, puertas y ventanas. A través del techo se transmite-aproximadamente un 60 % del total de las pérdidas o ganancias de calor de las edificaciones. Es por esta razón que se hace tan necesario el estudio térmico de la envolvente de una vivienda de la cual forman parte los elementos anteriormente mencionados.

La norma NMX-C-460-ONNCCE-2009, limita los valores de Resistencia Térmica Total (Valor "R") de un elemento de la envolvente, cuyos valores se han determinado de acuerdo a las zonas térmicas con las que cuenta la república mexicana, como se muestra en el mapa de la figura 3.6.1.

Una vez identificada la zona térmica del país donde se va a determinar el valor R mínimo de cumplimiento de un sistema constructivo sea losa de techo o muro, se utilizan los valores de la tabla 3.6.1 para determinar este valor. Por ejemplo, si se desea saber qué valor R debe tener un muro ubicado en la ciudad de Hermosillo que corresponde a la zona 2, el resultado sería un valor mínimo de $1.0 \text{ m}^2\text{K/W}$.



Figura 3.6.1. Zonas Térmicas de la República Mexicana. NMX-C-460-ONNCCE-2009 (2009)

Tabla 3.6.1. Valores de Resistencia Térmica Total (Valor "R") de un elemento de la envolvente.

Zona Térmica No.	Techos m ² K / W (ft ² h °F / BTU)			Muros m ² K / W (ft ² h °F / BTU)			Entrepisos Ventilados m ² K / W (ft ² h °F / BTU)		
	Minima	Habitabilidad	Ahorro de Energía	Minima	Habitabilidad	Ahorro de Energía	Minima	Habitabilidad	Ahorro de Energía
1	1,40 (8,00)	2,10 (12,00)	2,65 (15,00)	1,00 (5,70)	1,10 (6,00)	1,40 (8,00)	NA	NA	NA
2	1,40 (8,00)	2,10 (12,00)	2,65 (15,00)	1,00 (5,70)	1,10 (6,00)	1,40 (8,00)	0,70 (4,00)	1,10 (6,00)	1,20 (7,00)
3A, 3B y 3C	1,40 (8,00)	2,30 (13,00)	2,80 (16,00)	1,00 (5,70)	1,23 (7,00)	1,80 (10,00)	0,90 (5,00)	1,40 (8,00)	1,60 (9,00)
4A, 4B y 4C	1,40 (8,00)	2,65 (15,00)	3,20 (18,00)	1,00 (5,70)	1,80 (10,00)	2,10 (12,00)	1,10 (6,00)	1,80 (10,00)	1,90 (11,00)

Fuente: NMX-C-460-ONNCCE-2009 (2009)

Para la determinación de los valores de Resistencia Térmica de los sistemas que forman la envolvente de la vivienda es necesario conocer la conductividad térmica de los materiales empleados. Los valores de conductividad se toman generalmente de los valores reportados en fichas técnicas o en las normas antes mencionadas. En esta investigación se utilizaron, además, valores obtenidos de las mediciones realizadas en el laboratorio de conductividad térmica con equipo especializado.

El coeficiente global de transferencia de calor es la cantidad total de calor que pasa por un área determinada y es inversamente proporcional a la Resistencia Térmica de los sistemas constructivos esto se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{1}{M} \quad (3); \text{ en donde:}$$

K: es el coeficiente global de transferencia de calor de una porción de la envolvente del edificio, para uso habitacional, de superficie a superficie, en W/m^2K .

M: es el aislamiento térmico total de una porción de la envolvente del edificio, de superficie a superficie, en m^2K/W . En diversas bibliografías el término M, es sustituido por el término R.

A partir de dicha ecuación se determina el aislamiento térmico total de las porciones de la envolvente de un edificio para uso habitacional formado por capas homogéneas. Para resolver los diferentes sistemas constructivos que se emplean en este trabajo, además, las ecuaciones (1) y (2) planteadas en el epígrafe anterior.

3.7. Simulación energética de edificios.

La determinación de los parámetros anteriores tanto de conductividad como de resistencia térmica, son para evaluar porciones de la envolvente térmica, que normalmente son por metro cuadrado. Para el caso de evaluar el comportamiento térmico de edificios completos se requiere utilizar un simulador que realice el balance de todo el edificio, integrando toda la envolvente y sus condiciones de operación, así como las propiedades de los materiales y sistemas constructivos.

Al emplear un sistema de evaluación basado en simulación se procederá a comparar la eficiencia energética estimada del edificio para uso estándar, con unos valores de referencia que pueden estar relacionados con la normativa vigente. Este sistema proporcionará una medida del comportamiento energético del edificio y sus sistemas, sin tener en cuenta aspectos tan importantes como la operación, el mantenimiento y las posibles deficiencias durante la construcción y la instalación de los sistemas en los edificios existentes. Esto puede ser suficiente, incluso conveniente, si se trata únicamente de informar al consumidor sobre la eficiencia energética en un edificio tal y como fue proyectado, pero si el objetivo es la mejora global de la eficiencia energética, un sistema de evaluación basado en medidas para

la certificación de edificios existentes constituiría la forma idónea de actuación sobre aspectos importantes de la eficiencia energética como son la operación y el mantenimiento (Gavilán, 2015).

La simulación energética de una edificación se realiza al comparar las ganancias de calor a través de la envolvente, entre un edificio para uso habitacional proyectado y otro edificio de referencia. La envolvente del edificio proyectado está constituida por: paredes, vanos, puertas, techo, piso y superficies inferiores, que conforman el espacio interior de un edificio para uso habitacional. El edificio de referencia, está representado por una envolvente que conserva la misma orientación, las mismas condiciones de colindancia y las mismas dimensiones en planta y elevación del edificio para uso habitacional proyectado (Duarte, 2019).

La eficiencia energética de un edificio se puede determinar con el empleo de métodos de cálculo y a través de la simulación con software, de estos últimos se conocen varios softwares como: Design Builder, Ecotec, Transys, entre otros.

Para realizar la simulación energética de la vivienda tipo en esta investigación se emplea el software DEEVi 1.1(2014). Este software ha sido desarrollado a partir del Programa de Planificación Passivhaus (PHPP). El objetivo principal de esta herramienta es que, a través de la evaluación energética de la vivienda, se guíe a los usuarios hacia diseños de vivienda más sustentables y se cree conciencia de las medidas claves que pueden ser aplicadas para la eficiencia energética en edificaciones habitacionales. Para entender cómo funciona la evaluación energética de la herramienta DEEVi es necesario comprender como funciona el PHPP, puesto que DEEVi está basado en este. El PHPP es una herramienta integrada para cálculos de balance energético que incluye todos los flujos de energía en un edificio. Calcula, además, un balance energético de la vivienda y al mismo tiempo se puede usar para su registro en la plataforma del Registro Único de la Vivienda en México (RUV).

La herramienta DEEVi se desarrolló con el fin de facilitar una evaluación energética de edificios para su registro RUV. En la hoja de resultados se recopila toda la información de la calidad energética del edificio para su registro en el RUV. Los datos de archivo DEEVi se leen por RUV, se guardan y se procesan en el sistema de registro (Passivhaus Institut, 2014).

3.8. Consumos de energía eléctrica y emisiones de CO₂.

En América Latina y el Caribe, la producción energética ha tenido un incremento en el consumo de energía eléctrica. De acuerdo con los datos consultados en la plataforma del Banco Mundial, para el período de 1980 a 2014 se registró un aumento de aproximadamente 112% del consumo promedio de energía eléctrica per cápita, un comportamiento similar al de los niveles de emisiones de CO₂, que durante el mismo periodo de análisis presentaron un crecimiento de cerca del 106%, lo que sugiere una posible influencia del consumo de energía eléctrica en la generación de emisiones de CO₂. En consecuencia, la poca implementación y la tendencia a la baja en el uso de fuentes renovables para la generación de electricidad puede ser la causa del aumento progresivo de las emisiones de CO₂ del sector energético en la región de ALC (Gallego, 2020).

México quema combustibles fósiles –y genera gases de efecto invernadero– para generar la mayor parte de la energía eléctrica que consumimos. Un reporte de la Secretaría de Energía (SENER) detalla que durante los primeros diez meses del 2020 el 75% de la energía disponible en el país fue producida en centrales con quema de combustibles fósiles. Según la Administración de Información de Energía de Estados Unidos, entre esos procesos de producción la combustión de carbón es la principal responsable de la emisión de CO₂ (dióxido de carbono), seguido del Diésel y el aceite de calefacción, la gasolina y el gas propano. El gas natural aparece en último lugar de emisiones, y es el más utilizado para hacer electricidad en México. Pero sigue siendo un combustible fósil, y es contaminante (Animal Político, 2021).

La generación eléctrica basada en fuentes convencionales de energía conlleva la liberación de contaminantes que afectan el medio ambiente y la salud en zonas aledañas a la central de generación; afectaciones que han ido en aumento, debido al incremento en la demanda de energía eléctrica, como resultado del crecimiento de la población y de la actividad económica. Por ello, además de disminuir la emisión de contaminantes, el usar de manera más eficiente la electricidad puede inducir un ahorro en el recibo de pago.

El uso eficiente de la energía eléctrica contribuye a la reducción de la contaminación del aire y las emisiones de CO₂, generando un ahorro económico en los hogares y también

ayudando a disminuir algunos de los daños causados a la salud de la población (PROFECO, 2014).

4. METODOLOGÍA

4.1. Determinación de los morteros a estudiar y sus propiedades físicas.

En esta primera sección del trabajo, se retoman los resultados del proyecto de investigación denominado: “Análisis termo- físico en mortero cemento arena 1:4 con sustitución en diferentes porcentajes de perlita mineral” (Durán, 2017), en donde se realizó un diseño de mezclas de mortero cemento arena proporción 1:4, con sustitución de perlita mineral por arena en 20, 40, 60, 80 y 100 %.

La tabla 4.1.1 muestra los proporcionamientos de materiales que se utilizaron para fabricar los morteros, los cuales fueron sometidos a pruebas de esfuerzo a la compresión, cuyos resultados se muestran en la tabla 4.1.2.

Tabla 4.1.1. Proporcionamientos base morteros en volumen absoluto y fluidez de 110+/- 5%.

volumen: 15 litros

1 : 4

PROPORCIONAMIENTOS BASE MORTEROS EN volumen absoluto Y FLUIDEZ DE 110 +/- 5 %

Material	MEZCLA DE CONTROL (CORREGIDA)	SUSTITUCIÓN 20% PERLITA POR ARENA	SUSTITUCIÓN 40% PERLITA POR ARENA	SUSTITUCIÓN 60% PERLITA POR ARENA	SUSTITUCIÓN 80% PERLITA POR ARENA	SUSTITUCIÓN 100% PERLITA POR ARENA
	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Cemento CPC 30 R	6.225	6.225	6.225	6.225	6.225	6.225
Arena	21.225	16.980	12.735	8.490	4.245	0.000
Agua	4.575	4.549	4.522	4.496	4.469	4.443
Perlita mineral	0.000	0.565	1.131	1.696	2.262	2.827

Fuente: Durán (2017)

Los resultados del proyecto muestran que estos morteros en estado seco alcanzaron una resistencia a la compresión como se muestra en la tabla 4.1.2

Tabla 4.1.2. Resultados de las pruebas de resistencia a compresión del mortero.

MEZCLA PARA 15 LT.						
MATERIAL	MEZCLA DE CONTROL	SUST. 20% PERLITA	SUST. 40% PERLITA	SUST. 60% PERLITA	SUST. 80% PERLITA	SUST. 100% PERLITA
0.015	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
3 DIAS	108	75	77.00	76	33	26
7 DIAS	152	108	98	92	38	32
28 DIAS	188	146	115	105	59	50

Fuente: Durán (2017)

De acuerdo a la NMX-C-486-ONNCCE-2014 los valores de esfuerzo a la compresión a los 28 días de fraguado, desde la mezcla de control, los de 20, 40 y 60 % de sustitución cumplen con los valores mínimos para ser utilizados como morteros con aplicaciones en pegado y enjarres, los morteros con sustitución de 80 y 100 se podrán utilizar como rellenos o sobretechos.

Una vez determinadas las propiedades mecánicas y posibles aplicaciones en la construcción, de los morteros en estado natural y aligerado, se procede en este proyecto, a estudiar su comportamiento térmico, midiendo en laboratorio con equipos especializados, la conductividad térmica de cada uno de ellos, para evaluar posteriormente los beneficios que pueden traer como materiales con capacidades aislantes.

4.2. Medición de conductividad térmica.

De las muestras elaboradas con cada uno de los morteros con proporciones de sustitución de arena por perlita mineral de 0, 20, 40, 60, 80 y 100 % se midieron en laboratorio con equipos especializados (Lamda Metter EP500e) para obtener la conductividad térmica de estos materiales. En la figura 4.2.1 se muestran las probetas en estado seco, listas para realizar esta medición.



Figura 4.2.1. Muestras de Mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral al 0, 20, 40, 60, 80 y 100%. (Elaboración propia)

Utilizando el equipo Thermal Conductivity Test Tool λ -Meter EP500e se llevó a cabo la medición del coeficiente de conductividad térmica de estas muestras de mortero. Según la norma internacional ASTM-C177, y la norma mexicana NMX-C-189-ONNCCE, este equipo realiza mediciones basadas en el "método de la placa caliente aislada".



Figura 4.2.2. Lamda meter EP 500- Equipo de medición de la conductividad térmica del material. (Elaboración propia)

Procedimiento de medición.

El equipo de medición utilizado es un medidor de conductividad térmica Lamda Meter ep 500 calibrado y realiza las mediciones bajo las normas internacionales ISO y EN, lo cual da resultados de alta precisión.

Antes de iniciar la medición, se determina el espesor de las muestras, posteriormente se ubica en el equipo y se desliza la placa superior hacia abajo hasta lograr el contacto con la muestra. En este punto de la medición se toman tres valores del espesor y se promedian, este proceso se repite para las 6 muestras en estudio. Finalmente, también se anota el peso de cada muestra.

Como se observa en la figura 4.2.3 se van colocando las muestras en el centro del equipo, que es donde se ubica el área de medición, cubriendo el resto del área de la placa con guarda de material aislante alrededor de la muestra.



Figura 4.2.3 Colocación de la muestra, la placa aislante de 5 mm y el material aislante en el centro del equipo de medición. (Elaboración Propia)

Una vez colocados la muestra y el material aislante se ubica una placa con un sensor que mantiene conectividad directa con el equipo de medición, luego de este paso se inician las mediciones al deslizar hacia abajo la placa superior.

Se realizan tres mediciones en forma consecutiva. La temperatura de la placa para las tres mediciones tiene valores de 15 °C, 30 °C y 45 °C respectivamente. Al realizar las tres mediciones, la placa opuesta, mantiene una temperatura de 10 °C por debajo de las temperaturas mencionadas anteriormente, esto se realiza para que el equipo mida a tres diferenciales de temperatura distintos y poder adaptar la medición a un modelo de ajuste para el resultado final. El equipo espera a que el valor de la conductividad térmica del material se estabilice en cada una de las mediciones, para tomarlo como el más adecuado. El software del equipo hace una correlación para determinar el resultado final de la conductividad térmica, una vez que se han obtenido los tres resultados, expresándose los mismos en miliwatts sobre metro Kelvin.

Los valores obtenidos de conductividad térmica con mezclas de mortero cemento arena proporción 1:4, con sustitución de perlita mineral por arena en 20, 40, 60, 80 y 100 % se muestran a continuación. En los anexos de esta investigación se exponen los formatos utilizados para este tipo de medición, así como las imágenes y los gráficos de los valores que se fueron obteniendo por medición.

Finalmente, la determinación de los valores de conductividad térmica para las seis muestras de mortero cemento-arena con sustitución de perlita mineral queda resumida en la siguiente tabla:

Tabla 4.2.1. Resultados de la medición de la Conductividad Térmica.

Muestras	Descripción	Conductividad Térmica (W/(m*K))
1	Mezcla de mortero cemento arena proporción 1:4. Fuente: Proceso de medición en el laboratorio (Ver Anexos).	$\lambda = 0,78$
2	Mezcla de mortero cemento arena proporción 1:4, con sustitución de perlita mineral por arena en 20%. Fuente: Proceso de medición en el laboratorio (Ver Anexos).	$\lambda = 0,56$
3	Mezcla de mortero cemento arena proporción 1:4, con sustitución de perlita mineral por arena en 40%. Fuente: Proceso de medición en el laboratorio (Ver Anexos).	$\lambda = 0,47$
4	Mezcla de mortero cemento arena proporción 1:4, con sustitución de perlita mineral por arena en 60%. Fuente: Proceso de medición en el laboratorio (Ver Anexos).	$\lambda = 0,43$
5	Mezcla de mortero cemento arena proporción 1:4, con sustitución de perlita mineral por arena en 80%. Fuente: Proceso de medición en el laboratorio (Ver Anexos).	$\lambda = 0,22$
6	Mezcla de mortero cemento arena proporción 1:4, con sustitución de perlita mineral por arena en 100%. Fuente: Proceso de medición en el laboratorio (Ver Anexos)	$\lambda = 0,14$

Fuente: Elaboración Propia

Los valores obtenidos serán utilizados en la siguiente sección para calcular la resistencia térmica de los sistemas constructivos de muro y techo, analizando por medio del simulador en la vivienda completa.

4.3. Propuesta de sistemas constructivos para losas y muros aplicando las propiedades de los materiales estudiados.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizarán sistemas constructivos tales como el sistema de techo a base de vigueta y casetón de poliestireno y el sistema tradicional de muro con base en bloques de concreto hueco.

A partir de estos sistemas constructivos base se busca aplicarles mejoramientos para aumentar su resistencia térmica a partir de la adición del mortero con perlita mineral para enjarre y relleno; en el caso de los muros de bloques y como sobretechos en el caso de la losa de vigueta y casetón.

Para los muros de bloques lo que se busca en este trabajo es lograr enjarrar y rellenar con el mortero de perlita mineral el muro, a fin de que logren cumplir con sus propiedades y arrojen valores de resistencia térmica capaces de aislar los elementos constructivos y disminuir las ganancias de calor, que se traducen en grandes costos electricidad cuando estas son elevadas.

Descripción del sistema para muros de bloques convencionales

Con base en la norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012 "Industria de la construcción – mampostería – bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – especificaciones y métodos de ensayo" se empleará en esta investigación el bloque de medidas 12x20x40 cm para el levante de muros.

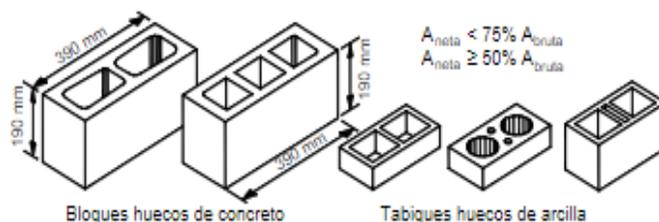


Figura 4.3.1. Tipos comunes de piezas huecas. NMX-C-404-ONNCCE-2012 (2012)

Tabla 4.3.1. Espesores de paredes para bloques lisos.

Dimensión modular de bloques Ancho x alto x largo cm	Dimensión de fabricación de bloques Ancho x alto x largo cm	Espeor mínimo de paredes exteriores mm	Espeor mínimo de paredes interiores mm
10 x 20 x 40	10 x 19 x 39	20*	20
12 x 20 x 40	12 x 19 x 39	20*	20
14 x 20 x 40	14 x 19 x 39	25*	25
15 x 20 x 40	15 x 19 x 39	25*	25
20 x 20 x 40	20 x 19 x 39	32	25
25 x 20 x 40	25 x 19 x 39	32	30
30 x 20 x 40	30 x 19 x 39	32	30

*NOTA 4: En caso de paredes de bloques expuestas a la intemperie sin recubrimiento el espeor (pared exterior) mínimo debe ser de 30 mm en un 90 % del área de dicha cara.

Fuente: NMX-C-404-ONNCCE-2012 (2012)

Descripción del sistema para losas de vigueta de concreto y casetón convencionales

Para el caso de la losa, el casetón de poliestireno es empleado como elemento aligerante, principalmente en losas de techo y entrepiso, ya sean reticulares o nervadas en una dirección; de igual forma en losas reticulares de cimentación, en rellenos del subsuelo o para darle pendiente a losas de gran tamaño y formar los diamantes para las salidas de agua pluvial.

En este trabajo, se evalúa mediante simulación, el comportamiento energético de una vivienda tipo tradicional mexicana en clima cálido seco con tipología constructiva de techo de losa de vigueta y casetón, aplicando el mortero con perlita mineral en toda la superficie de la losa como sobretecho.

Bajo estas condiciones se explora la posibilidad de aplicar este mortero de perlita mineral, ya probado como sobretecho físicamente, para lograr establecer valores de resistencia térmica, que permitan hacer frente a la transferencia de calor a través de la envolvente de la vivienda tipo.

En el caso de la losa de vigueta y casetón de poliestireno se empleará un sistema constructivo con las dimensiones representadas en la siguiente figura, basadas en la ficha técnica de la empresa mexicana FANOSA.

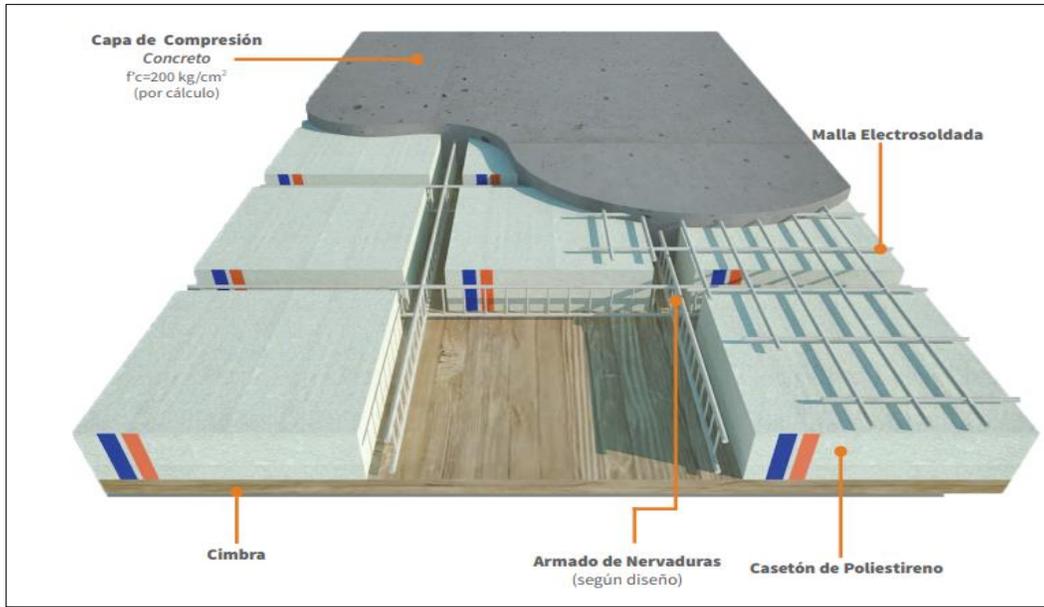


Figura 4.3.2. Colocación de sistema constructivo de losa con casetón de poliestireno. FANOSA (2019)

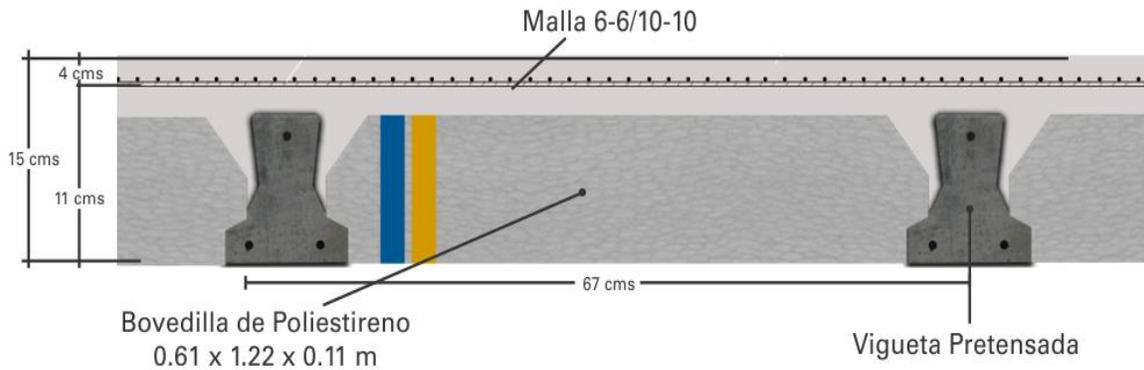
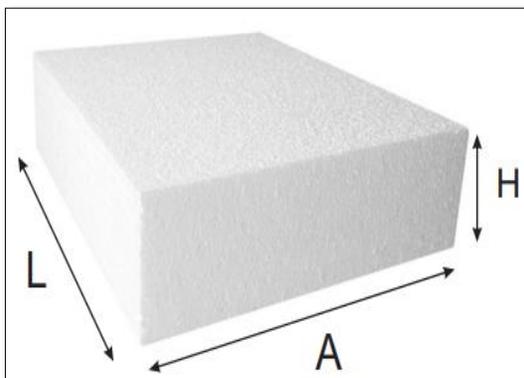


Figura 4.3.3. Sistema constructivo de losa con viguetas pretensadas y casetón de poliestireno. TRABIS (2020)



Ancho	Largo	Espesores
40 cm	40 cm	10,15,20,25 cm
40 cm	60 cm	10,15,20,25 cm
50 cm	50 cm	10,15,20,25 cm
50 cm	60 cm	10,15,20,25 cm
60 cm	60 cm	10,15,20,25 cm

** Otras medidas se podrán fabricar como pedidos especiales, dependiendo del volumen.*

Figura 4.3.4. Ficha técnica del casetón de poliestireno. FANOSA (2019)

Sistemas constructivos propuestos para muros.

Tabla 4.3.2. Sistema constructivo # 1, Caso base con 0% de sustitución de perlita mineral por arena en el mortero para enjarre.

Materiales	Espesor (mm)
Enjarre exterior con mortero convencional.	25
Muro de Bloques 12x20x40 convencional	120
Enjarre interior con mortero convencional.	25

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.3.3. Sistema constructivo # 2 con 20% de sustitución de perlita mineral por arena en el mortero para enjarre.

Materiales	Espesor (mm)
Enjarre exterior con mortero de perlita mineral en sustitución de arena al 20%,	25
Muro de Bloques 12x20x40	120
Enjarre interior con mortero de perlita mineral en sustitución de arena al 20%.	25

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.3.4. Sistema constructivo # 3 con 40% de sustitución de perlita mineral por arena en el mortero para enjarre.

Materiales	Espesor (mm)
Enjarre exterior con mortero de perlita mineral en sustitución de arena al 40%.	25
Muro de Bloques 12x20x40	120
Enjarre interior con mortero de perlita mineral en sustitución de arena al 40%.	25

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.3.5. Sistema constructivo # 4 con 60% de sustitución de perlita mineral por arena en el mortero para enjarre.

Materiales	Espesor (mm)
Enjarre exterior con mortero de perlita mineral en sustitución de arena al 60%.	25
Muro de Bloques 12x20x40	120
Enjarre interior con mortero de perlita mineral en sustitución de arena al 60%.	25

Fuente: Elaboración Propia

Sistemas constructivos propuestos para losas

Tabla 4.3.6. Sistema constructivo # 5. Sistema tradicional de Losa de Concreto Armado

Materiales	Espesor (mm)
Impermeabilizante	6
Concreto simple al exterior	40

Relleno de arena seca para nivelación (exterior)	60
Losa de concreto armado	100
Aplanado interior de yeso	15

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.3.7. Sistema constructivo # 6 con perlita mineral en sustitución de la arena al 80% en el mortero para sobretecho.

Materiales	Espesor (mm)
Impermeabilizante	6
Sobretecho de mortero con perlita mineral 80%.	25
Capa de compresión (concreto armado)	40
Vigueta de concreto	110
Casetón de Poliestireno	110
Aplanado interior de yeso	15

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.3.8. Sistema constructivo # 7 con perlita mineral en sustitución de la arena al 100% en el mortero para sobretecho.

Materiales	Espesor (mm)
Impermeabilizante	6
Sobretecho de mortero con perlita mineral 100%.	25
Capa de compresión (concreto armado)	40
Vigueta de concreto	110
Casetón de Poliestireno	110
Aplanado interior de yeso	15

Fuente: Elaboración Propia

4.4. Simulación térmico energética de la vivienda

En esta sección se inicia con el proceso de simulación de la vivienda utilizando el software DEEVi, y tomando en cuenta todos los casos de los sistemas constructivos propuestos, utilizando los valores de conductividad térmica medidos en laboratorio.

El edificio que se emplea en la investigación, es un caso de estudio de una vivienda tradicional mexicana. De acuerdo a la clasificación de la CONAVI; es una vivienda de tipo popular de 64 metros cuadrados. La distribución de espacios dentro de la vivienda es de: sala, cocina-comedor, 2 recámaras, 1 baño y un cuarto de lavado. La orientación de la vivienda es hacia el Norte.

El sistema constructivo empleado en muros es de mampostería a base de bloque de concreto hueco, en el caso del techo presenta un sistema de vigueta pretensada y casetón de poliestireno y como solución de cimentación se tiene un sistema de losa de cimentación de concreto armado con acero de refuerzo.

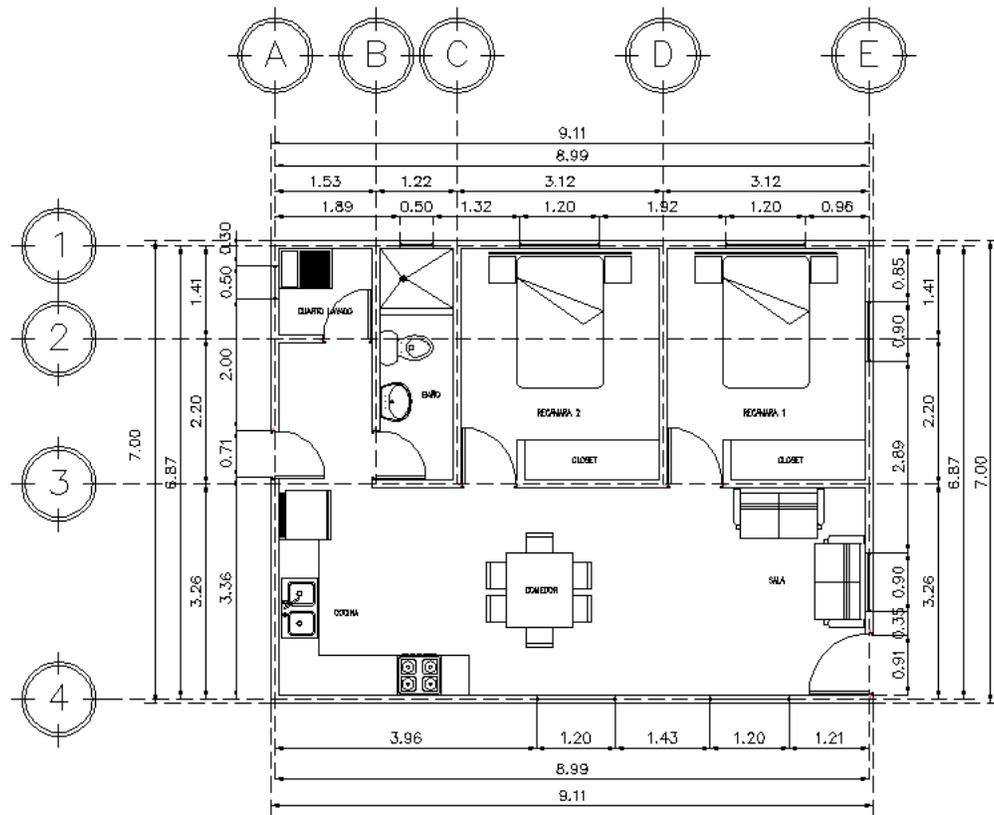


Figura 4.4.1. Planta arquitectónica de vivienda caso de estudio. (Elaboración propia)

Para realizar la simulación se debe dar inicio en la captura de todas las características de la vivienda, como lo son áreas de superficies exteriores, de todas las orientaciones, sistemas constructivos de la envolvente y las propiedades de los materiales, para que el simulador realice un balance energético de la vivienda y arroje resultados.

El área neta de las fachadas exteriores que forman parte de la envolvente térmica se resume en la tabla 4.4.1.

Tabla 4.4.1. Área neta de los muros exteriores de la vivienda.

Muros exteriores	Área Neta (m ²)
Fachada Principal	18.55
Vista Posterior	18.55
Vista Lateral Derecha	24.27
Vista Lateral Izquierda	24.27

Fuente: Elaboración Propia

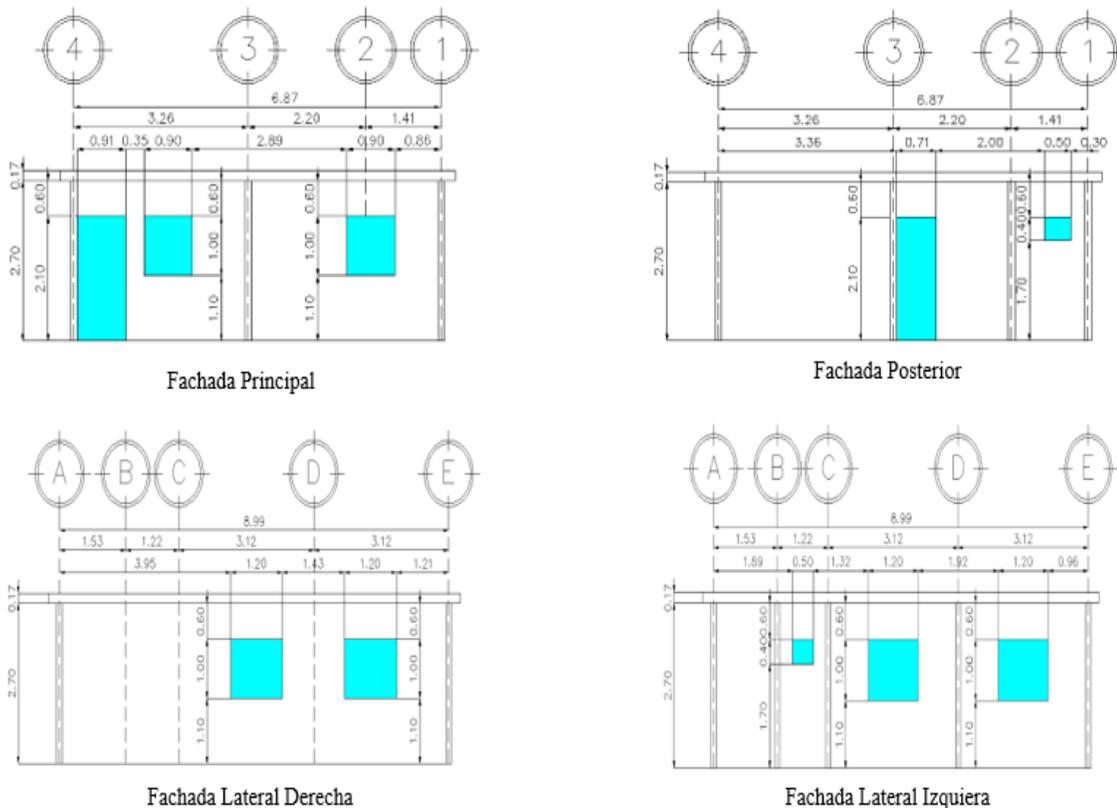


Figura 4.4.2. Elevaciones de la vivienda caso de estudio. Elaboración propia

Para el desarrollo de esta investigación se utilizará el software DEEVi (Diseño Energéticamente Eficiente de la Vivienda), en el mismo se introducen los elementos que componen la envolvente del sistema y su conductividad. Con el fin de obtener el balance energético de la vivienda y dentro de este proceso se calcula la resistencia térmica de cada elemento de la envolvente.

4.5. Determinación de las demandas consumos y emisiones de CO₂ para cada sistema constructivo de la vivienda estudiada.

Las demandas, consumos y emisiones de CO₂ para cada sistema constructivo propuesto en la vivienda caso de estudio también se determinan a partir de la aplicación del software DEEVi (Diseño Energéticamente Eficiente de la Vivienda). Este software permite la evaluación de este indicador para el ahorro energético con relación a otros programas de cálculo, pues logra analizar las emisiones y las demandas consumos de los sistemas constructivos.



Figura 4.5.1. Presentación del Software DEEVi. Passive House Institute (2014)

En esta investigación se definen los sistemas constructivos en los generadores de datos, definiendo en los mismos, los materiales, espesores y conductividad térmica, así como las soluciones de aislamiento térmico para las ventanas y puertas de la vivienda. Esta información suministrada a la hoja de cálculo, es vital para que el software DEEVi arroje un valor de los consumos energéticos y dentro de ese cálculo se definen los valores de resistencia térmica de los sistemas constructivos que se están estudiando.

4.6. Simulación térmica de la vivienda caso de estudio

El estudio de la conductividad térmica en el capítulo anterior permite dar paso al cálculo en el simulador del software DEEVi para determinar los consumos de energía y de la resistencia térmica de los sistemas constructivos de la vivienda estudiada.

Los resultados obtenidos en la investigación de Durán (2017) prueban que se pueden utilizar para enjarre y pegado, las muestras de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 20, 40 y 60%.

Mientras que en el caso de la solución del sistema de techo se emplearán de acuerdo con los resultados de Durán (2017) las muestras de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 80 y 100%, ensayadas y comprobadas mecánicamente para sobretechos. Para la simulación térmica de la vivienda, las muestras se utilizan para enjarre y sobretecho de acuerdo a estos porcentajes de sustitución de perlita mineral por arena.

Para la captura de los datos se toma en cuenta toda la envolvente de la vivienda, la cual está compuesta por los muros exteriores, puertas y el área de techo que corresponde a la envolvente opaca, vale destacar que ni los volados ni los pretilos constituyen parten de la envolvente térmica de la vivienda. Cuando se hace mención de la envolvente térmica, se tienen en cuenta, además los elementos transparentes como puertas y ventanas de cristal.

Captura de los datos en el software DEEVi

En las primeras hojas se describen y llenan todas las casillas referentes a la información que da a conocer la ubicación de la obra y los datos del propietario, así como la zona y clima que impera en el área.

Una vez definidos estos datos generales se procede a realizar la captura de las superficies, apoyándonos en los generadores realizados anteriormente con la herramienta Excel, y que se encuentran en los anexos de esta investigación.

Luego de capturados estos datos se procede a introducirle al programa los Valores-U. Es aquí donde se ingresan los sistemas constructivos de la vivienda y por ende los valores de conductividad térmica y espesores de los materiales componentes de la vivienda caso de estudio.

Es válido destacar que tanto el techo como los muros constituyen la envolvente de la vivienda y por tanto para determinar la resistencia térmica por metro cuadrado de los sistemas constructivos será de vital importancia saber de qué materiales están compuestos los mismos y la conductividad térmica que presentan dichos materiales.

Todos los materiales sin importar su origen o forma presentan una conductividad térmica, propiedad física que los permite reconocer como materiales conductores o no conductores del calor, además dependiendo de qué tan baja puede ser su conductividad también pueden ser materiales aislantes.

Para el cálculo de la resistencia térmica de los sistemas constructivos del caso de estudio se utilizan los valores de conductividad térmica de los materiales que componen dichos sistemas, los cuales son tomados a partir de las tablas contenidas en el Norma Oficial Mexicana NMX-C-460-ONNCCE-2009, esta tabla es referencia para el cálculo de resistencia térmica “R”. En el caso de estudio que nos ocupa se utilizarán los resultados de los ensayos de conductividad térmica practicados al mortero con sustitución de arena por perlita mineral de 20, 40, 60, 80 y 100%.

Una vez obtenido los valores de conductividad térmica, se plantea el proceso a seguir para lograr la determinación de la resistencia térmica por m^2 de los sistemas constructivos estudiados. Este proceso incluye las consideraciones previas al diseño del aislamiento térmico, el valor “R” Total a satisfacer, los materiales, componentes, sistema constructivo y la metodología de cálculo, así como la identificación de la zona térmica y el propósito del aislamiento.

Para los sistemas constructivos de muros, el enjarre se fue cambiando el mortero de acuerdo con el porcentaje de sustitución de perlita mineral por arena en 20, 40 y 60 % y en el caso del sistema constructivo de techo se comprobó para un sobretecho de 80 y 100 % de sustitución de perlita mineral por arena.

Todas estas variantes se compararon con la variante de un sistema de muro tradicional de mortero cemento arena con proporción 1:4. Véase en Tabla 4.6.1 y Tabla 4.6.2.

Sistemas constructivos de Muros y conductividad térmica de los materiales que se van a simular.

A continuación se describen los cálculos de resistencia térmica dentro del simulador, correspondientes a los sistemas constructivos de techo y muros propuestos, utilizando la perlita mineral como material alternativo para aumentar la resistencia térmica.

Nr.elem.const.	Denominación de elemento constructivo	ID Ecotecnología aislamiento	Techo	Pared	Sup. inf.	Piso
1	Muro de bloques 12x20x40			x		
Resistencia térmica superficial [m ² K/W]		ID Ecotecnología recubrimiento	Coeficiente de absorptividad		Piso	
interior R _s : 0.13			60%		x masivo	
exterior R _s : 0.04			Coeficiente de emisividad		ligero	
			0.93			
Superficie parcial 1	λ (W/m·K)	Superficie parcial 2 (opcional)	λ (W/m·K)	Superficie parcial 3 (opcional)	λ (W/m·K)	Esesor [mm]
1. Enjarre con mortero c	0.780					25
2. Muro de Bloques 12x20	1.110					120
3. Enjarre con mortero c	0.780					25
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
Proporción superficie parcial 1		Proporción superficie parcial 2		Proporción superficie parcial 3		Total
100%						17.0 cm
Suplemento valor-U:		Valor-U:		Coeficiente K:		
		2.9222 W/(m ² K)		2.6839 W/(m ² K)		

Figura 4.6.1. Sistema constructivo 1. Elaboración propia

Nr.elem.const.	Denominación de elemento constructivo	ID Ecotecnología aislamiento	Techo	Pared	Sup. inf.	Piso
2	Muro de bloques con perlita mineral (20%)			x		
Resistencia térmica superficial [m ² K/W]		ID Ecotecnología recubrimiento	Coeficiente de absorptividad		Piso	
interior R _s : 0.13			60%		x masivo	
exterior R _s : 0.04			Coeficiente de emisividad		ligero	
			0.93			
Superficie parcial 1	λ (W/m·K)	Superficie parcial 2 (opcional)	λ (W/m·K)	Superficie parcial 3 (opcional)	λ (W/m·K)	Esesor [mm]
1. Enjarre con mortero c	0.560					25
2. Muro de Bloques 12x20	1.110					120
3. Enjarre con mortero c	0.560					25
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
Proporción superficie parcial 1		Proporción superficie parcial 2		Proporción superficie parcial 3		Total
100%						17.0 cm
Suplemento valor-U:		Valor-U:		Coeficiente K:		
		2.7219 W/(m ² K)		2.5140 W/(m ² K)		

Figura 4.6.2. Sistema constructivo 2. Elaboración propia.

Nr.elem.const.	Denominación de elemento constructivo	ID Ecotecnología aislamiento	Techo	Pared	Sup. inf.	Piso			
3	Muro de bloques con perlita mineral (40%)			x					
ID Ecotecnología recubrimiento			Resistencia térmica superficial [m ² K/W]		Coefficiente de absorptividad				
			interior R _{s,i}	0.13	60%	x masivo			
			exterior R _{s,e}	0.04	0.93	ligero			
Superficie parcial 1		λ [W/(m·K)]	Superficie parcial 2 (opcional)		λ [W/(m·K)]	Superficie parcial 3 (opcional)		λ [W/(m·K)]	Esesor [mm]
1.	Enjarre con mortero d	0.470							25
2.	Muro de Bloques 12x20	1.110							120
3.	Enjarre con mortero d	0.470							25
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.									
Proporción superficie parcial 1		Proporción superficie parcial 2		Proporción superficie parcial 3		Total			
100%						17.0		cm	
Suplemento valor-U		Valor-U:		Coeficiente K					
		2.6008		2.4104					

Figura 4.6.3. Sistema constructivo 3. Elaboración propia

Nr.elem.const.	Denominación de elemento constructivo	ID Ecotecnología aislamiento	Techo	Pared	Sup. inf.	Piso			
4	Muro de bloques con perlita mineral (60%)			x					
ID Ecotecnología recubrimiento			Resistencia térmica superficial [m ² K/W]		Coefficiente de absorptividad				
			interior R _{s,i}	0.13	60%	x masivo			
			exterior R _{s,e}	0.04	0.93	ligero			
Superficie parcial 1		λ [W/(m·K)]	Superficie parcial 2 (opcional)		λ [W/(m·K)]	Superficie parcial 3 (opcional)		λ [W/(m·K)]	Esesor [mm]
1.	Enjarre con mortero d	0.430							25
2.	Muro de Bloques 12x20	1.110							120
3.	Enjarre con mortero d	0.430							25
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.									
Proporción superficie parcial 1		Proporción superficie parcial 2		Proporción superficie parcial 3		Total			
100%						17.0		cm	
Suplemento valor-U		Valor-U:		Coeficiente K					
		2.5356		2.3542					

Figura 4.6.4. Sistema constructivo 4. Elaboración propia

Sistemas constructivos de Techo y conductividad térmica de los materiales que se van a simular.

Nr.elem.const.	Denominación de elemento constructivo	ID Ecotecnología aislamiento	Techo	Pared	Sup. inf.	Piso
5	Losa de Concreto Armado		x			
Resistencia térmica superficial [m ² K/W]		ID Ecotecnología recubrimiento	Coeficiente de absorptividad		Coeficiente de emisividad	
interior R _{s,i} : 0.13			60%		0.93	
exterior R _{s,e} : 0.04					x masivo ligero	
Superficie parcial 1	λ [W/m·K]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ [W/m·K]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ [W/m·K]	Espesor [mm]
1. Impermeabilizante	0.170					6
2. Concreto simple al ex	1.700					40
3. Relleno de arena seca	0.630					60
4. Losa de concreto arma	1.700					100
5. Aplanado de yeso al i	0.372					15
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
Proporción superficie parcial 1		Proporción superficie parcial 2		Proporción superficie parcial 3		Total
100%						22.1 cm
Suplemento valor-U		Valor-U: 2.3629 W/(m ² K)		Coeficiente K: 2.0762 W/(m ² K)		

Figura 4.6.5. Sistema constructivo 5. Elaboración propia

Nr.elem.const.	Denominación de elemento constructivo	ID Ecotecnología aislamiento	Techo	Pared	Sup. inf.	Piso
6	Losa de Vigüeta y Casetón con perlita al 80%		x			
Resistencia térmica superficial [m ² K/W]		ID Ecotecnología recubrimiento	Coeficiente de absorptividad		Coeficiente de emisividad	
interior R _{s,i} : 0.13			60%		0.93	
exterior R _{s,e} : 0.04					x masivo ligero	
Superficie parcial 1	λ [W/m·K]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ [W/m·K]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ [W/m·K]	Espesor [mm]
1. Impermeabilizante	0.170					6
2. Sobretecho (mortero c	0.220					25
3. Capa de compresión (c	1.700					40
4. Vigüeta de concreto	1.700	Casetón de Poliest 0.037				110
5. Aplanado de yeso al i	0.372					15
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
Proporción superficie parcial 1		Proporción superficie parcial 2		Proporción superficie parcial 3		Total
20%		80.0%				19.6 cm
Suplemento valor-U		Valor-U: 1.3361 W/(m ² K)		Coeficiente K: 0.6296 W/(m ² K)		

Figura 4.6.6. Sistema constructivo 6. Elaboración propia

Nr. elem. const.	Denominación de elemento constructivo	ID Ecotecnología aislamiento	Techo	Pared	Sup. inf.	Piso
7	Losa de Vigüeta y Casetón con perlita al 100%		x			
Resistencia térmica superficial [m ² K/W]		ID Ecotecnología recubrimiento	Coeficiente de absorptividad		Piso	
interior R _{s,i} : 0.13			60%		x masivo	
exterior R _{s,e} : 0.04			Coeficiente de emisividad: 0.93		ligero	
Superficie parcial 1	l ₁ [m ² /K]l	Superficie parcial 2 (opcional)	l ₂ [m ² /K]l	Superficie parcial 3 (opcional)	l ₃ [m ² /K]l	Espesor [mm]
1. Impermeabilizante	0.170					6
2. Sobretecho (mortero c	0.140					25
3. Capa de compresión (c	1.700					40
4. Vigüeta de concreto	1.700	Casetón de Poliest 0.037				110
5. Aplanado de yeso al 1	0.372					15
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
Proporción superficie parcial 1		Proporción superficie parcial 2		Proporción superficie parcial 3		Total
20%		80.0%				19.6 cm
Suplemento valor-U: [] W/(m ² K)		Valor-U: 1.2197 W/(m ² K)		Coeficiente K: 0.5803 W/(m ² K)		

Figura 4.6.7. Sistema constructivo 7. Elaboración propia

Se introdujeron también en el software las conductividades térmicas de los sistemas para pisos y puertas quedando los mismos de siguiente forma:

Nr. elem. const.	Denominación de elemento constructivo	ID Ecotecnología aislamiento	Techo	Pared	Sup. inf.	Piso
8	Puerta Multypanel			x		
Resistencia térmica superficial [m ² K/W]		ID Ecotecnología recubrimiento	Coeficiente de absorptividad		Piso	
interior R _{s,i} : 0.13			60%		masivo	
exterior R _{s,e} : 0.04			Coeficiente de emisividad: 0.93		ligero	
Superficie parcial 1	l ₁ [m ² /K]l	Superficie parcial 2 (opcional)	l ₂ [m ² /K]l	Superficie parcial 3 (opcional)	l ₃ [m ² /K]l	Espesor [mm]
1. Lámina	50.000					1
2. Aislante	0.035					38
3. Lámina	50.000					1
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
Proporción superficie parcial 1		Proporción superficie parcial 2		Proporción superficie parcial 3		Total
100%						4.0 cm
Suplemento valor-U: [] W/(m ² K)		Valor-U: 0.7963 W/(m ² K)		Coeficiente K: 0.7775 W/(m ² K)		

Figura 4.6.8. Puerta Multypanel. Elaboración propia

Nr.elem.const.	Denominación de elemento constructivo	ID Ecotecnología aislamiento	Techo	Pared	Sup.inf.	Piso
9	Losa de Piso					x
Resistencia térmica superficial [m ² K/W]		ID Ecotecnología recubrimiento	Coeficiente de absorptividad		Coeficiente de emisividad	
interior R _s :	0.13		0%		0.93	
exterior R _s :	0.00				x masivo ligero	
Superficie parcial 1	λ [W/m·K]	Superficie parcial 2 (opcional)	λ [W/m·K]	Superficie parcial 3 (opcional)	λ [W/m·K]	Espesor [mm]
1. Concreto armado	1.700					120
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
Proporción superficie parcial 1		Proporción superficie parcial 2		Proporción superficie parcial 3		Total
100%						12.0 cm
Suplemento valor-U		Valor-U:		Coeficiente K		
		4.9853 W/(m ² K)		5.6506 W/(m ² K)		

Figura 4.6.9. Sistema constructivo 9. Elaboración propia

A continuación, se establecen los valores de resistencia térmica obtenidos para los sistemas constructivos de muros y techos a partir de la captura de las conductividades térmicas de los materiales y los espesores definidos para los mismos.

Tabla 4.6.1. Valores de Resistencia Térmica de los sistemas constructivos de muros

<i>Sistemas Constructivos para Muros</i>	<i>Resistencia Térmica (W/m²K)</i>	<i>Cumplimiento con la NMX-C-460-ONNCCE-2009</i>
<i>Sistema Tradicional</i>	0.35	No cumple
<i>Muro de bloques con perlita mineral al 20 %</i>	0.40	No cumple
<i>Muro de bloques con perlita mineral al 40 %</i>	0.42	No cumple
<i>Muro de bloques con perlita mineral al 60 %</i>	0.43	No cumple

Fuente: Elaboración Propia

El valor de resistencia térmica de los sistemas constructivos capturados es inferior al valor 1 W/m²K, que es el valor mínimo indicado para los sistemas constructivos de muros correspondientes a la zona donde se encuentra ubicado el estado de Sonora según la NMX-

C-460-ONNCCE-2009, por tanto estos sistemas no cumplen con el valor de resistencia térmica mínimo indicado por la Norma.

Tabla 4.6.2. Valores de Resistencia Térmica de los sistemas constructivos de techo

<i>Sistemas Constructivos para Techos</i>	<i>Resistencia Térmica (W/m²K)</i>	<i>Cumplimiento con la NMX-C-460-ONNCCE-2009</i>
<i>Losa de Concreto Armado</i>	0.48	No cumple
<i>Techo de viga de concreto y casetón de poliestireno con mortero de perlita al 80%</i>	1.59	Cumple
<i>Techo de viga de concreto y casetón de poliestireno con mortero de perlita al 100%</i>	1.72	Cumple

Fuente: Elaboración Propia

El valor de resistencia térmica del sistema constructivo de Techo de losa de concreto armado no cumple con la norma, mientras que al modificar los sistemas con la adición de perlita mineral al mortero para sobretechos estos sí cumplen, puesto que el valor mínimo indicado para los sistemas constructivos de techos correspondientes a la zona donde se encuentra ubicado el estado de Sonora según la NMX-C-460-ONNCCE-2009 es de 1.40 W/m²K.

Una vez realizada la simulación de la envolvente completa de la vivienda, el simulador arroja resultados, además de la resistencia térmica por metro cuadrado de cada sistema constructivo, también nos da información acerca de los consumos de energía eléctrica y las emisiones de CO₂ de la vivienda completa dependiendo del sistema constructivo para cada caso. En la siguiente sección se muestran los resultados.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados de la simulación térmica de la vivienda caso de estudio.

Al realizar la simulación térmica de la vivienda se estudian varios sistemas constructivos que conforman la envolvente térmica del caso de estudio. A través de estas simulaciones se obtienen las demandas y consumos de energía, así como el resultado de las emisiones de CO₂. Cada sistema constructivo es diferente debido a la adición de perlita mineral al mortero para enjarre y sobretechos en diferentes porcentajes que modificó su resistencia térmica y se refleja en la reducción de consumos.

Se realizaron las siguientes simulaciones tanto para el sistema tradicional como para los sistemas modificados a partir de la adición en diferentes porcentajes de la perlita mineral. Al combinar sistemas de muros y techos en la vivienda caso de estudio se determinaron las demandas y emisiones de CO₂, que a continuación se resumen.

Muro de bloques 12x20x40 y Losa de concreto armado			Resultados	
Simulaciones	Sistema constructivo de Muros	Sistema constructivo de Techo	Demandas kWh/(m2a)	Emisiones kg/(m2a)
1	Enjarre con mortero (exterior)	Impermeabilizante	403	131
	Muro de Bloques 12x20x40	Concreto simple al exterior		
	Enjarre con mortero (interior)	Relleno de arena seca para nivelación (exterior)		
		Losa de concreto armado		
		Aplanado interior de yeso		

Figura 5.1.1. Simulación 1 caso base. Elaboración propia

Muro de bloques con sustitución de arena por perlita mineral al 20% y Techo de losa de vigueta y casetón de poliestireno			Resultados	
Simulaciones	Sistema constructivo de Muros	Sistema constructivo de Techo	Demandas kWh/(m2a)	Emisiones kg/(m2a)
2	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 20%(exterior)	Impermeabilizante	335	114
	Muro de Bloques 12x20x40	Sobretecho (mortero con perlita mineral 80%)		
	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 20%(interior)	Capa de Compresión (concreto armado)		
		Vigueta de concreto		
		Casetón de Poliestireno		
		Aplanado de yeso al interior		
3	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 20%(exterior)	Impermeabilizante	329	112
	Muro de Bloques 12x20x40	Sobretecho (mortero con perlita mineral 100%)		
	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 20%(interior)	Capa de Compresión (concreto armado)		
		Vigueta de concreto		
		Casetón de Poliestireno		
		Aplanado de yeso al interior		

Figura 5.1.2. Simulaciones 2 y 3 con muro de bloques 12x20x40 con sustitución de perlita mineral por arena en un 20% y techo de losa de vigueta y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero con perlita mineral en sustitución de arena al 80 y 100%. (Elaboración propia).

Muro de bloques con sustitución de arena por perlita mineral al 40% y Techo de losa de vigueta y casetón de poliestireno			Resultados	
Simulaciones	Sistema constructivo de Muros	Sistema constructivo de Techo	Demandas	Emisiones
			kWh/(m2a)	kg/(m2a)
4	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 40%(exterior)	Impermeabilizante	330	113
	Muro de Bloques 12x20x40	Sobretecho (mortero con perlita mineral 80%)		
	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 40%(interior)	Capa de Compresión (concreto armado)		
	Aplanado de yeso al interior	Vigueta de concreto		
		Casetón de Poliestireno		
		Aplanado de yeso al interior		
5	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 40%(exterior)	Impermeabilizante	324	111
	Muro de Bloques 12x20x40	Sobretecho (mortero con perlita mineral 100%)		
	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 40%(interior)	Capa de Compresión (concreto armado)		
	Aplanado de yeso al interior	Vigueta de concreto		
		Casetón de Poliestireno		
		Aplanado de yeso al interior		

Figura 5.1.3. Simulaciones 4 y 5 con muro de bloques 12x20x40 con sustitución de perlita mineral por arena en un 40% y techo de losa de vigueta y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero con perlita mineral en sustitución de arena al 80 y 100%. Elaboración propia

Muro de bloques con sustitución de arena por perlita mineral al 60% y Techo de losa de vigueta y casetón de poliestireno			Resultados	
Simulaciones	Sistema constructivo de Muros	Sistema constructivo de Techo	Demandas	Emisiones
			kWh/(m2a)	kg/(m2a)
6	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 60%(exterior)	Impermeabilizante	327	112
	Muro de Bloques 12x20x40	Sobretecho (mortero con perlita mineral 80%)		
	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 60%(interior)	Capa de Compresión (concreto armado)		
	Aplanado de yeso al interior	Vigueta de concreto		
		Casetón de Poliestireno		
		Aplanado de yeso al interior		
7	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 60%(exterior)	Impermeabilizante	321	110
	Muro de Bloques 12x20x40	Sobretecho (mortero con perlita mineral 100%)		
	Enjarre con mortero de perlita mineral en sustitución de la arena al 60%(interior)	Capa de Compresión (concreto armado)		
	Aplanado de yeso al interior	Vigueta de concreto		
		Casetón de Poliestireno		
		Aplanado de yeso al interior		

Figura 5.1.4. Simulaciones 6 y 7 con muro de bloques 12x20x40 con sustitución de perlita mineral por arena en un 60% y techo de losa de vigueta y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero con perlita mineral en sustitución de arena al 80 y 100%. Elaboración propia

Las simulaciones anteriormente descritas muestran como a medida que se va agregando la perlita mineral en diferentes porcentajes a la mezcla de mortero, se logra disminuir tanto las demandas como las emisiones. Esto se puede traducir en menores ganancias de energía en forma de calor a través de la envolvente térmica, lo que trae consigo una disminución del

consumo energético para el usuario y, además, se generan menos emisiones de CO₂ al medio ambiente.

La tabla 5.1.2 muestra los resultados finales de la investigación. Se ha elaborado a partir de los resultados de las simulaciones en el software DEEVi de los sistemas constructivos anteriormente mencionados.

Se estudió un primer sistema constructivo tradicional sin modificaciones en los materiales componentes del mismo, luego se ha modificó la mezcla de mortero para enjarre y sobretecho con la adición de la perlita mineral en un 20, 40, 60, 80 y 100 %, dicha mezcla de mortero ya ha sido estudiada física y mecánicamente por Durán (2017).

Para la interpretación de los resultados es necesario conocer en qué se traducen dichos valores obtenidos, puesto que no encierran conceptos aislados como lo son: las demandas y las emisiones de CO₂, sino todo lo contrario, van muy ligados entre sí, y de su correcta interpretación depende el impacto de esta investigación.

Tabla 5.1.1. Tabla Resumen con los sistemas constructivos simulados. (Elaboración propia)

<p>Sistema Constructivo 1</p> <p><i>Muro de block 12x20x40 con enjarre de mortero cemento arena 1:4.</i></p> <p><i>Techo de losa de concreto armado</i></p>
<p>Sistema Constructivo 2</p> <p><i>Muro de block 12x20x40 con enjarre de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 20%.</i></p> <p><i>Techo de losa de vigueta de concreto y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 80%.</i></p>
<p>Sistema Constructivo 3</p> <p><i>Muro de block 12x20x40 con enjarre de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 20%.</i></p> <p><i>Techo de losa de vigueta de concreto y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 100%.</i></p>
<p>Sistema Constructivo 4</p>

Muro de block 12x20x40 con enjarre de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 40%.

Techo de losa de vigueta de concreto y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 80%.

Sistema Constructivo 5

Muro de block 12x20x40 con enjarre de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 40%.

Techo de losa de vigueta de concreto y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 100%.

Sistema Constructivo 6

Muro de block 12x20x40 con enjarre de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 60%.

Techo de losa de vigueta de concreto y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 80%.

Sistema Constructivo 7

Muro de block 12x20x40 con enjarre de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 60%.

Techo de losa de vigueta de concreto y casetón de poliestireno con sobretecho de mortero cemento arena 1:4 con sustitución de perlita mineral por arena en un 100%.

Tabla 5.1.2. Resultados de la simulación térmica de la vivienda.

Sistemas constructivos simulados	Demandas kWh/(m ² a)	Emisiones kg/(m ² a)
1	403	131
2	335	114
3	329	112
4	330	113
5	324	111
6	327	112
7	321	110

Fuente: Elaboración propia

La demanda de energía depende en gran medida de las condiciones ambientales y climáticas donde se va a encontrar la vivienda caso de estudio, así como de las características de los materiales con que se cuenta para llevar a cabo su construcción. En el caso del consumo energético, este va más ligado al usuario, ya que esto implica el gasto real de energía que ha de tener la edificación.

Para lograr condiciones de confort dentro de una vivienda es necesario lograr que la misma cuente con sistemas de climatización (calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria), iluminación y el resto de equipamientos eléctricos. Esto sin duda alguna influye en el consumo de esta energía razón por lo cual la demanda debe ser regulada.

En esta investigación se obtienen como resultados de demandas y consumos de nuestro caso de estudio los presentados de la Tabla 5.1.2. En el caso de las demandas, los valores reflejan que para el sistema tradicional se obtiene una demanda de 403 kW/h por metro cuadrado al año, lo que significa que la vivienda construida a partir de los materiales ya señalados y con las condiciones de confort (calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria) suministradas al software estaría teniendo esa cantidad de energía en un período de tiempo determinado por un año. De esta forma si la demanda aumenta la cantidad de energía consumida también aumentará.

Al emplear la perlita mineral para el enjarre de muros y el sobretecho en losas se logra una disminución en los valores de estas demandas a partir de la adición de sus diferentes porcentajes. Los valores de demandas que se obtienen van desde 335 kW/h por metro cuadrado al año hasta 321 kW/h por metro cuadrado al año, razón por la cual se puede percibir una disminución en los valores de la demanda, con respecto al sistema tradicional anteriormente mencionado.

Mientras menor sea la energía total que se requiere para que el interior de la vivienda alcance unas determinadas condiciones de confort, menor también será el consumo energético y en ello juega un papel muy importante las características de los materiales que componen la envolvente de la vivienda.

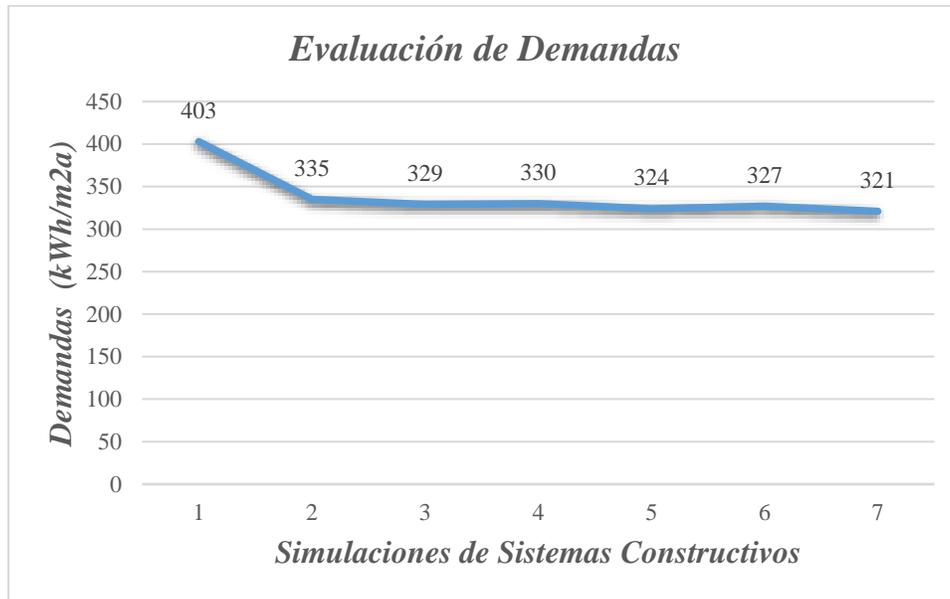


Gráfico 5.1.1. Evaluación de Demandas. Elaboración propia

Cuando se hace un uso indiscriminado de la energía eléctrica, esto se traduce en la constante quema de combustibles fósiles lo que trae consigo emisiones de CO₂ al medio ambiente, las cuales afectan nuestros ecosistemas y la vida de ser humano en general. En México se trabaja por la disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Como bien sabemos, el país es un actor clave reconocido por la comunidad internacional en la lucha contra el cambio climático, fue el primer país en desarrollo en contar con una Ley General de Cambio Climático que reconoce la corresponsabilidad del sector público y de la sociedad (SEMARNAT, 2021).

México emitió 683 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e) de gases efecto invernadero (GEI) en el 2015. Este es el resultado de la actualización del “Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI)” que presenta el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en apego al Artículo 74 de la Ley General de Cambio Climático. Del total de las emisiones, 64% correspondieron al consumo de combustibles fósiles; 10% se originaron por los sistemas de producción pecuaria; 8% provinieron de los procesos industriales; 7% se emitieron por el manejo de residuos; 6% por las emisiones fugitivas por extracción de petróleo, gas y minerías y 5% se generaron por actividades agrícolas. En el inventario también se contabilizaron 148

MtCO₂e absorbidas por la vegetación, principalmente en bosques y selvas. El balance neto entre emisiones y absorciones para el año 2015 fue de 535 MtCO₂e¹ (INECC, 2018).

El resultado de esta investigación con respecto a las emisiones describe una disminución de las mismas a partir de la utilización de la perlita mineral para mejorar las condiciones de térmicas de la vivienda. Para el sistema tradicional es de 131 kg/metro cuadrado al año mientras que al añadirle perlita mineral en diferentes porcentajes a la mezcla de mortero estos valores de emisiones se logran disminuir desde 114 kg /metro cuadrado al año, hasta 110 kg /metro cuadrado al año.

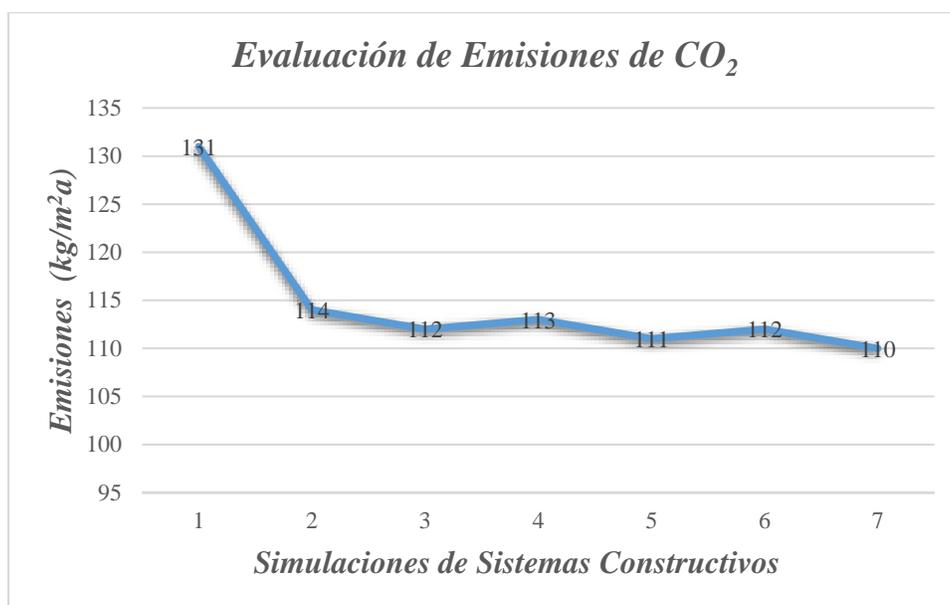


Gráfico 5.1.2. Evaluación de Emisiones de CO₂. Elaboración propia

¹ La unidad de medida de las emisiones de carbono es la tonelada métrica equivalente de dióxido de carbono (MTCO₂e), que es una medida estándar de la industria

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Para alcanzar la realización de sistemas constructivos sustentables, además de lograr hacer cálculos que soporten las cargas de las diferentes estructuras que se acometen, también es necesario que se valore la sostenibilidad de la edificación. El confort de una vivienda está ligado a varios conceptos que resaltan su durabilidad y condiciones óptimas para sus habitantes. En climas cálidos como se presentan en el estado fronterizo de Sonora, este confort se puede ver fuertemente afectado, debido a las altas temperaturas que conllevan a un mayor gasto económico producto a un mayor uso de los equipos de refrigeración. Si se contara con un sistema constructivo que permitiese la resistencia al paso del calor en la envolvente la vivienda se lograría en gran medida disminuir dicho impacto negativo en el confort de los habitantes de la misma.

Con este propósito hemos elaborado esta investigación que lleva consigo la realización de experimentos con el fin de medir la conductividad térmica de una serie de mezclas de mortero con adición de perlita mineral en un 20, 40, 60, 80 y 100 % con sustitución de arena. Dichos morteros ya fueron probados física y mecánicamente anteriormente por Durán (2017). Obteniéndose como resultados de esta investigación que los morteros con adición de perlita en sustitución de la arena en un 20, 40 y 60 % están aptos para ser utilizados como mortero para enjarre, mientras que en el caso de los morteros con adición de perlita en sustitución de la arena en un 80 y 100 % se pueden emplear como sobretechos cumpliendo con la Norma Mexicana NMX-C-486- ONNCCE-2014, por tanto, se demuestra que la perlita mineral logra aligerar las mezclas de mortero.

Las simulaciones realizadas permitieron conocer cómo se comportó la resistencia térmica para los diferentes sistemas constructivos. Se modificaron los sistemas de techo y de muros a partir de la adición de la perlita mineral. Estas simulaciones describen también cómo se comportó la demanda de energía para los diferentes sistemas, y las emisiones de dióxido de carbono.

Estos resultados concluyen que los sistemas constructivos tradicionales no cumplen con la NMX-C-460-ONNCCE-2009. Se obtuvo, además, una conductividad térmica menor en los

sistemas constructivos modificados con perlita mineral, por tanto, la resistencia térmica de estos sistemas es mayor que la del caso base.

Las simulaciones realizadas describen cómo se comportó la demanda de energía para los diferentes sistemas constructivos y las emisiones de dióxido de carbono. Siendo la emisión más baja la de 110 kg/(m²a) y la menor demanda la de 321 kWh/ m²a. La simulación de sistemas constructivos de muros y techos modificados con la adición de perlita mineral al 60% para enjarre y del 100% para sobretechos representó un 20 % de reducción de las demandas y en el caso de las emisiones tuvo una disminución del 16 % con respecto al sistema tradicional sin mejoramientos.

Si bien es cierto que no existe una disminución elevada en los resultados de las simulaciones con respecto al sistema original de muros y bloques empleando el mortero cemento-arena, sí se obtiene una conductividad térmica menor, por lo tanto, la resistencia térmica del sistema constructivo modificado es mayor ya que son magnitudes inversamente proporcionales, además es válido destacar que se reduce la demanda de energía y se disminuyen también las emisiones de CO₂.

6.2.Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en la simulación de los sistemas constructivos añadiendo la perlita mineral en diferentes porcentajes se pudiera hablar de la conveniencia de poder utilizar estas técnicas, debido a que se pueden hacer en obra y se pudieran tener como recomendaciones para la práctica constructiva de manera inmediata, pues todo el estudio es muy consistente en cuanto a su aplicación práctica en la industria de la construcción. Cabe destacar que se pudieran extrapolar dichos resultados para estudiar la idoneidad técnica ante organismos certificadores de materiales de construcción y de nuevos materiales y sistemas constructivos en general.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfa-Gamma (2022). Perlite. Empresa Alfa-Gamma, México. Recuperado de:

(<https://alfagamma.com.mx/productos/construccion/aligerantes/perlita/>).

Álvarez, J., Martín, A., y García, P. (2005). Historia de los morteros. Universidad de Navarra, España.

Arango, J. (2021). El maravilloso mundo del mortero: introducción. Empresa Cemento ALION, España. Recuperado de: <https://alion.com.co/el-maravilloso-mundo-del-mortero/>.

Arriola, J. (2009). Diseño de morteros con cementos hidráulicos para la construcción de muros con elementos de mampostería. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

BECOSAN (2019). ¿Qué es el mortero? Empresa multinacional BECOSAN, Dinamarca. Recuperado de: <https://www.becosan.com/es/que-es-un-mortero/>.

Borbón, A. (2016). Estudio del comportamiento térmico y mecánico de morteros aligerados con perlita mineral. Universidad de Sonora, México.

Borbón, A. (2018). Diseño termofísico de componentes constructivos aligerados, con características térmicas para elaborar muros de vivienda de interés social. Universidad de Sonora, México.

Borbón A., Burgos, D., Castro, S., Duarte, A. y Pacheco, J. (2018). Análisis termofísico de morteros cemento arena 1:4 para construcción, sustituyendo arena por perlita sintética. Universidad de Sonora, México.

Borbón, A., Alpuche, M., Miranda, I., Marincic, I. y Ochoa, J. (2019). Materiales reciclados aligerados y su influencia en el consumo de energía eléctrica en viviendas económicas. Universidad de Sonora, México.

Bustamante, M., Martínez, J. y Macías, J. (2018). Caracterización térmica y mecánica de bloque de concreto. Universidad Internacional SEK, Ecuador e Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Ecuador.

Campos, J. (2014). Desarrollo de morteros ligeros base cemento portland con propiedades térmicas optimizadas mediante la incorporación de un micro co-polímero. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Carvajal, I. y Terreros, L. (2016). Uso de la fibra de cáñamo para mejorar las propiedades mecánicas del Concreto. Universidad Católica, Bogotá, Colombia.

Castillo, C. (2015). Modificación de las propiedades de matrices cementantes mediante la adición de nanopartículas de sílice. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

CONSTRUMATICA (2018). Características de los Morteros. Metaportal de Arquitectura, Ingeniería, y Construcción. España. Recuperado: https://www.construmatica.com/construpedia/Caracter%C3%ADsticas_de_los_Morteros).

Correa, J. y Ratti, G. (2015). Evaluación del efecto de la variación de la dosificación de agregado ligero de arcilla expandida en las propiedades físicas y mecánicas de un concreto estructural aligerado. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Costa, A. (2012). Estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Durán, C. (2017). Análisis termo- físico en mortero cemento arena 1:4 con sustitución en diferentes porcentajes de perlita mineral. Universidad de Sonora, Sonora, México.

Egoavil, A. (2018). Determinación del coeficiente de conductividad térmica del concreto con aditivo de poliuretano residual. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Elizondo, A. (2006). Caracterización del concreto celular elaborado con espuma preformada. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León, México.

Espinal, J. (2007). Evaluación del comportamiento térmico y estructural en vivienda típica de interés social. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Nuevo León, México.

Guerra, M. (2016). Efecto de la temperatura de calcinación sobre la reactividad de cementantes hidráulicos a base de yeso de desecho. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Herrera, M. (2015). Propiedades mecánicas, térmicas y acústicas de un mortero aligerado con partículas de poliestireno expandido (EPS) de reciclaje para recubrimientos en muros y techos. Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.

Huerta, R. (2009). Concretos Ligeros. Revista de la Asociación Argentina del Hormigón Preparado, Argentina.

Ibarra, R. (2018). El impulso de las energías renovables en la lucha contra el cambio climático a través de los certificados ambientales en el sector eléctrico mexicano. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.

INECC (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>.

Junco, C. (2012). Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano. Obtención, caracterización y puesta en obra. Universidad de Burgos, España.

León, L. y Torres, M. (2012). Propuesta de mortero para ser utilizado en la reparación y rehabilitación de estructuras. Departamento de Construcciones de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Cuba.

Lorrio, L. (2011). Análisis del comportamiento térmico de las zeolitas como material ligero, alternativo a la arcilla expandida, en hormigones para formación de pendientes. Universidad Politécnica de Madrid, España.

Malinowski, R.; Garfinkel, Y. (1991). Prehistory of Concrete. Concrete International.

Mendoza, E. (2017). Determinación de la composición química y mineralógica, de 5 tipos de calizas y la relación con su grado de quemabilidad en la producción de óxido de calcio, en el bloque sur de la cantera de carbonatos, Planta San Miguel, Cementos Progreso”. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Niasa México (2018). ¿Qué es un mortero y cómo funciona? Empresa Niasa México, S.A. C.V., México. Recuperado de: <https://www.niasa.com.mx/que-es-un-mortero/>.

NMX-C-189-ONNCCE-2010. Norma Mexicana. Industria de la Construcción - Materiales Termoaislantes - Determinación de la Transmisión Térmica (Aparato de Placa Caliente Aislada).

NMX-C-460-ONNCCE-2009. Norma Mexicana. Industria de la Construcción - Aislamiento Térmico - Valor "R" para la Envolvente de Vivienda por Zona Térmica para la República Mexicana - Especificaciones y Verificación.

NMX-C-486-ONNCCE-2014. Mortero para uso estructural.

NOM-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolventes de edificios no residenciales.

NOM-020-ENER-2011. Norma Oficial Mexicana. Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolventes de Edificios para Uso Habitacional.

Fundación OXFAM Intermón (2019). Efecto invernadero: definición y causas del cambio climático. Fundación OXFAM Intermón, España. Recuperado de: (<https://blog.oxfamintermon.org/efecto-invernadero-definicion-causas-cambio-climatico/>)

Otero, A. (2011). La cal. Escuela Superior de Ávila, España. Recuperado de: <http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%201%20-%20LAS%20ROCAS%20EN%20LA%20CONSTRUCCION.pdf>.

Paulino, J. y Espino, R. (2017). Análisis comparativo de la utilización del concreto simple y el concreto liviano con perlitas de poliestireno como aislante térmico y acústico aplicado a unidades de albañilería en el Perú. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.

Pérez, E. (2014). Aplicación de métodos LEAN en el desarrollo de un proyecto eléctrico enfocado a la automatización de un molino de cemento. Universidad Iberoamericana, Ciudad de México, México.

Pérez, J., Cabanillas, R., Hinojosa, J. y Borbón, A. (2011). Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico. Universidad de Sonora, México.

Quesada, N. (2014). Estudio exploratorio en diseños de mezclas de concreto liviano para Holcim (Costa Rica) S.A. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

Rivera, G. (2013). Concreto Simple. Universidad del Cauca, Colombia.

Rivera, R. (1977). Concretos sin finos con agregados de escoria. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Rodríguez, H. (2017). Concreto liviano a base de poliestireno expandido para la prefabricación de unidades de albañilería no estructural - Cajamarca. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.

SEMARNAT. (2021). México trabaja en la reducción de CO₂ y en fortalecer la adaptación al cambio climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Spiropoulos, J. (1985). Small Scale Production of Lime for Building. Deutsche: GTZ. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?Doi=10.1.1.198.9073&rep=rep1&type=pdf>.

Usedo, R. (2015). Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico. Universidad Politécnica de Valencia, España.

Valdéz, L. y Suárez G. (2010). Hormigones Livianos. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.

Villalva, A. (2018). Resistencia Térmica y Mecánica de un mortero al sustituir al cemento en un 16% de polvo de cáscara de arroz y polvo de conchas de abanico. Universidad San Pedro, Chimbote, Perú.

Villalobos, R., Chávez, L. y Morales, C. (2017). Concreto Ligero. Escuela del Nivel Medio Superior de Guanajuato y Universidad de Guanajuato, México.

ANEXOS

ANEXO A

X - Meter EP500E

PREPARACIÓN DE MUESTRA

13/10/21
FECHA DE MEDICIÓN

INFORMACIÓN DE MUESTRA

No. de muestra: EMA01-1-131021-MIU
Nombre del material: PELITA MANEJAL 0%
Designación de muestra: 0% PM
Peso: 1800 g
Dimensiones: 150.31 mm x 149.78 mm

Lado	Medición 1 (M1)	Medición 2 (M2)	Dimensión Real (MR) (M1+M2)/2= MR
Lado A	<u>150.02</u> mm	<u>150.60</u> mm	<u>150.31</u> mm
Lado B	<u>149.23</u> mm	<u>150.33</u> mm	<u>149.78</u> mm

Grosor real: 40.76 mm

Mediciones	Grosor [(M1+M2+M3)/3]-0.5 = GR
Medición 1 (M1)	<u>40.82</u> mm
Medición 2 (M2)	<u>40.74</u> mm
Medición 3 (M3)	<u>40.73</u> mm
GROSOR REAL (GR)	<u>40.76</u> mm

TEMPERATURAS

Temperatura #1: 10 °C Temperatura ambiente: 21 °C
Temperatura #2: 25 °C Humedad: _____ %
Temperatura #3: 40 °C

RESULTADOS

λ Final: 0.78 W/(m·K) Observaciones: ROSGARINO CIVIL
Densidad: 1963 Kg/m³ MIU - UNISON

ANEXO B

X - Meter EP500E

PREPARACIÓN DE MUESTRA

14/10/21
FECHA DE MEDICIÓN

INFORMACIÓN DE MUESTRA

No. de muestra: EL001-1-141021-MIU
 Nombre del material: CELITA MINERAL 20%
 Designación de muestra: 20% PM - MIU
 Peso: 1620 g
 Dimensiones: 150.09 mm x 150.26 mm

Lado	Medición 1 (M1)	Medición 2 (M2)	Dimensión Real (MR) (M1+M2)/2= MR
Lado A	149.74 mm	150.43 mm	150.09 mm
Lado B	149.80 mm	150.72 mm	150.26 mm

Grosor real: 41.02 mm

Mediciones	Grosor $[(M1+M2+M3)/3]-0.5 = GR$
Medición 1 (M1)	41.05 mm
Medición 2 (M2)	41.00 mm
Medición 3 (M3)	41.03 mm
GROSOR REAL (GR)	41.02 mm

TEMPERATURAS

Temperatura #1: 10 °C Temperatura ambiente: 22 °C
 Temperatura #2: 25 °C Humedad: _____ %
 Temperatura #3: 40 °C

RESULTADOS

λ Final: 0.56 W/(m·K) Observaciones: POSGRADO CIVIL
MIU - UNISON
 Densidad: 1653 Kg/m³

ANEXO C

X - Meter EP500E

PREPARACIÓN DE MUESTRA

15/10/21

FECHA DE MEDICIÓN

INFORMACIÓN DE MUESTRA

No. de muestra: EM003-1-151021-MIV

Nombre del material: PELITA MINERAL 40%

Designación de muestra: 40% PM-MIV

Peso: 1380 g

Dimensiones: 152.80 mm x 151.30 mm

Lado	Medición 1 (M1)	Medición 2 (M2)	Dimensión Real (MR) (M1+M2)/2= MR
Lado A	152.30 mm	153.33 mm	152.80 mm
Lado B	151.70 mm	150.90 mm	151.30 mm

Grosor real: 40.90 mm

Mediciones	Grosor $[(M1+M2+M3)/3]-0.5 = GR$
Medición 1 (M1)	40.90 mm
Medición 2 (M2)	40.90 mm
Medición 3 (M3)	40.89 mm
GROSOR REAL (GR)	40.89 mm

TEMPERATURAS

Temperatura #1: 10 °C Temperatura ambiente: 22 °C

Temperatura #2: 25 °C Humedad: _____ %

Temperatura #3: 40 °C

RESULTADOS

λ Final: 0.47 W/(m·K)

Observaciones: Postgrado Civil

Densidad: 1500 Kg/m³

MIV - Unison

ANEXO D

- Meter EP500E

PREPARACIÓN DE MUESTRA

16/10/21
 FECHA DE MEDICIÓN

INFORMACIÓN DE MUESTRA

No. de muestra: EM004-161021-1
 Nombre del material: PELITA MINERAL 60%
 Designación de muestra: 60% PM - MIU
 Peso: 1420 g
 Dimensiones: 150.90 mm x 150.40 mm

Lado	Medición 1 (M1)	Medición 2 (M2)	Dimensión Real (MR) (M1+M2)/2= MR
Lado A	<u>150.10</u> mm	<u>151.59</u> mm	<u>150.84</u> mm
Lado B	<u>150.06</u> mm	<u>150.79</u> mm	<u>150.42</u> mm

Grosor real: 40.92 mm

Mediciones	Grosor $[(M1+M2+M3)/3]-0.5 = GR$
Medición 1 (M1)	<u>40.91</u> mm
Medición 2 (M2)	<u>40.88</u> mm
Medición 3 (M3)	<u>40.96</u> mm
GROSOR REAL (GR)	<u>40.9166</u> mm

TEMPERATURAS

Temperatura #1: 10 °C Temperatura ambiente: 22 °C
 Temperatura #2: 25 °C Humedad: _____ %
 Temperatura #3: 40 °C

RESULTADOS

λ Final: 0.43 W/(m·K) Observaciones: Programa Civil
 Densidad: 1440 Kg/m³ MIU - UNISON

ANEXO E

X - Meter EP500E

PREPARACIÓN DE MUESTRA

17/10/21

FECHA DE MEDICIÓN

INFORMACIÓN DE MUESTRA

No. de muestra: EM007-1-171021
 Nombre del material: PERLITA MINERAL 80%
 Designación de muestra: 80% PM-MIU
 Peso: 1120 g
 Dimensiones: 152.30 mm x 151.30 mm

Lado	Medición 1 (M1)	Medición 2 (M2)	Dimensión Real (MR) (M1+M2)/2= MR
Lado A	152.37 mm	152.22 mm	152.29 mm
Lado B	150.80 mm	151.74 mm	151.27 mm

Grosor real: 40.85 mm

Mediciones	Grosor $[(M1+M2+M3)/3]-0.5 = GR$
Medición 1 (M1)	40.86 mm
Medición 2 (M2)	40.88 mm
Medición 3 (M3)	40.82 mm
GROSOR REAL (GR)	40.85 mm

TEMPERATURAS

Temperatura #1: 10 °C Temperatura ambiente: 22 °C
 Temperatura #2: 25 °C Humedad: _____ %
 Temperatura #3: 40 °C

RESULTADOS

λ Final: 0.22 W/(m·K) Observaciones: POSCIANO CIVIL
 Densidad: 1190 Kg/m³ MIU-UNISON

ANEXO F

X - Meter EP500E

PREPARACIÓN DE MUESTRA

18/10/21

FECHA DE MEDICIÓN

INFORMACIÓN DE MUESTRA

No. de muestra: EN009-1-181021-MIU

Nombre del material: PELITA MINERAL 100%

Designación de muestra: 100% PM - MIU

Peso: 940 g

Dimensiones: 150.30 mm x 151.30 mm

Lado	Medición 1 (M1)	Medición 2 (M2)	Dimensión Real (MR) (M1+M2)/2= MR
Lado A	<u>150.10</u> mm	<u>150.46</u> mm	<u>150.28</u> mm
Lado B	<u>150.97</u> mm	<u>151.73</u> mm	<u>151.35</u> mm

Grosor real: 40.70 mm

Mediciones	Grosor [(M1+M2+M3)/3]-0.5 = GR
Medición 1 (M1)	<u>40.78</u> mm
Medición 2 (M2)	<u>40.76</u> mm
Medición 3 (M3)	<u>40.71</u> mm
GROSOR REAL (GR)	<u>40.75</u> mm

TEMPERATURAS

Temperatura #1: 10 °C

Temperatura ambiente: 22 °C

Temperatura #2: 25 °C

Humedad: _____ %

Temperatura #3: 40 °C

RESULTADOS

λ Final: 0.14 W/(m·K)

Observaciones: POSGRADO CIVIL

Densidad: 1016 Kg/m³

MIU - UNISON