



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL



Mortero con espuma de poliuretano reciclado aplicado como recubrimiento térmico exterior en muros

Tesis que para obtener el Grado de:

Maestro en Construcción

Presenta:

Ing. Elmer Marcial Cervantes Ramírez

Directora:

Dra. Danna Lizeth Trejo Arroyo

Chetumal, Quintana Roo, México, enero 2019

Contenido

RESUMEN.....	4
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN.....	6
CAPÍTULO 1	9
FUNDAMENTOS.....	9
1.1. Antecedentes	10
1.2. Planteamiento del problema	13
1.3. Marco teórico	14
1.4. Justificación	24
1.5. Hipótesis	24
1.6. Objetivos	25
CAPÍTULO 2	26
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	26
2.1. Metodología	27
CAPÍTULO 3	38
TRABAJO DE LABORATORIO.....	38
3.1. Caracterización de los materiales	39
CAPÍTULO 4	43
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	43
Bibliografía.....	82

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme concluir una etapa muy importante en mi vida.

A mi madre y hermana, cuyo apoyo incondicional fue fundamental para lograr el objetivo que me propuse hace aproximadamente dos años; gracias Minerva y Patricia por siempre estar presentes en mis planes de principio a fin.

Mi más sincero agradecimiento a mis maestros: Dra. Danna Lizeth Trejo Arroyo, M.C. Alberto Yeladaqui Tello, Dr. Ricardo E. Vega Azamar, Dr. Julio César Cruz Argüello, gracias a todos por compartir sus conocimientos y por brindarme su apoyo y su amistad.

Al Ing. Set Jubal Castillo Ávila, responsable del taller de Ingenierías de la Universidad de Quintana Roo, le agradezco su constante asesoría y apoyo en el manejo y operación del equipo durante el tiempo en el cual se realizaron las pruebas de conductividad térmica y calor específico, así como su valiosa participación en el análisis de la información obtenida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado mediante el programa de becas para posgrado nivel maestría

A El Colegio de la Frontera del Sur (ECOSUR-Chetumal) por permitir el acceso y uso de sus instalaciones para realizar las pruebas de Microscopia Electrónica de Barrido.

A todas y cada una de las personas que aquí no he nombrado y que en algún momento me alentaron para seguir adelante.

A todos, gracias.

Índice de figuras

Figura 1. Temperatura media mensual de Chetumal Quintana Roo. Datos obtenidos de INEGI.....	14
Figura 2. Proporciones y propiedades en estado fresco de las mezclas de mortero.....	19
Figura 3. Variación de las propiedades mecánicas con la edad.	19
Figura 4. Proporciones y propiedades en estado fresco de las mezclas de mortero.....	20
Figura 5. Densidad y datos mecánicos de los compuestos de mortero probados.	21
Figura 6. Proceso de elaboración del poliuretano.....	23
Figura 7. Diagrama de metodología.....	27
Figura 8. Procedimiento de granulometría.....	28
Figura 9. procedimiento de secado de muestras.	30
Figura 10. Procedimiento de la prueba del cono para humedad.....	30
Figura 11. Empleo de picnómetro para la prueba de gravedad específica.....	31
Figura 12. Mesa de fluidez.....	32
Figura 13. Conductímetro con placa de guarda.	35
Figura 14. Especímenes de mortero empleados en la prueba de placa caliente.	35
Figura 15. Registrador de datos de temperatura y humedad HOB0 ux100-xx.	36
Figura 16. Elaboración de prototipos de 2.5 x 2.5 x 2.6 metros.	36
Figura 17. Proceso de mezclado de mortero.....	40
Figura 18. Probetas dentro de los moldes en Proceso de fraguado.....	41
Figura 19. Proceso de curado.	42
Figura 20. Aplicación de mortero sobre muro de block.....	42
Figura 21. Curva granulométrica del agregado.....	45
Figura 22. Resistencia a compresión de muestras de mortero con sustitución parcial de agregado fino por espuma rígida de poliuretano reciclado.....	50
Figura 23. Proceso de ensayo de adherencia de muestras de mortero de recubrimiento.....	51
Figura 24. Conductímetro de placa caliente con guarda.	53
Figura 25. Probetas para ensayo de placa de caliente.....	53
Figura 26. Proceso de ranurado en placas.	54
Figura 27. Sándwich con las probetas y placa caliente.	54
Figura 28. Instalación de probetas en conductímetro.	55
Figura 29. Ensayo de placa caliente con guarda.	56
Figura 30. Respaldo de la información de cada corrida.....	56
Figura 31. Calorímetro.....	58
Figura 32. Procedimiento de ensayo de calor específico.	58
Figura 33. Plano arquitectónico de prototipo.	60
Figura 34. Mampostería con piedra de la región.	61
Figura 35. Siembra y losa de vigueta y bovedilla.....	61
Figura 36. Colocación de Calcreto de 5 cm de espesor.	62
Figura 37. Firme de concreto con acabado rustico.....	62
Figura 38. Aplicación de envolvente térmica.	63
Figura 39. Aplicación de envolvente térmica con acabado rustico.	64
Figura 40. Sellado de prototipos con espuma expandible de poliuretano.	64
Figura 41. Instalación de hobos.....	65

Figura 42. Sellado de puertas y ventanas con espuma de poliuretano expandible.	65
Figura 43. Sensor dht22 de humedad y temperatura.	66
Figura 44. Temperatura promedio por mes.	67
Figura 45. Humedad promedio por mes.	68
Figura 46. Temperatura mínima por mes.	69
Figura 47. Temperatura máxima por mes.	69
Figura 48. Humedad mínima por mes.	70
Figura 49. Humedad máxima por mes.	70
Figura 50. Temperatura promedio por día del mes de mayo.	71
Figura 51. Humedad promedio por día del mes de mayo.	72
Figura 52. Temperatura promedio por día del mes de junio.	72
Figura 53. Humedad promedio por día del mes de junio.	73
Figura 54. Temperatura promedio por día del mes de julio.	74
Figura 55. Humedad promedio por día del mes de julio.	74
Figura 56. Temperatura promedio por día del mes de agosto.	75
Figura 57. humedad promedio por día del mes de agosto.	76
Figura 58. Temperatura promedio por día del mes de septiembre.	77
Figura 59. Humedad promedio por día del mes de septiembre.	77
Figura 60. Muestras para microscopia.	78
Figura 61. Instalación de las muestras en probetas del microscopio.	78
Figura 62. MEB (750x) morfología de partículas de poliuretano en mortero con sustitución del 15 % de agregado fino por espuma de poliuretano.	79
Figura 63. MED (220X) zona de interfase entre partícula de poliuretano y pasta de mortero con sustitución del 20 % de agregado fino por espuma de poliuretano.	80

Índice de tablas

Tabla 1. Dosificación de especímenes.	34
Tabla 2. Granulometría del agregado fino.	44
Tabla 3. Valores de densidad relativa y % de absorción del agregado fino.	45
Tabla 4. Dosificación de las diferentes mezclas.	48
Tabla 5. Resultados de ensayo de adherencia.	51
Tabla 6. Resultados de conductividad térmica.	57
Tabla 7. Resultados del ensayo de calor específico.	59

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Peso volumétrico suelto.	46
<i>Ecuación 2. Ecuación de Fourier modificada.</i>	56
Ecuación 3. Ecuación de calor específico.	59

RESUMEN

En esta investigación se presenta un estudio de la resistencia a la compresión, adherencia entre mortero de recubrimiento y muro de block y propiedades térmicas, empleando espuma rígida de poliuretano reciclado en diferentes proporciones para la elaboración de mortero de recubrimiento aligerado exterior. Se produjeron diferentes dosificaciones base cemento, agregado fino calizo, agua y poliuretano, donde se reemplazó el agregado fino por espuma de poliuretano en un 15, 20 y 25 % en volumen. Los resultados mostraron que a mayor sustitución de agregado por poliuretano la resistencia mecánica se ve disminuida linealmente, en el caso de la adherencia, la sustitución de 20 % presentó un mejor desempeño físico sobre las demás dosificaciones y en el caso de los resultados de estudios sobre coeficiente de conductividad térmica la muestra con 20% de sustitución fue la que presentó el valor más bajo de coeficiente comparado con las demás muestras, el calor específico se mantuvo muy similar entre las muestras pero el monitoreo de la aplicación en condiciones reales del mortero modificado presentó mejores resultados que el mortero de recubrimiento cemento arena relación 1:3. Lo que sugiere que, en morteros de recubrimiento se puede emplear un material reciclado y reducir el consumo de materiales naturales pétreos sin comprometer sus propiedades físico-mecánicas y mejorar sus propiedades térmicas.

ABSTRACT

In this research, a study of the resistance to compression, adhesion between coating mortar and block wall and thermal properties is presented, using rigid polyurethane foam recycled in different proportions for the production of exterior lightened coating mortar. Different dosages were produced based on cement, fine limestone aggregate, water and polyurethane, where the fine aggregate was replaced by polyurethane foam in 15, 20 and 25% by volume. The results showed that the greater substitution of aggregate by polyurethane, the mechanical resistance is decreased linearly, in the case of adherence, the substitution of 20% presented a better physical

performance on the other dosages and in the case of the results of studies on coefficient of thermal conductivity the sample with 20% substitution was the one that presented the lowest value of coefficient compared with the other samples, the specific heat remained very similar between the samples but the monitoring of the application in real conditions of the modified mortar presented Better results than the mortar coating cement sand ratio 1: 3. This suggests that, in coating mortars, a recycled material can be used and the consumption of natural stone materials can be reduced without compromising its physical-mechanical properties and improving its thermal properties.

INTRODUCCIÓN

Debido a los cambios constantes en el clima, surgen nuevas problemáticas que buscan como solución, mejorar el desempeño térmico de los materiales empleados en la construcción de vivienda, estas posibles soluciones van desde la adición de un nuevo material hasta el remplazo de los materiales comúnmente empleados (Arboit, Arena, & de Rosa, 2008).

En la zona sur del estado de Quintana Roo, el recubrimiento de muros de uso más generalizado es el mortero de cemento-agregado fino calizo a relaciones de 1:3 y 1:5.

En las nuevas tendencias de remplazo y adición de materiales para la construcción, el empleo del reciclaje para reincorporar materiales en desuso al proceso de construcción toma un papel importante.

Por otro lado, la industria de refrigeración de alimentos, con su tendencia a mejorar los equipos por otros ahorradores de energía, pone a los actuales en situación de obsoletos, estos al final de su vida útil forman parte del desperdicio al ser apilados o abandonados después de extraer los elementos como el cobre y aluminio, y el resto ocupa grandes espacios debido a su gran volumen y difícil destrucción. Es importante emplear un método de reciclaje de estos desperdicios como la espuma de poliuretano, la cual, debido a sus propiedades como su durabilidad, alta densidad, no inflamable, hidrofóbico; es una opción potencial para emplearse como sustituto del agregado fino calizo en morteros de recubrimiento.

La mayoría de los refrigeradores de desecho no llega al lugar de tiro autorizado, por falta de medios de transporte por lo que la gente opta por abandonarlos en lotes deshabitados o al frente de terrenos vacíos, lo cual se convierte en un foco para enfermedades.

En la literatura se han presentado estudios de morteros con agregados finos en su mayoría de provenientes de arena de río, como en el estudio de Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de

partículas de poliestireno expandido (Ferrándiz-Mas & García-Alcocel, 2012) los cuales han demostrado que es posible sustituir el agregado fino por partículas de poliestireno manteniendo el tamaño de partícula entre 0 y 4 mm, es importante mencionar que con tamaños de partícula mayor la distribución se complica. Así como estudios sobre la incorporación de espuma de poliuretano rígido en morteros aligerados con sustitución parcial de la arena (Gadea, Rodríguez, Campos, Garabito, & Calderón, 2010) los cuales establecieron características importantes en el mortero como son trabajabilidad, densidad, contenido de aire y la evolución de la resistencia a la compresión en función de la edad del mortero. Otros estudios sobre morteros ligeros que contienen poliestireno expandido y cenizas de lodo de papel, ambos materiales de desperdicio problemático (Ferrándiz-Mas, Bond, García-Alcocel, & Cheeseman, 2014), (Junco, Gadea, Rodríguez, Gutiérrez-González, & Calderón, 2012), (Ben Fraj, Kismi, & Mounanga, 2010) demostraron que la reincorporación de materiales de desperdicio como sustitución del agregado se hace posible y contribuye a la no sobreexplotación de agregados pétreos.

En estudios previos se han realizado sustituciones hasta el 100% del agregado fino por espuma rígida de poliuretano (Gadea et al., 2010), (Junco et al., 2012), (Mounanga, Gbongbon, Poullain, & Turcry, 2008) y (Ben Fraj et al., 2010) sin embargo, la resistencia mecánica a la compresión se vio disminuida alarmantemente. En este estudio se estableció como parámetro máximo la sustitución de agregado fino por espuma de poliuretano hasta el 25%, parámetros sugeridos en el que la resistencia a la compresión no se ve comprometida.

El objetivo de esta investigación es estudiar el desempeño térmico de un mortero empleado como recubrimiento exterior en muros, con sustitución del agregado fino por espuma de poliuretano con respecto a su volumen del 15% al 25% y comparar las propiedades de un mortero con sustitución parcial del agregado calizo por espuma rígida de poliuretano reciclado con un mortero de elaboración tradicional, reincorporar un desperdicio a la industria de la construcción y a su vez reducir el coeficiente de conductividad térmica del mortero de recubrimiento, los pasos a seguir son caracterizar físicamente el agregado calizo y la espuma rígida de

poliuretano, establecer las diferentes dosificaciones de acuerdo a la literatura para finalmente estudiar las propiedades del mortero modificado y compararlas con el mortero tradicional relación 1:3.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS

1.1. Antecedentes

En la actualidad, las dimensiones de las viviendas de interés social se ha reducido considerablemente y dentro del proceso constructivo se están implementando tecnologías de aislantes térmicos de sobreponer o tipo placas en plafones y muros, donde una de las consecuencias negativas, es la reducción de los espacios interiores debido a los espesores de soporte para la instalación de aislantes comerciales, proyectos de investigación como este, están enfocados a encontrar una mejora en el desempeño térmico de la vivienda, sin reducir los espacios interiores con aparatosas instalaciones, por lo cual la modificación de los recubrimientos comunes empleados en la zona es la opción más prometedora, permitiendo emplear así materiales de residuo al mortero, para aligerarlo o para aportar mejoras a este como es el caso de aislantes térmicos, mejoras en trabajabilidad, en velocidad de fraguado y resistencia principalmente.

Ferrándiz, et al., (2014) en su estudio desarrollaron morteros de cemento ligeros con propiedades de aislamiento térmico mediante la incorporación de poliestireno expandido (EPS) y cenizas de lodo de papel (PSA), ambos materiales de desperdicio problemático. Los morteros formados tenían baja conductividad térmica y baja densidad aparente en comparación con muestras de control. Los morteros determinados como eficientes, que contienen hasta un 20% de PSA y un 60% de EPS se consideran adecuados para su uso en aplicaciones de revestimiento y enlucido.

Ferrándiz y García (2012), realizaron un estudio sobre caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS). El objetivo del estudio fue evaluar la influencia de la adición de distintos tipos y dosificaciones de poliestireno expandido, tanto comerciales como procedentes de reciclado, sobre las características físicas y mecánicas de morteros de cemento Portland. Las variables estudiadas fueron: consistencia, aire ocluido, densidad aparente, resistencias mecánicas, porosidad, absorción de agua y absorción acústica. Los morteros también se han caracterizado

por microscopia electrónica de barrido. Con objeto de mejorar la trabajabilidad de los morteros se ha empleado aditivos aireantes, retenedor de agua y fluidificante. Los resultados muestran que al aumentar la cantidad de poliestireno expandido la trabajabilidad y las resistencias mecánicas disminuyen.

Gadea, et al., (2010) en su estudio presentaron los resultados sobre el uso de residuos de espuma rígida de poliuretano con mezclas a base de cemento para producir morteros ligeros. El poliuretano rígido se trituró hasta tamaños de partícula de menos de 4 mm antes de su uso como sustituto de agregado. Se definieron las características de las muestras de ensayo y se ensayaron tanto en estado fresco como endurecido. Los resultados muestran que un aumento en la cantidad de poliuretano afecta al mortero, disminuyendo su densidad y propiedades mecánicas, al tiempo que aumenta su trabajabilidad, permeabilidad y contenido de aire ocluido. Estos resultados confirman que el mortero producido con poliuretano reciclado es comparable al mortero ligero fabricado con materiales tradicionales.

Junco, et al., (2012) analizaron morteros de mampostería hechos con cemento Portland, arena, agua y espuma de poliuretano reciclado blanco de desechos industriales. En primer lugar, se prepararon diferentes mezclas mediante la sustitución de diferentes cantidades de arena por volúmenes equivalentes de poliuretano y luego, con diferentes relaciones de cemento / agregados. El estudio comparativo se realizó sobre el efecto de diferentes pruebas de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas de estos morteros bajo flexión y compresión. Para este propósito, las muestras fueron expuestas a diferentes pruebas de corrosión y dureza: resistencia al calor seco, agua caliente, prueba de salinidad y prueba de Kesternich. Después del envejecimiento, se observó una pequeña reducción en la resistencia a la compresión. Sin embargo, en todas las muestras, los valores de resistencia fueron suficientemente altos para considerar que estos tipos de materiales reciclados permanecen prácticamente no afectados en comparación con los especímenes de referencia. Finalmente, se realizaron ensayos de reacción de álcali-sílice para determinar la estabilidad química de estos morteros.

Derek Kramar (2011) presenta una investigación sobre el efecto de la densidad en el mortero de cemento sobre sus propiedades mecánicas bajo una carga estática.

La reducción de la densidad se logró mediante la adición de perlita expandida como un agregado liviano en la pasta de cemento mediante la sustitución en volumen del cemento en la relación de 0 a 8. Esto produjo un rango de densidades entre 1000 y 2000 kg / m³. La respuesta de compresión y flexión de estas mezclas se determinó para especímenes de escala geométrica para estudiar el efecto del tamaño. Algunas mezclas se reforzaron con microfibras de polímero y los parámetros de resistencia a la fractura en Modo I se evaluaron mediante pruebas de flexión de vigas con muescas. Cuando se compara con una pasta de cemento Portland de referencia, la resistencia a la compresión y el módulo elástico se escalan como el cubo de la densidad, mientras que la resistencia a la fractura varía linealmente con ella. El estudio muestra que el efecto del tamaño de la muestra sobre la resistencia a la compresión y la flexión disminuye con una caída en la densidad de la mezcla y también con el refuerzo de fibra.

La creciente demanda de viviendas, implica un mayor consumo de materiales pétreos de origen natural, la simple producción del mortero de albañilería empleado como recubrimiento en muros, consume grandes cantidades de agregado fino, la cual pudiera ser menor al poder lograr sustituirla por materiales de desperdicio con propiedades térmicas, con lo cual se pudiera contrarrestar dos problemáticas con una sola solución, la cual sería emplear residuos de espuma de poliuretano como sustituto del agregado fino.

kramar y Bindiganavile (2013) estudiaron la respuesta mecánica de los morteros livianos sometidos a cargas de impacto en flexión.

El agregado de perlita expandida con una densidad aparente de 64 kg / m³ se usó entre 0 y 8 veces por volumen de cemento Portland para producir un rango de morteros con una densidad de entre 1000 y 2000 kg / m³. Algunas muestras se reforzaron con una microfibra de polipropileno a una fracción de volumen del 0,1% y la resistencia dinámica a la fractura se evaluó mediante un sistema de impacto de caída de peso instrumentado. Se llevaron a cabo pruebas complementarias en

compresión bajo una carga casi estática para estandarizar las mezclas. La resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad se escalan como el cubo de la densidad relativa, definido como la relación entre la densidad del mortero y la de la pasta de cemento Portland. Mientras que la resistencia a la flexión y la resistencia a la fractura fueron linealmente proporcionales a la densidad relativa del mortero bajo carga casi estática, hubo un aumento en su sensibilidad a la densidad relativa a tasas de carga más altas. Contrariamente a lo que se ve en el concreto regular, el refuerzo de la fibra condujo a un aumento en la sensibilidad a la tasa de tensión de la resistencia a la flexión en morteros ligeros. Para la misma velocidad de impacto, las tasas de estrés experimentadas por un espécimen fueron fuertemente influenciadas por su densidad. Mientras que la sensibilidad a la tasa de tensión de la resistencia a la flexión disminuyó con una disminución en la densidad de la mezcla.

1.2. Planteamiento del problema

En la actualidad, el clima es un factor que ha variado constantemente con el tiempo, en el caso de la ciudad de Chetumal Quintana Roo, este se ha hecho cada vez más cálido, orillando a los pobladores a construir casas más frescas y/o que eviten el paso del calor al interior.

La Figura 1, presenta la temperatura promedio mensual de Chetumal Quintana Roo a lo largo de los años 2011, 2013, 2014 y 2015. De acuerdo con los datos de la ilustración 1 se puede notar el claro aumento de la temperatura promedio mensual a cada año de igual modo se destaca el mes de agosto como el más cálido en 2014 y 2015 con temperatura promedio de 30.6 y 30.7 grados en el mismo orden, por lo cual se buscan nuevas tecnologías para mejorar el desempeño térmico de la envolvente de las casas habitación.

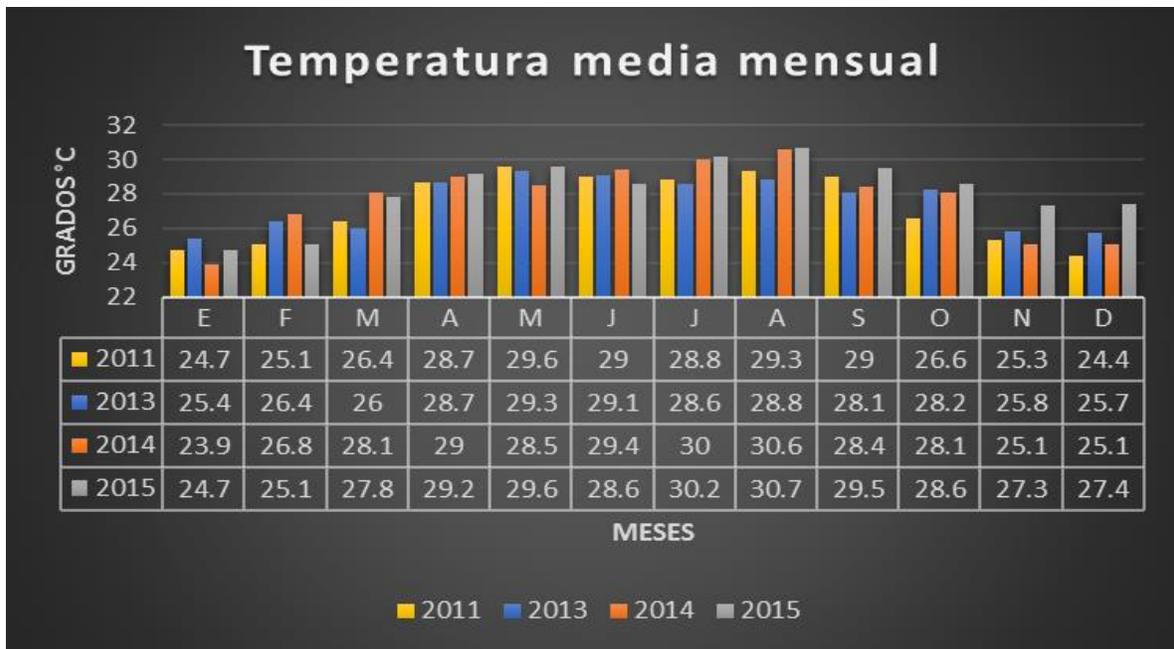


Figura 1. Temperatura media mensual de Chetumal Quintana Roo. Datos obtenidos de INEGI.

Los nuevos procesos para evitar este problema están enfocados a aplicaciones sobre el block o encofrados entre el block y los recubrimientos de mortero, pero pocas son las aplicaciones con tendencia a modificar el recubrimiento con el objetivo de reducir el coeficiente de conductividad térmica del mortero de recubrimiento, adicionando o sustituyendo componentes de la mezcla por materiales reciclados.

1.3. Marco teórico

Mortero

El uso del mortero en la construcción ha sido muy diverso, se usa ampliamente como material de revoque o repello, como material de pega en la mampostería y en los últimos tiempos en la mampostería estructural.

El mortero es una mezcla homogénea de un material cementante (cemento), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y en algunas ocasiones aditivos, prácticamente es hormigón sin el agregado grueso.

Usos del mortero

Los morteros pueden tener una función estructural, pueden usarse entonces en la construcción de elementos estructurales, o en la mampostería estructural en donde puede ser de pega o de relleno en las celdas de los muros.

Existen otros morteros que no tienen función estructural y se destinan a recubrimiento como repellos o revoques.

- Mortero de pega: debe tener cualidades especiales, diferentes a los morteros usados para otros fines porque está sometido a las condiciones especiales del sistema constructivo, y una resistencia adecuada ya que debe absorber esfuerzos de tensión y compresión.
- Morteros de relleno: Se utilizan para llenar las celdas de los elementos en la mampostería estructural y al igual que el mortero de pega debe tener una adecuada resistencia.
- Morteros de recubrimiento: empleados principalmente para embellecimiento o la de proporcionar una superficie uniforme para aplicar la pintura, no requieren una resistencia determinada; la plasticidad juega en ellos un papel muy importante.

Propiedades de los morteros

- Resistencia mecánica: El mortero debe ser capaz de resistir las tensiones generadas por movimientos, cambios de temperatura e impactos. En el caso de morteros para recubrimiento esta resistencia debe ser menor a la del elemento cubierto, también debe ser lo suficientemente flexible para resistir leves movimientos por causas térmicas o estructurales.

- Adherencia: Es la capacidad del mortero para absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie cubierta. Una adherencia correcta impide que el mortero se desprege como consecuencia de variaciones dimensionales ocasionadas por agentes externos.
- Las propiedades físicas y químicas de los morteros dependen de la interacción de los componentes; los utilizados en la región son una mezcla de *materiales cementosos* y *silíceos* (agregados) a base de polvo de piedra caliza. El cemento tiene buena resistencia a la compresión y el polvo de piedra juega un papel importante en la estabilidad del volumen (Esquivel, 2013).

Conductividad térmica (k): Se define como la capacidad de un material para transferir calor. La conducción térmica es el fenómeno por el cual el calor se transporta de regiones de alta temperatura a regiones de baja temperatura dentro de un mismo material o entre diferentes cuerpos. Las unidades de conductividad térmica en el Sistema Internacional son $W/(m \cdot K)$, aunque también se expresa como $kcal/(h \cdot m \cdot ^\circ C)$, siendo la equivalencia: $1 W/(m \cdot K) = 0,86 kcal/(h \cdot m \cdot ^\circ C)$.

Envolvente

La envolvente de un edificio es el conjunto de cerramientos exteriores como los muros, pisos y techos, los cuales brindan seguridad y protección a los usuarios de la intemperie.

La envolvente térmica es el escudo que reduce la transmisión de calor exterior al interior de la vivienda la cual se puede mejorar mediante la aplicación de aislantes térmicos comerciales los cuales son materiales con una baja conducción de calor con lo cual se espera:

- Mejorar el confort térmico de los usuarios del edificio;
- Reducir el consumo de energía relacionando con el acondicionamiento térmico del edificio (calefacción y refrigeración);

· Reducir los efectos negativos y riesgos asociados al consumo energético como son la contaminación del aire interior y exterior y las emisiones de CO2 principalmente.

En el contexto de confort térmico la envolvente del edificio es responsable, en gran medida, del confort de los usuarios y de los gastos energéticos de la edificación (Mendoza, 2018).

Los morteros de cemento – polvo de piedra, y cemento – cal – polvo de piedra son los más utilizados en la región como recubrimiento en muros y plafones, por lo que tienen un papel fundamental en el flujo del calor hacia el interior de las edificaciones. Al ser los primeros en recibir los rayos solares, la temperatura superficial de la cara exterior (T_e) siempre es diferente a la temperatura superficial de la cara interior (T_i) del elemento (Yeladaqui, 2010). Sin embargo, si bien desde el punto de vista térmico favorecen el confort, no poseen propiedades termoaislantes pues presentan coeficientes de conductividad térmica que superan al aceptado para considerar como termoaislante a un material tal como se muestra en la Tabla 1.1

Tabla 1. Conductividad Térmica de morteros tradicionales (modificado de Yeladaqui, 2010)

MORTERO	Conductividad térmica (w/m°C)
MORTERO 1:1:3	0.604
MORTERO 1:3	0.935
MORTERO 1:1:5	0.809
MORTERO 1:5	0.988
MATERIALES TERMOAISLANTES	< 0.10

Morteros adicionados

En la actualidad, los estudios en el mortero están basados principalmente en adicionar o sustituir materiales empleados en el mortero, con el objetivo de aligerarlo, hacerlo más durable, resistente o para aportar mejoras a este como es el

caso de aislantes térmicos, mejoras en trabajabilidad, en velocidad de fraguado y resistencia principalmente.

Morteros ligeros que contienen poliestireno expandido y cenizas de lodo de papel.

El objetivo de esta investigación fue desarrollar morteros de cemento ligeros con propiedades de aislamiento térmico mediante la incorporación de poliestireno expandido (EPS) y cenizas de lodo de papel (PSA), ambos materiales de desperdicio problemático. Los morteros formados tenían baja conductividad térmica y baja densidad aparente en comparación con muestras de control. Los morteros determinados como eficientes, que contienen hasta un 20% de PSA y un 60% de EPS se consideran adecuados para su uso en aplicaciones de revestimiento y enlucido (Ferrándiz-Mas, Bond, García-Alcocel, & Cheeseman, 2014).

Espuma de poliestireno expandido.

Otro estudio sobre adición de materiales de residuo es la Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS) realizado por V. Ferrándiz-Mas, E. García-Alcocel donde El objetivo del estudio fue evaluar la influencia de la adición de distintos tipos y dosificaciones de poliestireno expandido, tanto comerciales como procedentes de reciclado, sobre las características físicas y mecánicas de morteros de cemento Portland. Las variables estudiadas fueron: consistencia, aire ocluido, densidad aparente, resistencias mecánicas, porosidad, absorción de agua y absorción acústica. Los morteros también se han caracterizado por microscopia electrónica de barrido. Con objeto de mejorar la trabajabilidad de los morteros se ha empleado aditivos aireantes, retenedor de agua y fluidificante. Los resultados muestran que al aumentar la cantidad de poliestireno expandido la trabajabilidad y las resistencias mecánicas disminuyen (Ferrándiz-Mas & García-Alcocel, 2012).

Mortero aligerado con espuma de poliuretano reciclada.

Este trabajo presenta los resultados de un estudio experimental sobre el uso de residuos de espuma rígida de poliuretano con mezclas a base de cemento para producir morteros ligeros. El poliuretano rígido se trituró hasta tamaños de partícula de menos de 4 mm antes de su uso como sustituto de agregado. Se definieron las características de las muestras de ensayo y se ensayaron tanto en estado fresco como endurecido. Los resultados muestran que un aumento en la cantidad de poliuretano afecta al mortero, disminuyendo su densidad y propiedades mecánicas, al tiempo que aumenta su trabajabilidad, permeabilidad y contenido de aire ocluido. Los resultados de la Figura 2 y 3 confirman que el mortero producido con poliuretano reciclado es comparable al mortero ligero fabricado con materiales tradicionales (Gadea, Rodríguez, Campos, Garabito, & Calderón, 2010).

Series no.	Mix no.	Sand replaced by foam in volume (%)	w/c	Mix proportions (kg/m ³)				Fresh density (kg/m ³)	Occluded air (%)
				Cement	Water	Sand	Foam		
Series I	I-0	0	0.82	436.2	357.8	1310	0	2104	4.8
	I-25	25	0.74	506.6	374.7	1141	3.7	2026	5.1
	I-50	50	0.68	598.3	406.7	898.4	8.6	1912	7.6
	I-75	75	0.64	733.3	469.3	550.5	15.9	1769	9.0
	I-100	100	0.62	910.7	561.9	0	26.4	1499	13.0
Series II	II-0	0	0.75	443.7	332.8	1332.5	0	2109	3.5
	II-25	25	0.72	508.0	367.0	1136.4	3.6	2015	4.2
	II-50	50	0.70	571.8	400.4	858.6	8.2	1839	6.6
	II-75	75	0.67	725.1	485.8	544.4	15.7	1771	8.1
	II-100	100	0.61	677.3	413.2	0	19.5	1110	11.9

Figura 2. Proporciones y propiedades en estado fresco de las mezclas de mortero.

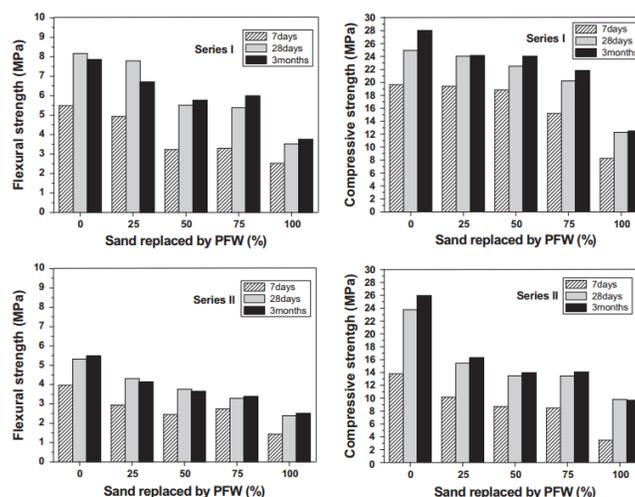


Figura 3. Variación de las propiedades mecánicas con la edad.

Durabilidad de los morteros de mampostería ligera hechos con espuma de poliuretano reciclado blanco.

En este estudio se analizan morteros de mampostería hechos con cemento Portland, arena, agua y espuma de poliuretano reciclado blanco de desechos industriales. En primer lugar, se prepararon diferentes mezclas mediante la sustitución de diferentes cantidades de arena por volúmenes equivalentes de poliuretano y luego, con diferentes relaciones de cemento / agregados. El estudio comparativo se realizó sobre el efecto de diferentes pruebas de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas de estos morteros bajo flexión y compresión. Para este propósito, las muestras fueron expuestas a diferentes pruebas de corrosión y dureza: resistencia al calor seco, agua caliente, prueba de salinidad y prueba de Kesternich. Después del envejecimiento, se observó una pequeña reducción en la resistencia a la compresión. Sin embargo, en todas las muestras, los valores de resistencia fueron suficientemente altos para considerar que estos tipos de materiales reciclados permanecen prácticamente no afectados en comparación con los especímenes de referencia ilustrados en las Figuras 4 y 5. Finalmente, se realizaron ensayos de reacción de álcali-sílice para determinar la estabilidad química de estos morteros (Junco, Gadea, Rodríguez, Gutiérrez-González, & Calderón, 2012).

Series no.	Mix no.	Relation cement/(sand + PU)	Sand replaced by foam in volume (%)	w/c	Fresh density (kg/m ³)	Occluded air (%)
Series I	3R	1/3	0	0.71	2123	4.7
	3PU25	1/3	25	0.71	2012	5.6
	3PU50	1/3	50	0.67	1892	12.8
	3PU75	1/3	75	0.63	1687	14.0
	3PU100	1/3	100	0.62	1439	17.5
Series II	4R	1/4	0	0.94	2096	4.7
	4PU25	1/4	25	0.84	2011	6.8
	4PU50	1/4	50	0.78	1878	7.4
	4PU75	1/4	75	0.77	1532	11.4
	4PU100	1/4	100	0.90	1251	19.0
Series III	6R	1/6	0	1.3	2045	5.1
	6PU25	1/6	25	1.2	1987	6.8
	6PU50	1/6	50	1.2	1792	12.0
	6PU75	1/6	75	1.4	1433	16.0
	6PU100	1/6	100	1.4	1089	30.0

Figura 4. Proporciones y propiedades en estado fresco de las mezclas de mortero

Series no	Mix no.	Density (kg/m ³)		Flexural strength (MPa)		Compressive strength (MPa)	
		7 days	28 days	7 days	28 days	7 days	28 days
Series I	3R	2100	2035	5.0	5.28	15.9	23.69
	3PU25	1783	1678	3.37	4.88	14.9	20.5
	3PU50	1658	1550	2.84	3.62	12.9	18.6
	3PU75	1489	1311	2.80	3.39	12.8	16.00
	3PU100	1310	1250	1.82	2.1	7.19	10.23
Series II	4R	2030	2008	3.45	5.28	13.11	18.22
	4PU25	1765	1631	3.38	4.85	10.76	18.00
	4PU50	1690	1520	3.40	4.59	10.00	17.63
	4PU75	1325	1168	3.00	3.12	9.00	14.16
	4PU100	1110	917	1.03	1.4	3.65	5.44
Series III	6R	1998	1996	3.24	3.07	9.84	10.64
	6PU25	1880	1545	2.51	2.32	7.55	8.57
	6PU50	1677	1465	2.40	2.41	5.21	7.89
	6PU75	1240	1005	2.29	1.12	3.85	4.21
	6PU100	854	734	0.61	0.74	1.52	1.78

Figura 5. Densidad y datos mecánicos de los compuestos de mortero probados.

Materiales de yeso ligeros con propiedades térmicas mejoradas fabricados con residuos de espuma de poliuretano.

Este artículo presenta un estudio de las propiedades y el comportamiento térmico del yeso con residuos de espuma de poliuretano. Las mezclas de yeso, preparadas utilizando diferentes volúmenes de residuos de espuma de poliuretano procedentes de dos fuentes diferentes, se trituraron a diferentes tamaños granulométricos. Las características de los especímenes se definieron y ensayaron fijando la consistencia a una buena trabajabilidad y luego estudiando las propiedades mecánicas, dureza y adherencia a materiales cerámicos después de 7 y 28 días. El comportamiento térmico se examinó mediante termogravimetría y análisis de conductividad térmica, correlacionando estos últimos con los valores de densidad aparente del material de poliuretano de yeso. La interfaz de los materiales se observó por microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados muestran que el aumento de la cantidad de poliuretano disminuye la densidad y las propiedades mecánicas del yeso, al tiempo que aumenta su resistencia térmica proporcionalmente a la reducción de la densidad. Estos resultados sugieren que el uso de residuos de espuma de poliuretano que contienen yeso es comparable al de yeso aclarado con materiales convencionales (Gutiérrez-González, Gadea, Rodríguez, Junco, & Calderón, 2012).

Poliuretano

El descubrimiento del poliuretano se remonta al año 1937, gracias a las investigaciones desarrolladas por Otto Bayer. Se empezó a utilizar en la década de los 50, ya que hasta entonces no existieron máquinas capaces de procesarlo.

Los sistemas de poliuretano, hoy en día, son muy versátiles y permiten una gama amplísima de aplicaciones que forman parte de nuestra vida. Su uso se extiende, por ejemplo, a:

- Colchones y sofás (en forma de relleno)
- Automóviles (volantes, spoilers, alerones, asientos, salpicaderos, como amortiguación de vibraciones y ruidos, etc.)
- Suelas del calzado
- Fabricación de muebles
- Pinturas y barnices
- Ventanas
- Ingeniería médica (fabricación de piezas para trasplantes y ortopedias, etc.)
- Ingeniería aeroespacial
- Industria del frío (tuberías, cámaras frigoríficas, neveras, criogenia, etc.)
- Y, por supuesto, en la edificación, como aislamiento térmico, acústico e impermeabilizante.

Las materias primas proceden de dos productos: el petróleo y el azúcar, para obtener, después de un proceso químico de transformación, dos componentes básicos, llamados genéricamente ISOCIANATO y POLIOL. La mezcla en las condiciones adecuadas de estos dos componentes nos proporcionará, según el tipo de cada uno de ellos y los aditivos que se incorporen, un material macizo o poroso, rígido o flexible, de celdas abiertas o cerradas (Candela & Milla, 2010).

La espuma rígida de poliuretano es un material sintético duroplástico, altamente reticulado espacialmente y no fusible. En las densidades habituales, para aislamiento térmico, la espuma contiene solamente una pequeña parte del volumen de materia sólida (con una densidad de 35 kg/m^3 , sólo el 3% del volumen es materia sólida) la Figura 6 muestra el proceso de espumación del poliuretano.



Figura 6. Proceso de elaboración del poliuretano.

Aislante térmico.

La norma NMX-C-460 define aislante térmico, como la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor por conducción y se evalúan por la resistencia térmica que tienen o, lo que es lo mismo, por la capacidad de aislar térmicamente.

Aislante térmico es aquel material usado en la construcción y caracterizado por su alta resistencia térmica, estableciendo una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura.

Por esta razón se utilizan como aislamiento térmico materiales porosos o fibrosos como las lanas minerales (lana de roca o de vidrio), poliestireno expandido, poliestireno extruido, espuma de poliuretano, corcho.

Resistencia térmica de los materiales.

La resistencia térmica es el fenómeno opuesto a la conductividad térmica, la resistencia térmica es la oposición que presentan los materiales al paso del calor, matemáticamente se puede definir como el inverso de la conductividad térmica (Aranda, 2009).

1.4. Justificación

El clima de la ciudad de Chetumal Quintana Roo (cálido subhúmedo) está representado por sus elevadas temperaturas durante la mayor parte del año, siendo los meses más cálidos los comprendidos entre junio y agosto, donde la tendencia es hacia el alza, por lo cual, de mantenerse esta tendencia, el implemento de materiales con mejores propiedades térmicas se hace inminente.

Del mismo modo se busca la sustentabilidad ambiental incorporando materiales en desuso al proceso constructivo de viviendas.

Otro aspecto importante es que la espuma de poliuretano encontrada en el relleno de los refrigeradores de desecho ocupa más del 50% del volumen total del refrigerador, que actualmente no tiene ningún uso más que el de formar parte de la basura, la mayoría de estos no llega al lugar de tiro autorizado por falta de medios de transporte y ocupa un lugar dentro de rincones en la ciudad.

1.5. Hipótesis

La sustitución del 15%, 20% y 25% de agregado fino por espuma de poliuretano reciclado reducirá el coeficiente de conductividad térmica en el mortero de cemento – agregado fino en relación 1:3 para recubrimiento de muros, sin contribuir al contenido de humedad al interior del prototipo en un clima cálido subhúmedo.

1.6. Objetivos

General

Evaluar el desempeño térmico en condiciones reales de un mortero con sustitución de agregado fino por espuma de poliuretano reciclado, en un clima cálido subhúmedo.

Específicos

- Determinar las características físicas del poliuretano de sustitución y agregados mediante granulometría, peso específico y contenido de humedad.
- Elaborar y Caracterizar físico-mecánicamente muestras de mortero sin y con sustitución del 15%, 20% y 25% del agregado fino por espuma de poliuretano reciclado mediante la prueba de compresión y adherencia.
- Caracterizar térmicamente muestras de mortero con y sin sustitución mediante el método de la placa caliente.
- Definir el mortero modificado para la aplicación en los prototipos en relación de las propiedades físico-mecánicas y térmicas más estables.
- Evaluar el desempeño térmico en condiciones reales de los prototipos con aplicación del mortero con y sin sustitución.

CAPÍTULO 2

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Metodología

La metodología empleada en esta investigación para evaluar las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de morteros con sustitución parcial del agregado fino calizo por espuma reciclada de poliuretano estuvo apegada a las normas del ASTM correspondiente a cada prueba como se muestra en la Figura 7.

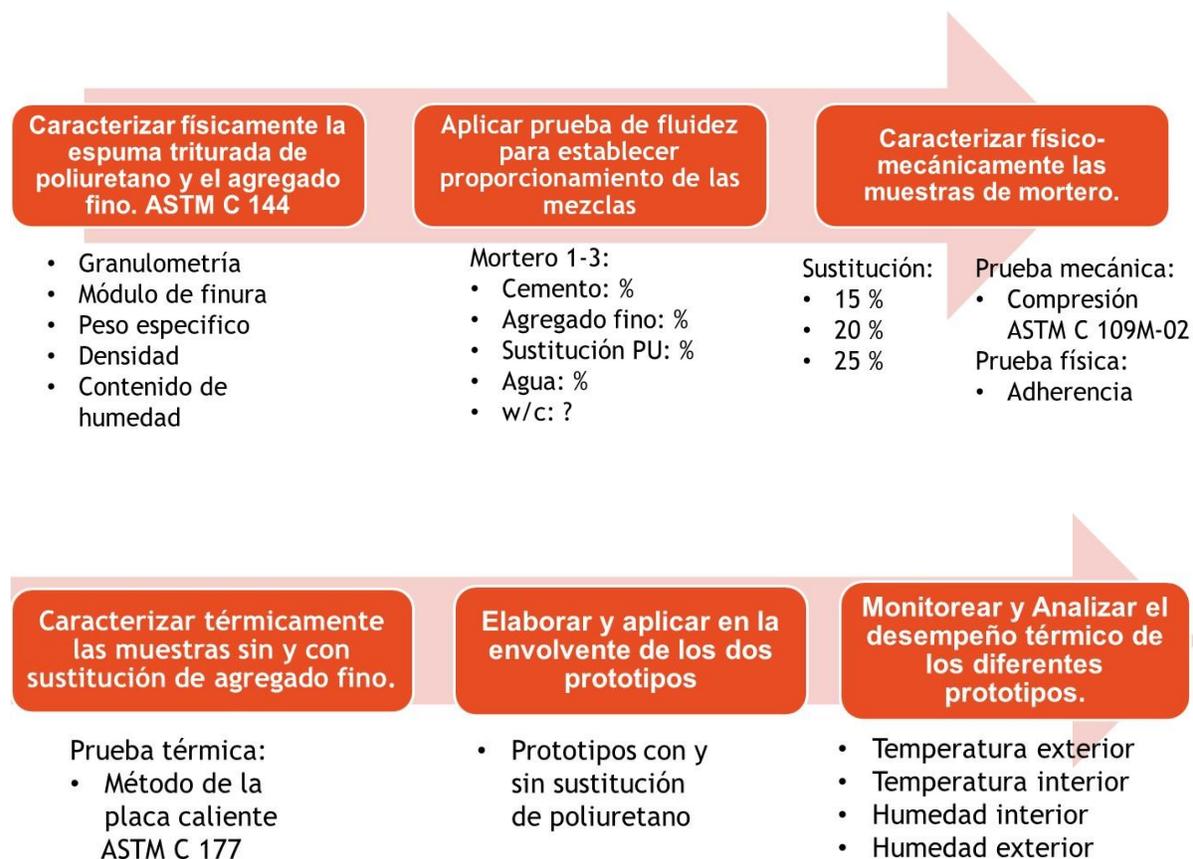


Figura 7. Diagrama de metodología.

En la primera etapa, se realizarán las pruebas físicas de la materia prima basadas en la norma ASTM C 144, en este caso, el agregado fino y el poliuretano, en los cuales es necesario establecer parámetros de granulometría, módulo de finura, peso específico y densidad; para establecer el tamaño máximo de partícula a emplearse y sus características (Mounanga et al., 2008).

Granulometría del agregado fino ASTM C 136

De los 25 kg obtenidos del primer cuarteo, se realizó un nuevo cuarteo hasta obtener una muestra de 600 gr, cabe mencionar que esta prueba de granulometría se realizó como parámetro de partida en las siguientes pruebas de granulometría.

Materiales:

- Bascula
- Horno
- Agitador mecánico con mallas correspondientes

La muestra de 500 gr se metió al horno durante 24 horas para obtener el contenido de humedad, después, se colocó sobre las mallas en el agitador mecánico, durante 10 minutos, después se pesaron las cantidades retenidas en cada malla.

La Figura 8 señala el proceso llevado a cabo para establecer la granulometría del agregado fino.



Figura 8. Procedimiento de granulometría.

Gravedad específica y absorción de agregado fino, ASTM C 128

Determinar la gravedad específica en estado saturado superficialmente seco del agregado fino el cual será utilizado en la elaboración del mortero, dicho dato resultará útil al igual que el porcentaje de absorción para el cálculo de las dosificaciones.

Materiales:

- Balanza
- Estufa
- Charola
- Picnómetro
- Cuchara
- Termómetro
- Horno
- Muestra de ensayo
- Molde de cono $40\pm 3\text{mm}$
- Pinzón metálico $90\pm 3\text{mm}$

El tamaño mínimo de la muestra según el apartado 7.1 de la norma requiere mínimo de 1 kg, se tomó 1.2 kg, la muestra se introdujo al horno y se secó a una temperatura constante de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.

Después de 24 horas se sacó del horno y se dejó enfriar, seguidamente se pesó una porción de 1200 gr, se procedió a saturarlo en agua por un periodo de 24 horas.

Seguido del periodo de 24 horas de saturación, la muestra se decantó teniendo cuidado de no perder finos, la muestra se colocó en una charola y se dio inicio con el secado en la estufa como se aprecia en la Figura 9.

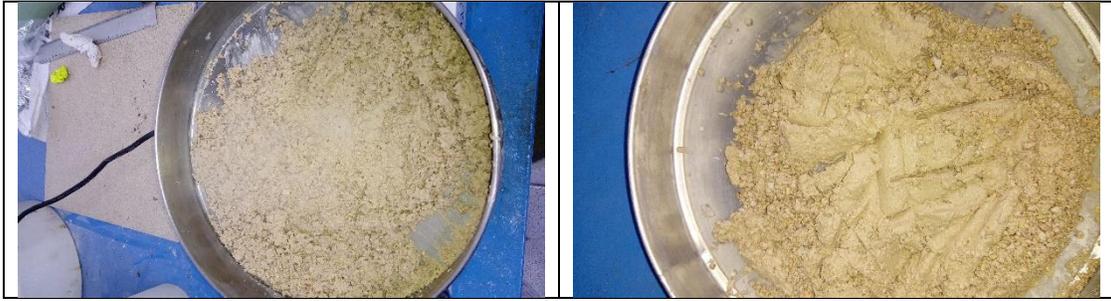


Figura 9. procedimiento de secado de muestras.

Para que el agregado alcanzara la condición saturado superficialmente seco se llevó a cabo la prueba provisional del molde de cono.

Empleando el cono como se indica en la Figura 10, se procedió a colocarlo sobre una superficie no absorbente y plana donde se le introdujo el agregado fino en la primera capa del cono y se dejó caer el pinzón metálico a 5mm del agregado con 10 golpes, se agregó más agregado fino y se emplearon 10 golpes más con el pinzón, se agregó más agregado y se golpeó 3 veces más y finalmente se llenó el cono y se dieron otros 2 golpes, en total se golpearon 25 veces, se retiró el exceso de agregado de la base y se levantó el cono en un solo movimiento de manera vertical, al ver que el agregado presento una ligera disgregación y no conservo la forma del molde se alcanzó el estado saturado superficialmente seco esperado.



Figura 10. Procedimiento de la prueba del cono para humedad.

Se tomaron dos muestras de 500g de agregado fino SSS y se metieron al horno a secado por 24 horas a 110° para determina la absorción, las dos muestras 500g se destinaron al método gravimétrico con el picnómetro, primero se llenó parcialmente el picnómetro con agua y se introdujeron los 500g de agregado fino, se adiciono más agua hasta un 90% de capacidad, se agito y rodo de forma manual el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire.

Después de eliminar las burbujas de aire por 15 minutos se ajustó la temperatura del picnómetro a 25°C y se llenó el picnómetro a su capacidad calibrada, se determinó el peso del picnómetro + espécimen + agua como se aprecia en la Figura 11.



Figura 11. Empleo de picnómetro para la prueba de gravedad específica.

Mediante la prueba de fluidez se establecieron los diferentes parámetros de proporción de sustitución en cada una de las muestras, datos como la cantidad de cemento, será la misma en las diferentes proporciones de mortero, pero la cantidad de agua será un factor determinante debido a su influencia en la fluidez.

Se elaboraron muestras con los datos obtenidos en la etapa dos, y de acuerdo con el tipo de prueba, es importante mencionar que la relación cemento-arena fue de 1:3 con diferentes proporciones de sustitución de agregado fino: 0%, 15%, 20% y 25%.

Las muestras fueron sometidas a la prueba física de adherencia entre el mortero y el muro de block; así como, la prueba mecánica de compresión ASTM C 109M.

Aplicación de la prueba de fluidez.

La parte superior del platillo de la mesa se limpió, secó cuidadosamente y se colocó el molde al centro.

Seguidamente se puso en el molde una primera capa de mortero aproximadamente de 25 mm de espesor que se compactó 20 veces con el pisón. La presión para compactar debe ser la necesaria para asegurar un llenado uniforme del molde.

Se llenó el molde totalmente y se compactó nuevamente como se especificó para la primera capa, se enrasó la superficie del mortero pasando el filo de una cuchara de albañil (que se sostiene casi perpendicular al molde) con un movimiento de aserrado sobre el borde superior del molde.

Se limpió y se secó cuidadosamente la parte del platillo de la mesa de fluidez no cubierta por el molde teniendo especial cuidado de hacerlo en la intersección de la base inferior del molde con la mesa de fluidez.

Al transcurrir un minuto a partir del momento de haber terminado el mezclado se levantó el molde; el platillo se dejó caer 25 veces en 15 segundos de una altura de 12,7 mm. La fluidez es el incremento del diámetro de la base de la masa del mortero expresado como porcentaje del diámetro de la base original. El diámetro considerado del mortero debe ser el promedio de por lo menos 4 mediciones de diámetro de 45° aproximadamente. Se realizaron mezclas de ensayo variando los porcentajes de agua hasta obtener la fluidez especificada. Cada ensayo se realizó con un nuevo mortero como se indica en la Figura 12.



Figura 12. Mesa de fluidez.

Moldeado de los especímenes

Inmediatamente después de terminar el ensayo de fluidez, el mortero que se empleó en la misma se regresó al recipiente de mezclado mediante la cuchara de albañil, rápidamente todo el mortero adherido a las paredes del recipiente citado se incorporó al resto del mortero. Se continuó el mezclado por 15 segundos a la velocidad media (285 rev por min). El mortero adherido a la paleta de mezclado se incorporó al mortero del recipiente. La preparación de los especímenes se debe empezar dentro de un tiempo no mayor de 2 min 30 s a partir de haber terminado el mezclado inicial del mortero. Se colocó en los compartimientos del molde de los especímenes una capa de mortero de 25 mm de espesor aproximadamente y luego el mortero de cada compartimiento se compacto con el pisón, 32 veces en 10 segundos, en 4 vueltas. La iniciación de cada vuelta se efectúa a 90° con respecto a la siguiente (o a la anterior) y consiste en 8 golpes adyacentes repartidos sobre la superficie. La presión para compactar el espécimen debe ser la necesaria para asegurar un llenado uniforme del molde.

Las cuatro vueltas (32 golpes) se deben completar en un espécimen antes de empezar con el siguiente. Una vez terminado el apisonado de la primera capa en todos los especímenes, los compartimientos se deben llenar utilizando el resto del mortero y se vuelven a compactar tal como se hizo en la primera capa.

Durante el compactado de la segunda capa, todo el mortero que sobresalga del molde después de cada vuelta se regresó al compartimiento con la mano cubierta con guantes de hule antes de iniciar la siguiente vuelta de apisonado.

Luego de terminar la compactación, el mortero sobresaliente se extendió suavemente con la cuchara de albañil. A continuación, con la cuchara de albañil se aplano el mortero regresando a los compartimientos el material que se encontró en los bordes del molde, con la cuchara de albañil ligeramente inclinada, una sola vez a ángulos rectos sobre cada espécimen y en dirección normal al eje longitudinal del molde.

Luego nivelar el mortero de los moldes para que tengan un espesor uniforme, se enraza la superficie al borde superior del molde usando la cuchara de albañil en posición ligeramente inclinada por una sola vez y después se eliminó el exceso de mortero haciendo un corte con la orilla de la cuchara de albañil imprimiéndole un movimiento de corte de sierra en el sentido longitudinal del molde.

Al finalizar el proceso se obtuvieron los resultados de la Tabla 1, de cada una de las diferentes sustituciones.

Tabla 1. Dosificación de especímenes.

Proporción 1-3 cemento-agregado.		
muestra blanco		
A/C	1.07	
Fluidez	106.067	%
Cemento	0.42	Kg
Agregado fino	1.48	Kg
Pu	0	ml
Agua	321	ml

Proporción 1-3 cemento-agregado		
sustitución al 20 %		
A/C	1.05	
Fluidez	99.515	%
Cemento	0.42	Kg
Agregado fino	1.1868	Kg
Pu	180	MI
Agua	314	MI

Proporción 1-3 cemento-agregado		
sustitución al 15 %		
A/C	1.03	
Fluidez	110.9223	%
Cemento	0.42	Kg
Agregado fino	1.261	Kg
Pu	135	ml
Agua	310	ml

Proporción 1-3 cemento-agregado		
sustitución al 25 %		
A/C	1.04	
Fluidez	103.16	%
Cemento	0.42	Kg
Agregado fino	1.112	Kg
Pu	225	MI
Agua	311	MI

Se elaboraron placas muestra de las diferentes proporciones de sustitución, para su caracterización térmica mediante el método de la placa caliente ASTM C 177 como se aprecia en la Figura 13 y 14.



Figura 13. Conductímetro con placa de guarda.

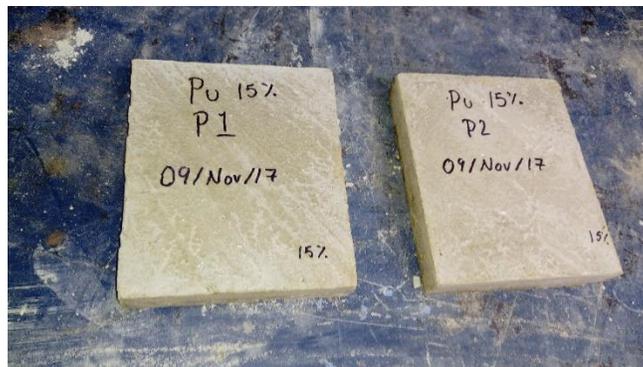


Figura 14. Especímenes de mortero empleados en la prueba de placa caliente.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se realizó una tabla comparativa de las diferentes proporciones de sustitución de agregado y se evaluó de acuerdo con su reducción de coeficiente de conductividad térmica, así como su comportamiento mecánico y físico, dando lugar a la determinación de la proporción que mejor relación presente entre las propiedades mencionadas anteriormente sin comprometer las características de un mortero de recubrimiento común.

Una vez seleccionado el mortero a emplearse, se procedió a la elaboración de los prototipos para su futura aplicación de envoltorio tanto del prototipo testigo como del prototipo modificado como los de la Figura 16.

Se instalaron equipos de monitoreo térmico y concentración de humedad en ambos prototipos como los de la Figura 15, se procedió al monitoreo de estos durante un periodo de seis meses en condiciones reales tomando en cuenta la temperatura exterior, temperatura interior y humedad exterior e interior; como parámetros fundamentales.



Figura 15. Registrador de datos de temperatura y humedad HOB0 ux100-xx.



Figura 16. Elaboración de prototipos de 2.5 x 2.5 x 2.6 metros.

Microscopia Electrónica de Barrido

El Microscopio electrónico de barrido o SEM por sus siglas en inglés (Scanning Electron Microscopy), utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Es un instrumento que permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra.

El microscopio electrónico de barrido está equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: el detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución SEI (Secondary Electron Image), un detector de electrones retrodispersados que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie BEI (Backscattered Electron Image), y un detector de energía dispersiva EDS (Energy Dispersive Spectrometer) permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semicuantitativo y de distribución de elementos en superficies.

Se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales con los que trabajan los investigadores científicos y las empresas privadas, además del procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas. Las principales utilidades del SEM son la alta resolución (~1 nm), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

La preparación de las muestras es relativamente sencilla las principales características son: muestra sólida, conductora. Caso contrario, la muestra es recubierta con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el oro para darle propiedades conductoras a la muestra. De lo contrario, las muestras no conductoras se trabajan en bajo vacío, Pineda, N. (2018).

CAPÍTULO 3

TRABAJO DE LABORATORIO

3.1. Caracterización de los materiales

Materiales.

Se empleo cemento gris CPC 30R, tipo I clasificado como CPC 30R, de acuerdo con la norma mexicana (“NMX-C-414-ONNCCE. Cementantes hidráulicos - especificaciones y métodos de ensayo,” 2010), corresponde a Cemento Portland Compuesto de resistencia rápida con una densidad de 3.05 g/cm^3 y peso volumétrico de 1216.22 kg/m^3 .

Polvo de piedra caliza con tamaño de partícula entre 0 y 4.75 mm con una densidad de $1648.31349 \text{ kg/m}^3$.

Espuma rígida de poliuretano reciclado, obtenido de la destrucción de refrigeradores con una densidad de 37.20208 kg/m^3 estableciendo el tamaño máximo de partícula entre 0 y 4.75 y tomando como referencia otras investigaciones sobre morteros aligerados (Mounanga et al., 2008).

Conductividad térmica:

De acuerdo con las características del Conductímetro de placa caliente con guarda, para las pruebas de conductividad térmica se elaboraron dos probetas de cada mezcla y se realizaron cuatro corridas suministrando calor a las mismas a 20, 25, 30 y 35 volts durante 10 a 12 horas, registrando las temperaturas a cada 15 minutos. En cada corrida se obtuvo un valor para la conductividad térmica de cada mezcla, tomando como resultado final la mediana de las cuatro corridas. Los cálculos se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C 518 98 mediante la ecuación de Fourier modificada.

Elaboración de especímenes:

El mezclado se realizó de acuerdo con las recomendaciones que indica la norma ASTM C 305, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).

En el recipiente se depositó el total del agua establecido para la mezcla, se agregó el cemento, con lo cual se mezcló a una velocidad lenta durante 30 segundos, seguidamente se incorporaron los agregados finos y se mezcló a baja velocidad por un periodo de 30 segundos, finalmente se agregó el sustituto de agregado fino (espuma rígida de poliuretano) con lo cual se mezcló a una velocidad media durante 30 segundos, finalmente se dejó reposar por 90 segundos y se mezcló de nuevo durante sesenta segundos a velocidad alta para terminar con una consistencia final como la de la Figura 17.



Figura 17. Proceso de mezclado de mortero.

Moldeado

El moldeado de las probetas se efectuó de acuerdo con la norma NMX-C-061-ONNCCE-2001. Una vez concluido el mezclado, se procedió a la colocación de los morteros tradicionales y alternativos en moldes con cavidades cubicas de 50 mm por lado, para las pruebas de compresión.

Para las pruebas de conductividad térmica se colocó los morteros tradicionales y alternativos en moldes con cavidades de 152 x 127 mm \pm 2 de sección y de 25 mm \pm 2 de espesor, como se muestra en la Figura 18.



Figura 18. Probetas dentro de los moldes en Proceso de fraguado.

Dichos moldes fueron cubiertos previamente con aceite para facilitar el desmolde y evitar daño en las aristas de los especímenes. Así mismo, se cubrieron previamente las juntas de los moldes con cera para conservar su hermeticidad y prevenir segregación de los morteros.

Para ambos casos el mortero tradicional y alternativo se colocó en cada compartimiento del molde, en dos capas de 25 mm para las probetas de compresión y absorción; y para las probetas de conductividad térmica en dos capas de 12.5 mm. Cada capa se compactó mediante 32 golpes de varilla en 15 segundos y finalmente se enrasó con una regla para quitar el exceso de mortero en los moldes.

Almacenamiento y curado

Luego de la colocación del mortero en los moldes, estos se mantuvieron a temperatura ambiente por un periodo de 24 horas, posteriormente se desmoldaron los cubos, los cuales se marcaron para facilitar su identificación y se procedió a sumergirlos en contenedores con agua y cal, en la cual permanecieron durante un periodo de 28 días como se aprecia en la Figura 19.

Las probetas de calor específico y conductividad térmica pasaron por el mismo procedimiento.



Figura 19. Proceso de curado.

Para el ensayo de adherencia, previo a la aplicación del recubrimiento sobre el muro de block, la superficie se saturó con agua, el mortero se aplicó manualmente a tiro directo sobre la superficie del block como se indica en la Figura 20, con dimensiones de 500 mm x 100 mm con un espesor promedio de 15 mm, se aplicó en una sola capa y se le dio acabado semi rustico con la cuchara de albañil.

Después del tiempo de fraguado las muestras se cubrieron con una membrana de plástico y se le aplicó agua a tiro directo dos veces al día como curado durante un periodo de 28 días.



Figura 20. Aplicación de mortero sobre muro de block.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Granulometría del agregado fino ASTM C 136

En la Tabla 2 y Figura 21, se presenta la conformación granulométrica del agregado fino, cabe mencionar que para el estudio se eliminó el material que se retuvo en la malla número 4 presente en la Tabla 2 para poder establecer un rango en la granulometría.

Se observa en la gráfica de la Figura 21, que el agregado no cumple con las especificaciones, sin embargo, se optó por no ajustar la curva señalada debido a que en el estudio se pretende su aplicación en condiciones reales y esto limita la posibilidad de ajustar la granulometría de dicho agregado. El Módulo de finura obtenido fue de 3.08 %

Tabla 2. Granulometría del agregado fino.

Arena de la muestra					
Malla	Apertura en mm	Peso (gr)	Retenido %	Acumulado %	% que pasa
4	4.750	10.000	2.00	2.00	98.00
8	2.360	125.000	25.00	27.00	73.00
16	1.180	140.000	28.00	55.00	45.00
30	0.600	60.000	12.00	67.00	33.00
50	0.300	40.000	8.00	75.00	25.00
100	0.150	35.000	7.00	82.00	18.00
200	0.075	25.000	5.00	87.00	13.00
Tara	0.000	65.000	13.00	100.00	0.00

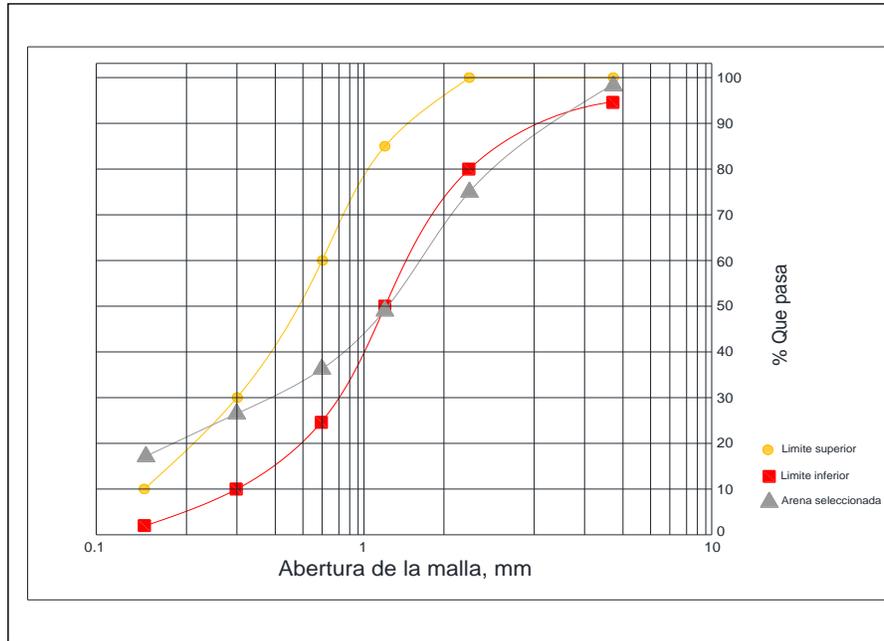


Figura 21. Curva granulométrica del agregado.

Gravedad específica y absorción de agregado fino, ASTM C 128

Los valores presentes en las Tabla 3 confirman, que, debido al porcentaje de absorción, la relación agua-cemento del mortero es con valores mayores a 1, de igual modo para lograr alcanzar la fluidez requerida, la cantidad de agua fue mayor.

Tabla 3. Valores de densidad relativa y % de absorción del agregado fino.

Muestra	Sustitución	Densidad Relativa (SH)
M1	$\frac{488g}{(1281g + 500g - 1589g)} =$	2.54
M2	$\frac{489g}{(1282g + 500g - 1590g)} =$	2.55

Muestra	Sustitución	Densidad Relativa (SSS)
M1	$\frac{500g}{(1281g + 500g - 1589g)} =$	2.60
M2	$\frac{500g}{(1282g + 500g - 1590g)} =$	2.60

Muestra	Sustitución	% de Absorción
M1	$\left[\frac{500g - 488g}{488g} \right] \times 100$	2.46
M2	$\left[\frac{500g - 489g}{489g} \right] \times 100$	2.25

Los valores de peso volumétrico tanto del agregado fino como de la espuma de poliuretano se realizaron para permitir que cada muestra sea lo más exacta a la siguiente con la misma proporción de sustitución.

Peso volumétrico agregado fino

Suelto

Molde = 3.23 kg

Molde + agregado = 11.595 kg
 Molde + agregado = 11.595 kg } 11.5375 kg

Pvs = peso volumétrico suelto

Gs = masa del agregado más recipiente

T = masa del recipiente

V = volumen del recipiente

$$Pvs = \frac{Gs - T}{V} \quad \text{Ecuación 1. Peso volumétrico suelto}$$

$$Pvs = \frac{11.5375 \text{ kg} - 3.23 \text{ kg}}{0.00504 \text{ m}^3} = 1648.31349 \text{ kg/ m}^3$$

Varillado

Molde = 3.23 kg

$$\begin{array}{l} \text{Molde + agregado} = 12.215 \text{ kg} \\ \text{Molde + agregado} = 12.235 \text{ kg} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Molde + agregado} = 12.215 \text{ kg} \\ \text{Molde + agregado} = 12.235 \text{ kg} \end{array}} \right\} 12.225 \text{ kg}$$

$$P_{VV} = \frac{12.225 \text{ kg} - 3.23 \text{ kg}}{0.00504 \text{ m}^3} = 1784.7222 \text{ kg/ m}^3$$

En el caso del Pu se adicione en volumen debido a su peso tan ligero y para facilitar el proceso de aplicación en condiciones reales.

Peso volumétrico Pu

Suelto

$$\text{Molde} = 3.23 \text{ kg}$$

$$\begin{array}{l} \text{Molde + Pu} = 3.42 \text{ kg} \\ \text{Molde + Pu} = 3.415 \text{ kg} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Molde + Pu} = 3.42 \text{ kg} \\ \text{Molde + Pu} = 3.415 \text{ kg} \end{array}} \right\} 3.4175 \text{ kg}$$

$$P_{VS} = \frac{G_s - T}{V}$$

$$P_{VS} = \frac{3.4175 \text{ kg} - 3.23 \text{ kg}}{0.00504 \text{ m}^3} = 37.20238 \text{ kg/ m}^3$$

Varillado

$$\text{Molde} = 3.23 \text{ kg}$$

$$\begin{array}{l} \text{Molde + Pu} = 3.46 \text{ kg} \\ \text{Molde + Pu} = 3.455 \text{ kg} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Molde + Pu} = 3.46 \text{ kg} \\ \text{Molde + Pu} = 3.455 \text{ kg} \end{array}} \right\} 3.4575 \text{ kg}$$

$$P_{VV} = \frac{3.4575 \text{ kg} - 3.23 \text{ kg}}{0.00504 \text{ m}^3} = 45.13889 \text{ kg/ m}^3$$

Aplicación del método de fluidez para establecer la dosificación de las diferentes mezclas.

Se tomó la fluidez como parámetro de referencia, esto fue debido al comportamiento del mortero con relación a su contenido de agua y el de las partículas de poliuretano, por lo cual se empleó la norma ("ASTM C230 / C230M. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement," 2014) con la cual, se estableció la dosificación de las diferentes mezclas, teniendo como referencia una fluidez de 105 ± 5 .

El mortero de estudio es elaborado en relación 1:3 cemento-agregado y la sustitución del agregado por espuma rígida de poliuretano es en relación con el volumen.

Este ensayo se realizó 15 veces por cada una de las diferentes dosificaciones para establecer el diseño de mezcla presente en la Tabla 4, en donde las muestras se clasificaron como:

CPC mortero cemento-agregado calizo fino en proporción 1:3

C15 mortero cemento-agregado calizo fino (sustitución parcial de 15 %)

C20 mortero cemento-agregado calizo fino (sustitución parcial de 20 %)

C25 mortero cemento-agregado calizo fino (sustitución parcial de 25 %)

Tabla 4. Dosificación de las diferentes mezclas.

	Fluidez %	Cemento kg	Agregado fino calizo kg	Pu ml	Agua ml
CPC	106.07	0.42	1.48	0	321
C15	109.92	0.42	1.261	135	310
C20	100.51	0.42	1.187	180	314
C25	103.16	0.42	1.112	225	311

Resistencia a la compresión.

Entre los objetivos principales de la investigación esta, el emplear un material en desuso como sustituto parcial de agregado fino sin comprometer la resistencia a la compresión del mortero, la cual cumple un papel importante en el recubrimiento de muros, de manera que la resistencia al impacto del recubrimiento está relacionada directamente con la resistencia a la compresión de este.

Las diferentes dosificaciones tienen como requisito no disminuir de modo significativo la resistencia a la compresión, por lo cual basado en la norma ("ASTM C109/C109M. Historical Standard: Normalizado de Ensayo de Resistencia a Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Utilizando Especímenes Cúbicos de 2 in. o [50-mm])," 2008) se determinó la resistencia a la compresión de las muestras elaboradas con la dosificación anteriormente presentada.

Para el ensayo se prepararon 7 cubos de 5 cm de arista, de cada una de las diferentes dosificaciones 15, 20 y 25 % así como la muestra de referencia 0% (sin poliuretano), tomando como referencia la fluidez 105 ± 5 % las cuales fueron tronadas en una prensa marca ELVEC E 659-4, arrojando los resultados expuestos en la Figura 17, la cual presenta el concentrado de resultados de las diferentes proporciones de la prueba de compresión aplicado después de un periodo de curado de 28 días en agua, a partir de su elaboración, esto para obtener su resistencia final.

En la Figura 17, podemos observar que los valores de resistencia disminuyen proporcionalmente de acuerdo con el incremento de la cantidad de agregado sustituido parcialmente por espuma rígida de poliuretano, tomando la muestra blanco-inalterada con un valor promedio de 30.86 MPa, como el 100%. La resistencia en C15 disminuyó en un 10.5% con un valor promedio de 27.62 MPa. En el caso de C20 disminuyó un 21.55% con un valor promedio de 24.21 MPa y por último en el caso de C25 la resistencia disminuyó en un 24.97% con un valor promedio de 23.15 MPa.

La disminución gradual de la resistencia a la compresión es debido al incremento en la cantidad de espuma rígida de poliuretano, la cual, debido a su menor

resistencia a la compresión (comparada con la de los agregados finos) disminuye la resistencia de todo el elemento, por lo tanto, a medida que tiene más partículas de poliuretano su resistencia a la compresión tiende a bajar.

Para fines de aplicación la muestra de mortero C20 presenta el mejor resultado de sustitución parcial en función de los resultados de resistencia a la compresión como se aprecia en la Figura 22, debido a que no compromete de manera significativa la resistencia a la compresión, disminuyendo de este modo el empleo de los agregados calizos naturales.

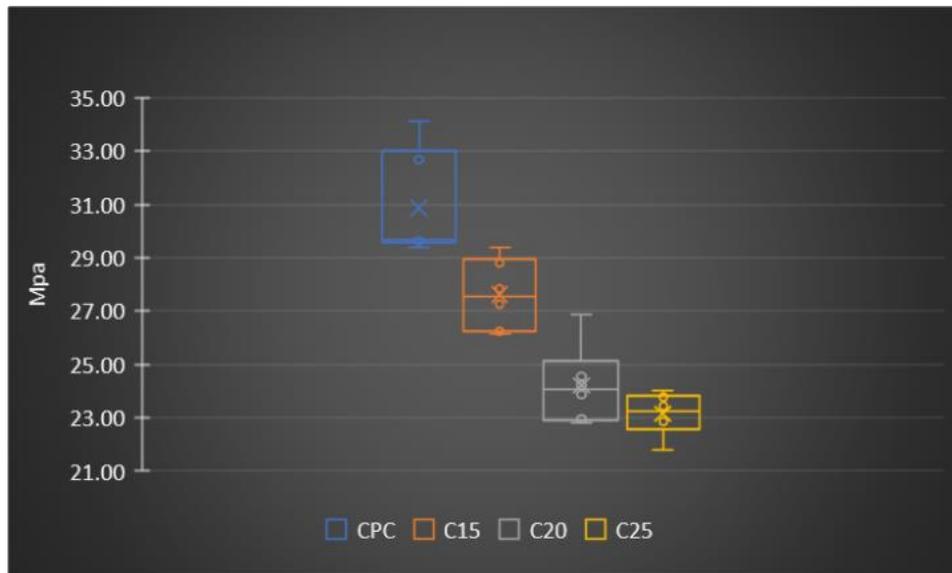


Figura 22. Resistencia a compresión de muestras de mortero con sustitución parcial de agregado fino por espuma rígida de poliuretano reciclado.

Adherencia entre el mortero y el muro de block.

Entre las características más importantes en el mortero de recubrimiento, se encuentra la adherencia entre el recubrimiento y el muro de block. Se realizaron pruebas de adherencia basadas en la norma (“ASTM C952. Standard Test Method for Bond Strength of Mortar to Masonry Units,” 2012) la cual fue necesario ajustar a un mortero de recubrimiento como se muestra en la Figura 23.

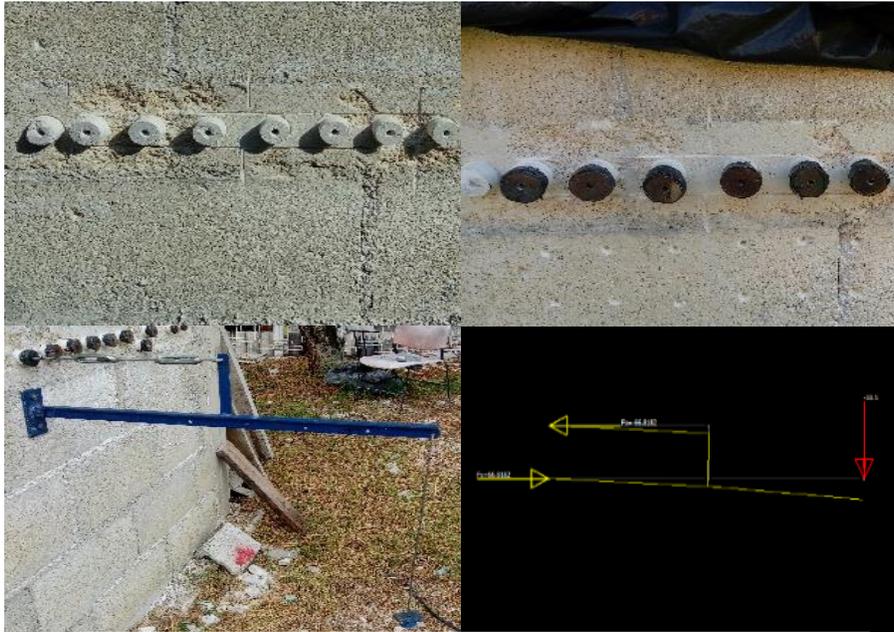


Figura 23. Proceso de ensayo de adherencia de muestras de mortero de recubrimiento.

El ensayo se realizó aplicando los morteros con las diferentes composiciones de sustitución sobre un muro de block, donde se curaron durante un periodo de 28 días, estas muestras se recortaron en forma de cilindros adheridos al muro con un diámetro de 2.82 cm, con una longitud de 1.5 cm. Se realizaron 10 pruebas por cada dosificación diferente, mediante el apoyo con un dispositivo para producir la falla por arrancamiento se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la Tabla 5.

Clave	σ
CPC	11.0461 kg/cm ²
C15	8.2575 kg/cm ²
C20	11.3710 kg/cm ²
C25	10.6941 kg/cm ²

Tabla 5. Resultados de ensayo de adherencia

Los resultados de la Tabla 5, son los valores promedio de esfuerzo de cada una de las diferentes composiciones, estos valores se obtuvieron después de dividir la fuerza entre el área efectiva del contacto de los cilindros de mortero con el dispositivo de falla. Se puede observar la variación de los resultados en base a los cuales se concluye que en el caso de la sustitución C20, los valores de resistencia mejoraron considerablemente a diferencia de los valores encontrados en C15, en los cuales disminuyeron el 25.24% con respecto de la muestra CPC, debido a la baja cantidad de sustitución y pobre distribución de la espuma rígida de poliuretano reciclado, en el caso del mortero C25 los valores se mantuvieron en el rango estable con referencia al CPC.

Por lo tanto, el mortero C20 presenta las mejores características, además de que se reduce el empleo de agregados pétreos naturales en un 20 %, en donde la resistencia a la adherencia, así como el acabado final y textura mejoraron considerablemente.

Conductividad Térmica

El estudio de conductividad térmica se realizó empleando un conductímetro de placa caliente con guarda, el laboratorio de Ingeniería en Sistemas de Energía de la Universidad de Quintana Roo construyó el conductímetro que se aprecia en la Figura 24, basado en la norma ASTM C 177 97, el cual se empleó para realizar esta investigación.

El procedimiento se llevó a cabo siguiendo los fundamentos de la norma NMX-C-189-ONNCCE-2010, por lo cual se fabricaron probetas de 152 x 127 mm \pm 2 de sección y de 25 mm \pm 2 de espesor como se aprecia en la Figura 24.

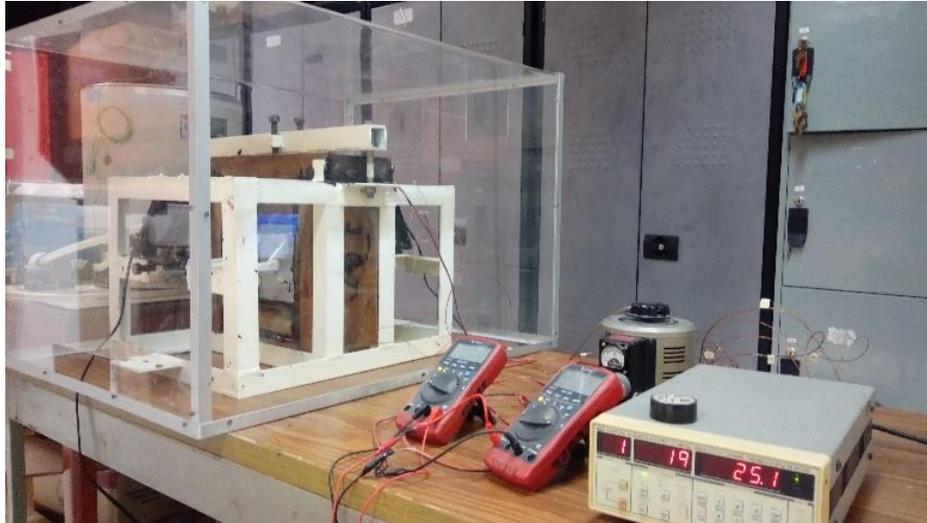


Figura 24. Conductímetro de placa caliente con guarda.

Para cada prueba se utilizaron dos probetas a las que se les realizó un trazado de vértice a vértice como se muestra en la Figura 25, con la cual se determinó la longitud de la ranura para instalar el termopar en la placa, resultando con dimensiones de 7.6 cm de largo por 5mm de profundidad en la parte central de cada cara como la Figura 26.

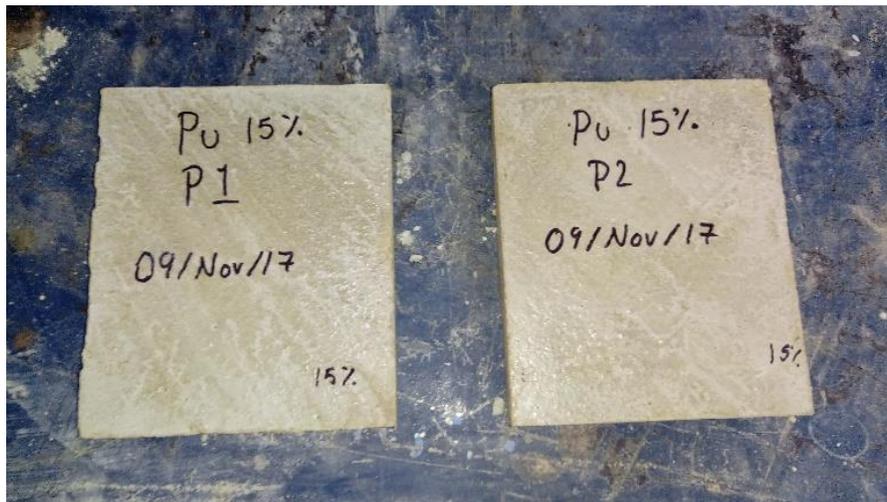


Figura 25. Probetas para ensayo de placa de caliente.

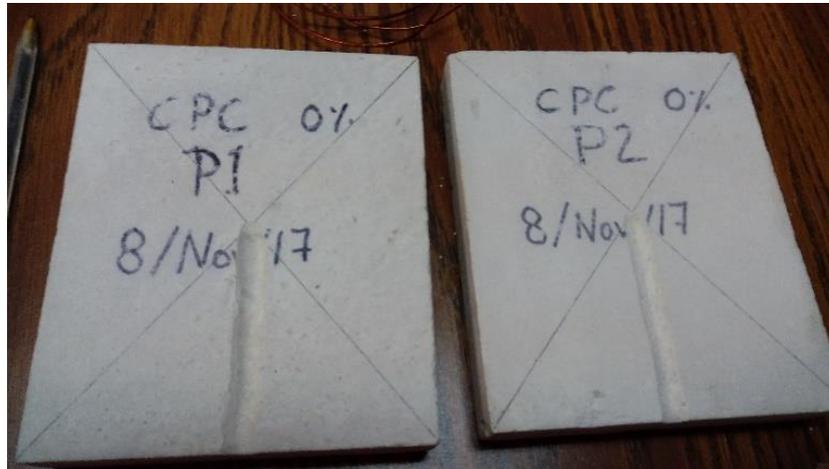


Figura 26. Proceso de ranurado en placas.

En cada ranura se colocó un termopar el cual se fijó y recubrió con silicón para altas temperaturas, se dejó secar para facilitar su colocación en el equipo de conductividad térmica.

Para la instalación de las probetas en el equipo, se colocó a modo de sándwich colocando la placa de cobre en el centro, una placa a cada lado de la central y en la superficie exterior las placas de aluminio de seguridad como se muestra en la Figura 27.



Figura 27. Sándwich con las probetas y placa caliente.

El sándwich se colocó dentro del conductímetro y se aseguró como se muestra en la Figura 28, esto para mejorar el contacto entre las probetas y las placas centrales de cobre las cuales guardan en su interior una resistencia que provee de calor a las probetas, se terminó de armar el conductímetro y se selló por completo con silicón de altas temperaturas, finalmente el dispositivo se dejó secar para su posterior empleo.



Figura 28. Instalación de probetas en conductímetro.

Después de asegurar las probetas se procedió a instalar los dispositivos de medición asegurados en las ranuras de las probetas, se conectaron los cuatro termopares de los especímenes a un monitor de termopares de 16 canales Stanford Research System modelo SR630 como se muestra en la Figura 29, mientras que a la resistencia eléctrica se le suministro calor a través de un variac hasta alcanzar un estado permanente, considerándose este cuando las diferencias de temperaturas en cada recopilación de datos entre las cuatro mediciones consecutivas con intervalos de treinta minutos no varían en más de 0.1 °C.

El proceso completo de la prueba de conductividad térmica incluye cuatro corridas para cada par de probetas, la primera se realizó suministrando a la resistencia 20 volts durante 12 horas consecutivas y se apagó el equipo. La segunda, tercera y cuarta corrida, se aumentó el voltaje cada 24 horas a 25, 30 y 35 volts respectivamente.



Figura 29. Ensayo de placa caliente con guarda.

El monitor de termopares registra los datos y a través de un interfaz los envía a un ordenador que los respalda, mientras que el voltaje y la corriente suministrada a la resistencia se monitoreó con dos multímetros como se observa en la Figura 30.

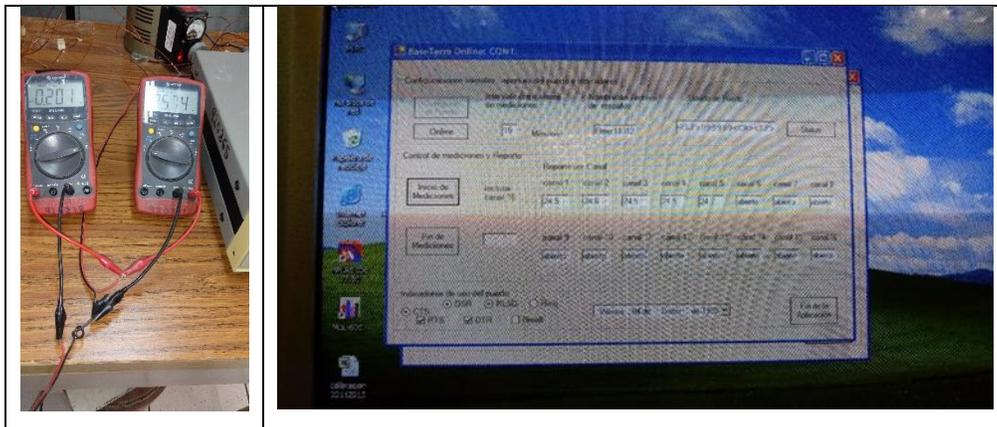


Figura 30. Respaldo de la información de cada corrida.

La conductividad térmica se calculó de acuerdo con la norma ASTM C 518 98 mediante la ecuación de Fourier modificada:

$$K=Q (L_1 + L_2) / 2 A (\Delta T_1 + \Delta T_2)$$

Ecuación 2. Ecuación de Fourier modificada.

Donde:

K = conductividad térmica (W/m °C)

Q = calor suministrado (W)

L_1, L_2 = espesor de cada probeta (m)

A = área promedio de las probetas (m^2)

$\Delta T_1, \Delta T_2$ = diferencial de temperatura de cada probeta ($^{\circ}C$)

Los resultados de los ensayos para determinar la conductividad térmica de los diferentes especímenes están representados en la Tabla 6, donde se puede observar que el coeficiente de conductividad térmica más bajo es el de los especímenes C20, del mismo modo se puede observar la tendencia general, la cual nos indica que a mayor cantidad de sustitución del agregado fino por espuma de poliuretano, el coeficiente de conductividad térmica disminuyó, manteniéndose esta tendencia más estrecha a partir de la sustitución de 20 por ciento.

Tabla 6. Resultados de conductividad térmica.

Tipo de mortero	Conductividad térmica (W/m $^{\circ}C$)
CPC	1.733232566
C15	1.791942828
C20	1.434412106
C25	1.460174313

Es importante mencionar que el coeficiente de conductividad térmica es bajo, pero no se encuentra en el rango de los mejores materiales conductores comerciales, sin embargo, es menor al de los morteros de recubrimiento tradicionales, otra justificante es que el material está distribuido dentro del mortero y no formando una capa homogénea como es en los aislantes comerciales los cuales se aplican en una sola capa o placa.

Calor Específico (C_p)

Mediante la norma ASTM 351 92 el calor específico de un material puede ser determinado, para esto se empleó un calorímetro como el que se muestra en la Figura 31.



Figura 31. Calorímetro.

Inicialmente se obtiene la masa y dimensiones del espécimen, mismo que fue empleado en el ensayo de coeficiente de conductividad térmica, después se depositan 2.8 litros de agua en el interior del calorímetro y se toma la temperatura inicial de esta.

El espécimen se introduce en agua hirviendo (100 °C) durante un periodo de diez minutos, pasado este tiempo se saca del recipiente y se introduce inmediatamente dentro del calorímetro, el dispositivo se tapa y sella mediante silicón para altas temperaturas como se observa en la Figura 32.



Figura 32. Procedimiento de ensayo de calor específico.

Una vez alcanzado el equilibrio térmico se toma la temperatura final y mediante la ecuación que nos marca la norma ASTM 351 92 se determinó el calor específico de la muestra.

$$C_p = m_a C_a (T_{fa} - T_{ia}) / m_m (T_{im} - T_{fm})$$

Ecuación 3. Ecuación de calor específico.

Donde:

C_p = calor específico del espécimen (kJ / kg °C)

m_a = masa del agua (kg)

C_a = calor específico del agua (kJ/kg °C)

T_{fa} = temperatura final del agua (°C)

T_{ia} = temperatura inicial del agua (°C)

m_m = masa de la muestra (kg)

T_{im} = temperatura inicial de la muestra (°C)

T_{fm} = temperatura final de la muestra (°C)

Después del ensayo se obtuvieron los resultados presentes en la Tabla 7, cálculos presentes en el anexo 1.

Tabla 7. Resultados del ensayo de calor específico.

Tipo de mortero	calor específico	unidades
CPC	0.721701579	kJ / kg °C
C15	0.754668071	kJ / kg °C
C20	0.752567298	kJ / kg °C
C25	0.796372854	kJ / kg °C

En el caso del calor específico, las muestras presentaron valores muy similares, más específicamente en el caso de C15 y C20 los cuales están en el rango de 0.75 kJ / kg °C.

Monitoreo en condiciones reales.

En base a los resultados obtenidos en laboratorio de resistencia a la compresión, adherencia y desempeño térmico, de las 4 diferentes (pon aquí las cuatro) proporciones de sustitución, se determinó que el mortero C20, el cual tiene una sustitución del 20 por ciento del agregado fino por espuma de poliuretano rígido, posee el mejor desempeño en sus propiedades térmicas, mecánicas y físicas.

Con la justificación anterior se procedió a la elaboración de los prototipos donde se aplicó el recubrimiento térmico, con las especificaciones del plano de la Figura 33.

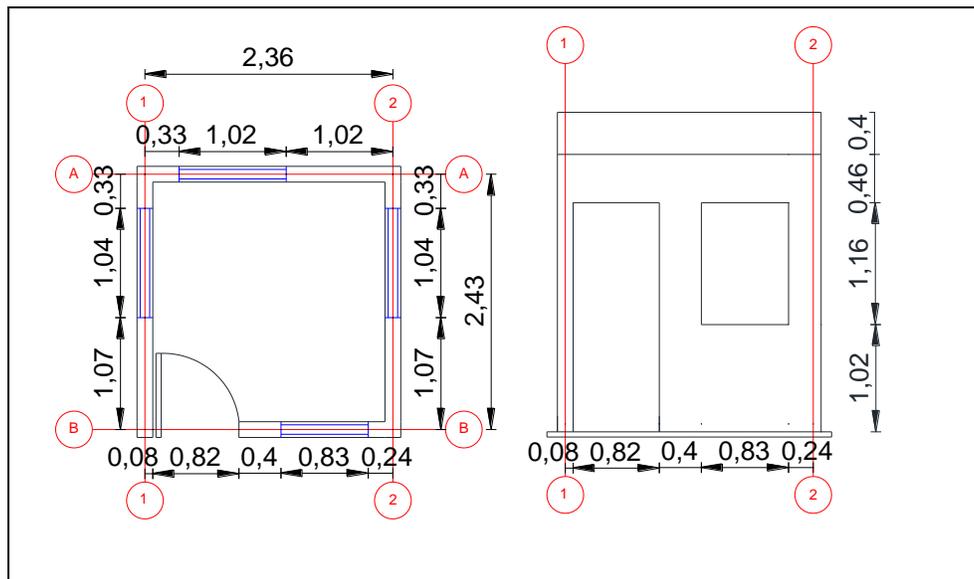


Figura 33. Plano arquitectónico de prototipo.

La construcción de los prototipos se realizó con una cimentación a base de mampostería con piedra de la región como se muestra en la Figura 34 y dados en los puntos de desplante de los castillos de ambos prototipos.



Figura 34. Mampostería con piedra de la región.

El cuerpo de los prototipos es a base de muros de block y la losa es de vigueta y bovedilla, ambos tienen las mismas dimensiones y están situados uno frente al otro en espejo con una separación de 3 metros entre ellos como se puede observar en la Figura 35.



Figura 35. Siembra y losa de vigueta y bovedilla.

En la parte de arriba de la losa, se colocó un calcreto de 5 cm con pendiente de 1 por ciento a cada metro para evitar el estancamiento y filtración al interior de la caseta como indica la Figura 36.



Figura 36. Colocación de Calcreto de 5 cm de espesor.

En el interior de cada prototipo se elaboró un firme de concreto de 7 cm de espesor con acabado rústico como se aprecia en la Figura 37, los muros tanto interiores como exteriores se dejaron sin recubrimiento, debido a que una vez establecido el tipo de recubrimiento este se aplicaría.



Figura 37. Firme de concreto con acabado rustico.

Una vez terminados los prototipos se procedió a la aplicación de la envolvente térmica. El primer prototipo se recubrió con la muestra CPC o blanco, la cual es un mortero relación 1:5, aplicado en un espesor promedio de 1.5 cm en una sola capa con acabado rústico, únicamente perfilado con la llana como se observa en la Figura 38 y 39.



Figura 38. Aplicación de envolvente térmica.

Previo a la aplicación se colocaron los cordeles para mantener un espesor promedio de 1.5 cm y los muros fueron humedecidos con abundante agua, para evitar que, al aplicar el mortero sobre el muro, parte de la humedad de la mezcla sea absorbida.

La mezcla se preparó en lotes de 16.8 kg de cemento, 59.2 kg de agregado fino y 12.4 litros de agua, pero previo a la aplicación se realizó la prueba de fluidez para asegurar las mismas características en cada una estas.

La aplicación de la envolvente térmica del prototipo CPC se realizó en un solo día para asegurar las mismas condiciones. Al final el prototipo ocupó un total de 268.8 kg de cemento, 947.2 kg de agregado fino y 198.4 litros de agua.

Al día siguiente se procedió al curado de la envolvente, aplicando agua sobre toda la superficie 2 veces al día, del mismo modo se llevó a cabo la aplicación de la envolvente térmica del prototipo C20, en el cual se aplicó mediante lotes de 16.8 kg de cemento, 47.472 kg de agregado fino, 0.265 kg de espuma de poliuretano rígido y 12.420 litros de agua, del mismo modo que en el prototipo CPC en cada lote se realizó la prueba de fluidez para asegurar las mismas características entre lotes.

Al final, la envolvente térmica del prototipo C20 ocupó 285.6 kg de cemento, 806.99 kg de agregado fino, 4.5 kg de espuma rígida de poliuretano y 211.14 litros de agua.



Figura 39. Aplicación de envolvente térmica con acabado rustico.

Una vez terminada la aplicación de la envolvente térmica en ambos prototipos se procedió al curado durante 28 días aplicando agua sobre las superficies a tiro directo dos veces al día.

De acuerdo con la norma ASTM C1046-95 ambos prototipos deben estar cerrados por completo para la cual las ventanas y puertas se sellaron con madera de triplay de 15 mm, al final todas las juntas, así como las salidas eléctricas se sellaron con espuma expandible de poliuretano tanto por dentro como fuera, así como se aprecia en la Figura 40.



Figura 40. Sellado de prototipos con espuma expandible de poliuretano.

Finalmente, después de sellar las ventanas y salidas eléctricas, se procedió a instalar los equipos de monitoreo, la norma nos indica que el dispositivo Hobo debe estar situado al centro del prototipo a todas las direcciones, como se representa en la Figura 41.



Figura 41. Instalación de hobos.

Los hobos se instalaron con un cable de datos, el cual sale del prototipo debido a que, una vez finalizada la instalación, la puerta del prototipo se cerró y selló con la espuma de poliuretano expandible como se puede observar en la Figura 42, esto para mantener las condiciones estables al interior.



Figura 42. Sellado de puertas y ventanas con espuma de poliuretano expandible.

El sensor de temperatura y humedad exterior se instaló en las cercanías bajo el volado de la losa del laboratorio de posgrado a una distancia de 15 metros de los prototipos, se empleó un sensor dht22 como el de la Figura 43, y mediante un programa desarrollado en el software de Arduino se llevó a cabo el monitoreo en condiciones reales.



Figura 43. Sensor dht22 de humedad y temperatura.

Después de instalar los sensores interiores y exteriores se dio inicio al monitoreo en condiciones reales el día primero de mayo de 2018. El monitoreo consiste en que los sensores registren la temperatura y humedad cada 30 minutos durante las 24 horas del día por un periodo de 6 meses, este periodo abarca del mes de mayo a octubre de 2018.

El objetivo principal es comparar los resultados del monitoreo interior entre los dos prototipos y determinar la diferencia de estos con la temperatura y humedad exterior. En la Figura 39 se presenta una tabla con los resultados del monitoreo realizado en los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre; presenta los valores promedio temperatura por mes de los sensores instalados en el exterior (EXT), en el prototipo CPC y en el prototipo C20.

En la Figura 44, se puede observar que los meses registrados con las temperaturas más altas son el mes de mayo y el mes de julio, pero de igual modo se puede observar que en los meses más cálidos siendo estos de mayo a agosto la temperatura exterior fue más elevada que la interior de ambos prototipos, la tendencia se mantiene similar hasta llegar al mes de septiembre donde la

temperatura exterior es más baja que la interior de los prototipos, esto se debe al aumento de las lluvias y llegada del invierno, con lo se concluye que el material además de disminuir el flujo del calor al interior, en el caso de que el exterior sea más cálido, en el interior de los prototipos al estar cerrados y sellados la temperatura se mantiene más elevada que en el exterior.



Figura 44. Temperatura promedio por mes.

Comparando la temperatura exterior con la del prototipo CPC se observó que la diferencia va del orden de 0 a 1.8 grados, siendo el mes de octubre la única excepción a la tendencia, dado que este mes pertenece a la temporada fría y la envolvente térmica funciona en sentido contrario, reteniendo la temperatura interior de los prototipos, por lo cual la exterior fue más baja.

Comparando la temperatura exterior con la del prototipo C20, se concluye que la diferencia va del orden de 0 a 2.5 grados lo cual de acuerdo con las condiciones de la zona de Quintana Roo, se destaca que una diferencia de más de dos grados es muy significativa y mejora considerablemente las condiciones del interior del hogar.

En el caso del mes de octubre las condiciones cambian, pero del mismo modo se puede observar que la temperatura en el prototipo C20 es más baja que la registrada en el prototipo CPC.

Se observa que al comparar las temperaturas promedio del prototipo CPC con las del prototipo C20, en el caso del último son más bajas, por lo cual se cumple lo establecido en la hipótesis de la investigación, las diferencias van del orden de 0 a 0.5 grados siendo las temperaturas en el prototipo C20 más bajas que en el prototipo CPC.

En la Figura 40, se observa, el promedio mensual de la humedad en los 3 diferentes sensores medida en un periodo de 6 meses el cual abarcó del mes de mayo de 2018 a octubre de 2018, es notable como la humedad aumenta en los meses donde, por lo general las lluvias son más comunes, es importante mencionar que la humedad exterior es más baja en los meses más soleados y cálidos, sin embargo, a medida que los meses se tornan más lluviosos, la humedad exterior aumentó más que la interior de ambos prototipos, de acuerdo a lo establecido en la tesis, cabe recalcar que la humedad dentro del prototipo C20 es muy similar a las del prototipo CPC, únicamente se presentaron diferencias del orden de 0 a 0.5 % de variación, lo cual indicó que a diferencia de los aislantes térmicos comerciales instalados en placas o encofrados este recubrimiento modificado no aumentó la concentración de humedad al interior del prototipo de manera significativa.

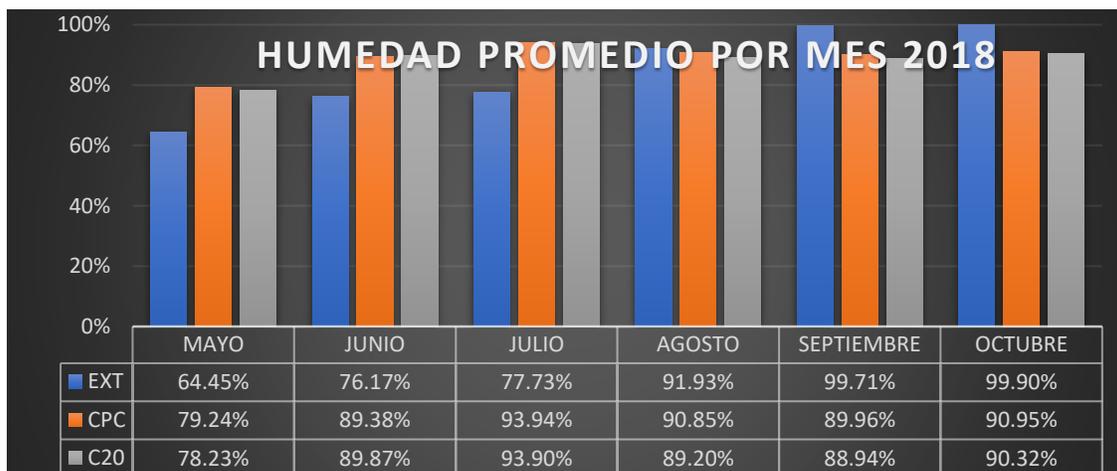


Figura 45. Humedad promedio por mes.

En las Figuras 46 y 47 se puede observar los valores promedio de temperatura mínima y máxima de ambos prototipos, en el caso de la temperatura en el prototipo C20 siempre es más baja que en el prototipo CPC, por lo cual se concluye que en condiciones reales modificar el mortero de recubrimiento si reduce la temperatura interior con diferencias que van desde 0 a 1.5 grados y mantiene la concentración de humedad muy similar a la muestra blanco, el comportamiento de los valores es muy similar cuando la temperatura en el prototipo CPC baja igual lo hace en el prototipo C20 y viceversa.



Figura 46. Temperatura mínima por mes.



Figura 47. Temperatura máxima por mes.

En las Figuras 48 y 49 se observan los valores promedio obtenidos por mes de humedad en ambos prototipos, en donde se encontró que, tanto en los valores mínimos como en los valores máximos, la humedad se mantiene constante en ambos prototipos con diferencias menores al 0.5 %.

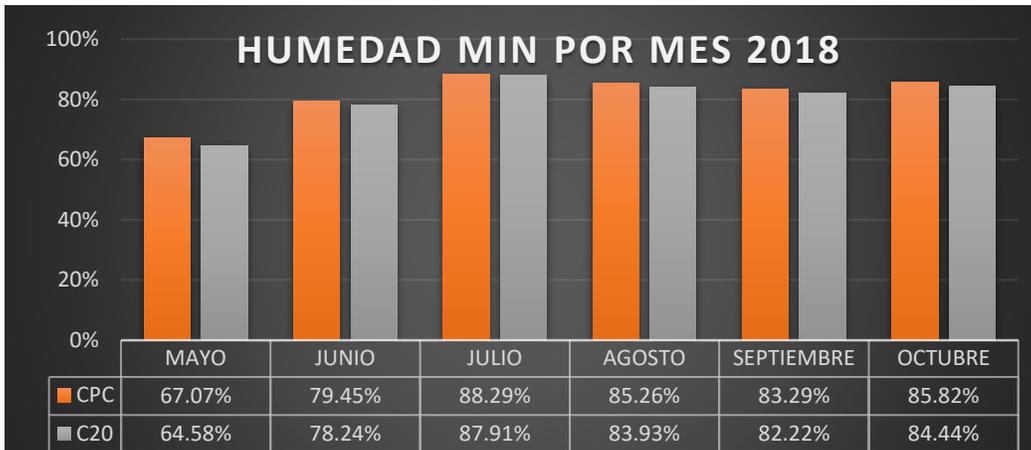


Figura 48. Humedad mínima por mes.



Figura 49. Humedad máxima por mes.

La Figura 50, presenta los valores promedio por día de la temperatura encontrada en los 3 sensores durante el mes de mayo, donde se puede observar el comportamiento de la temperatura a lo largo del mes, los días donde las

temperaturas son más bajas son debido a las lluvias, pero inmediatamente después de estar soleado la temperatura se incrementa dentro de cada prototipo hasta llegar a los valores de temperatura promedio que oscilan entre 30 y 35 grados centígrados.

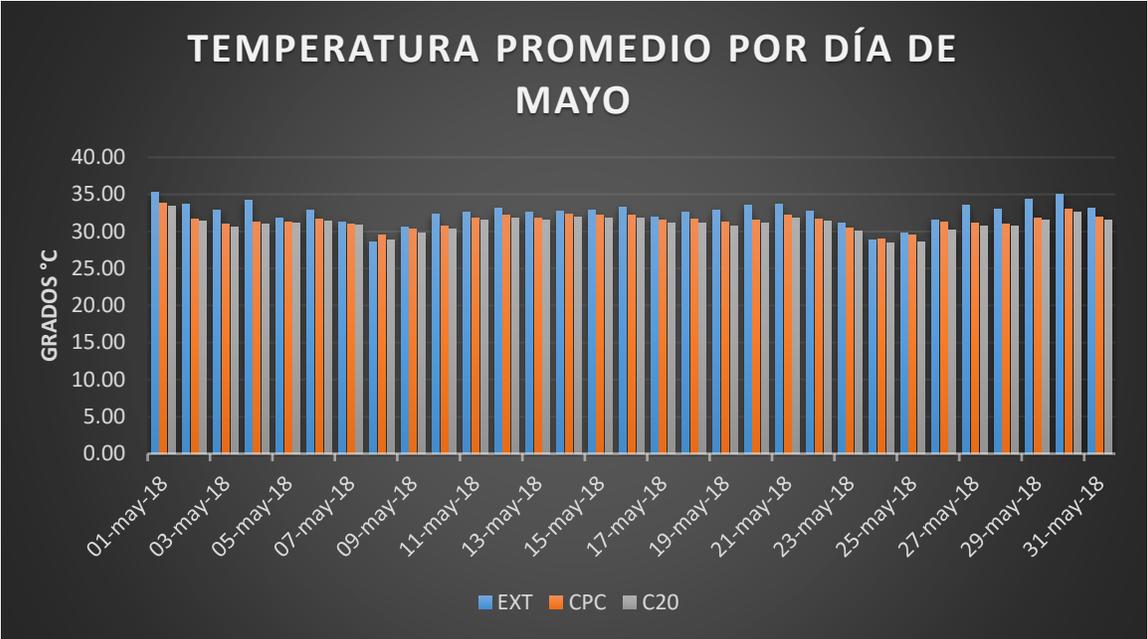


Figura 50. Temperatura promedio por día del mes de mayo.

La Figura 51, presenta los valores de humedad promedio de los 3 sensores durante el mes de mayo, los cuales fueron medidos a cada 30 minutos, durante las 24 horas diarias, en el caso de la humedad la concentración es mayor dentro de los prototipos, lo cual indica que al estar en un medio herméticamente cerrado, esta, se almacena y no se disipa tan rápido como en el exterior, pero del mismo modo se observó que la humedad al interior entre ambos prototipos tuvo el mismo comportamiento y valores muy semejantes, por lo que cumple el objetivo de disminuir la temperatura sin modificar o afectar el contenido de humedad.

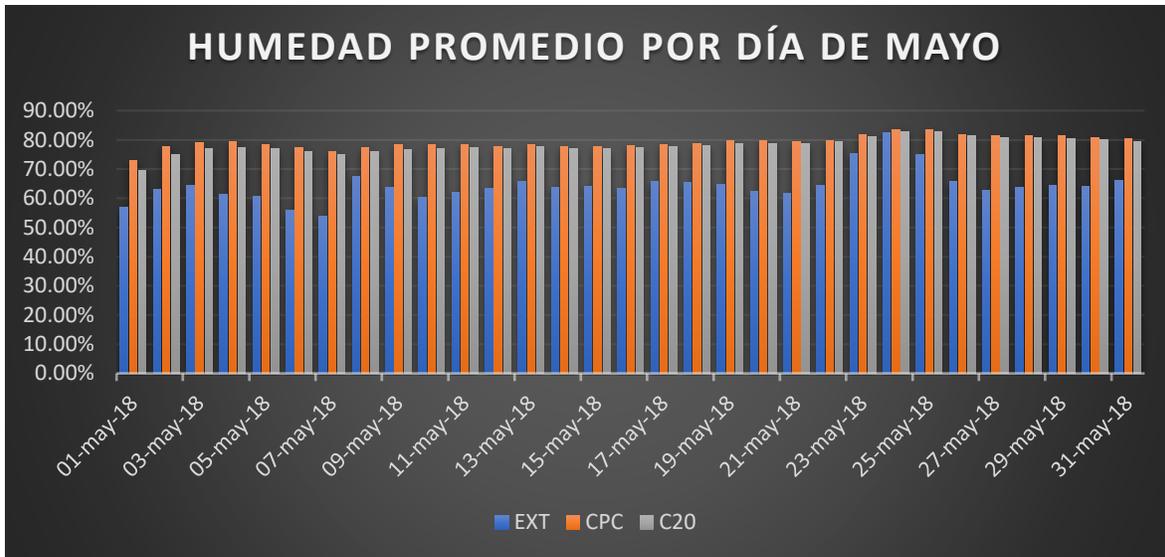


Figura 51. Humedad promedio por día del mes de mayo.

La Figura 52, presenta los valores promedio por día del mes de junio, es importante mencionar que esta Figura tiene los valores más pronunciados que los presentados en el resumen del mes de mayo, esto se debe al aumento de lluvias en el mes, lo cual propició que el comportamiento de la temperatura fuera más variado.

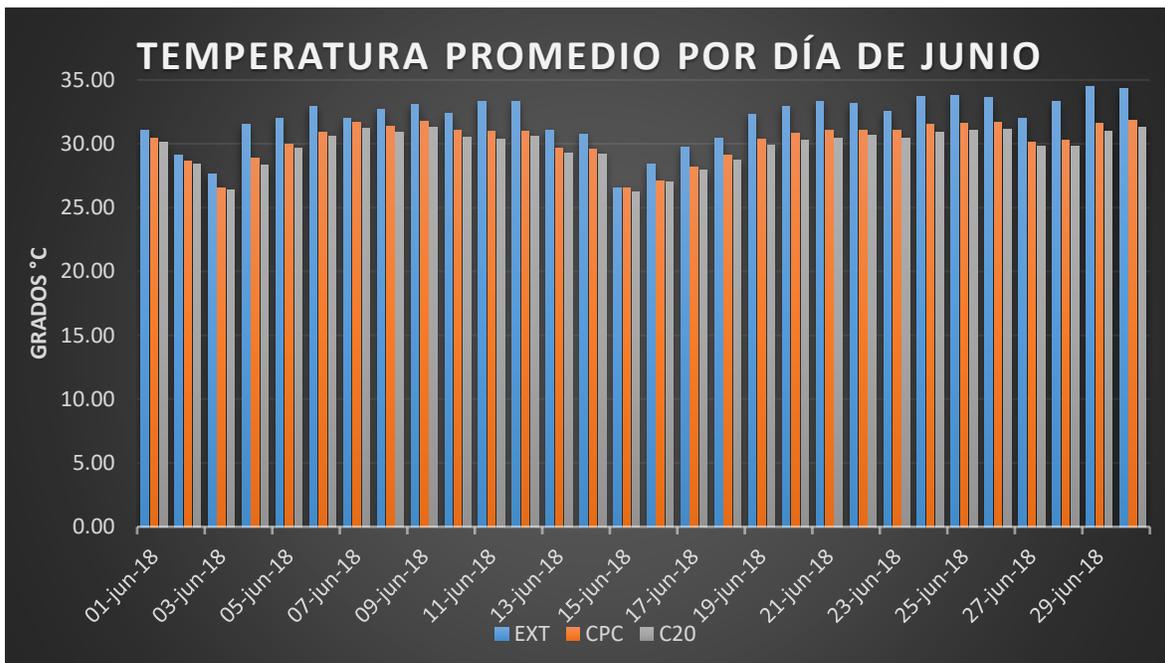


Figura 52. Temperatura promedio por día del mes de junio.

La Figura 53, presenta los valores promedio de humedad por día del mes de junio, del mismo modo que en el mes de mayo la humedad al interior de los prototipos fue mayor que la exterior pero muy similar entre ambos prototipos.

Igual se puede observar que entre el 15 y 17 de junio la humedad exterior fue mayor, esto se puede deber al aumento de lluvias en ese periodo.

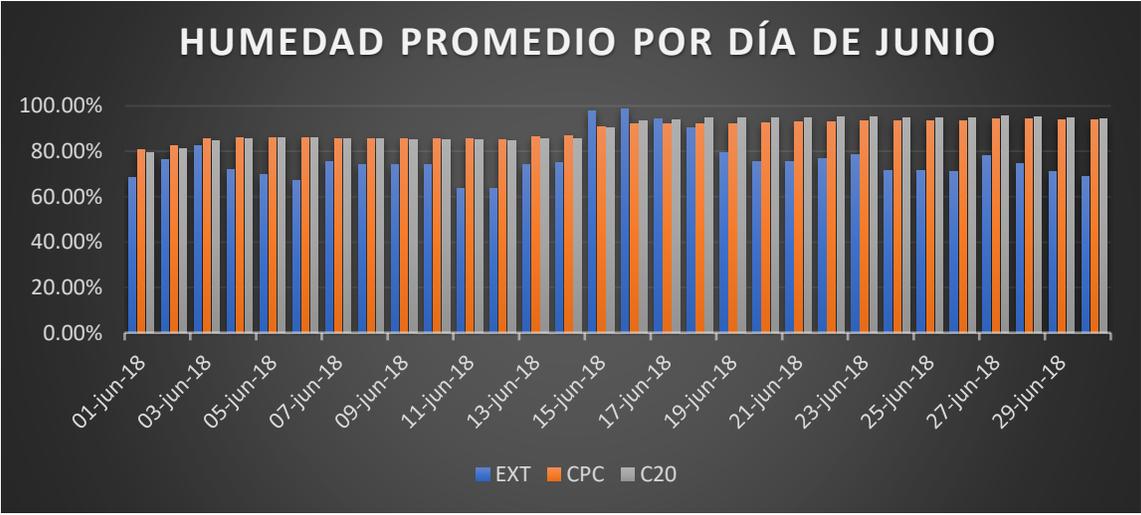


Figura 53. Humedad promedio por día del mes de junio.

La Figura 54, presenta los valores promedio por día de los 3 sensores durante el mes de julio, del mismo modo se observa que la temperatura exterior fue mayor a la temperatura interior y además la temperatura interior del C20 fue menor a la del prototipo CPC.

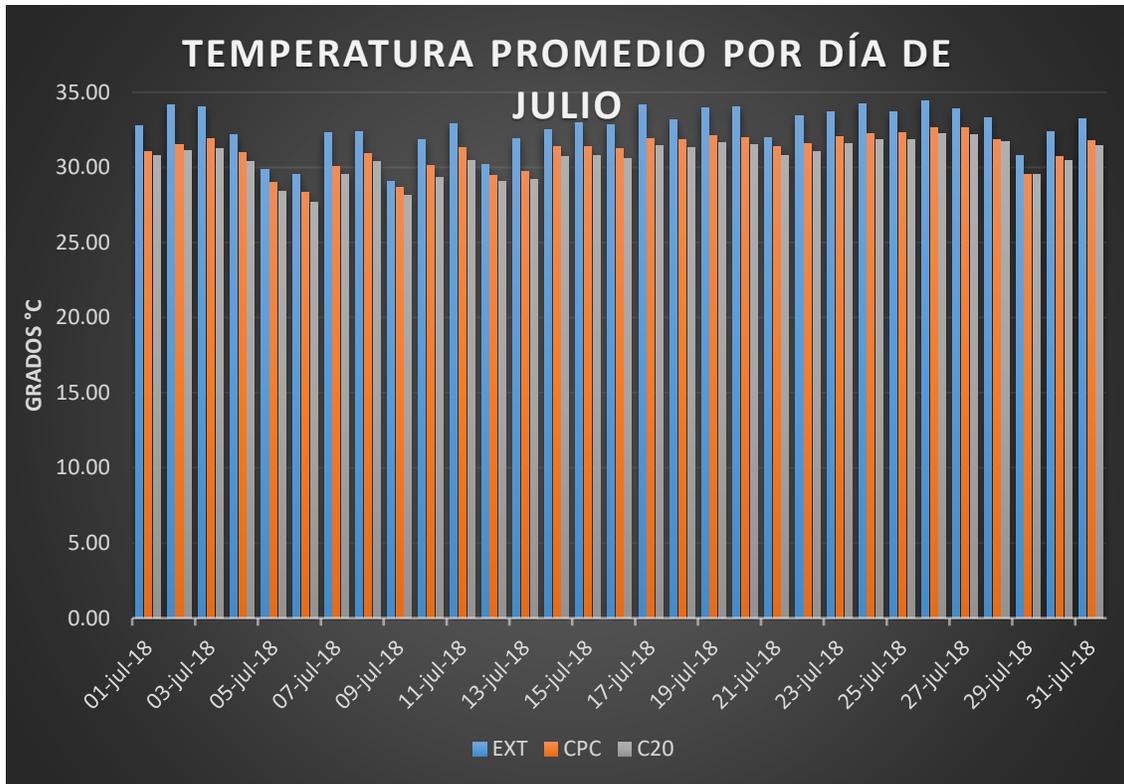


Figura 54. Temperatura promedio por día del mes de julio.

El comportamiento de la humedad en el mes de julio fue similar al de los meses anteriores como se puede apreciar en la Figura 55.



Figura 55. Humedad promedio por día del mes de julio.

En la Figura 56, se puede observar que en algunas fechas del mes de agosto la temperatura interior fue más elevada que la exterior, esto se debe al aumento de días lluviosos y que se dieron principalmente al final del mes, para que esto fuera posible, se trata de un periodo lluvioso o muy nublado, de lo contrario, en el caso de lluvias esporádicas, la temperatura tendría picos de comportamiento y no una línea casi constante.

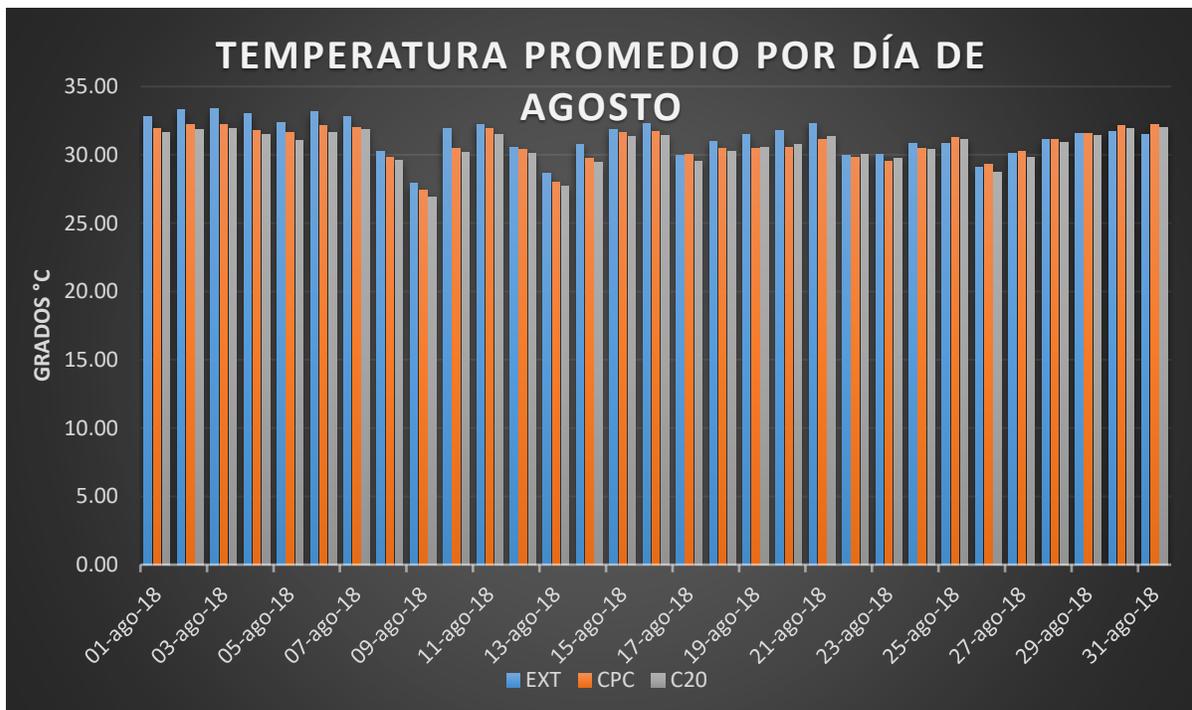


Figura 56. Temperatura promedio por día del mes de agosto.

En la Figura 57, se puede observar que debido a que el periodo de lluvias tiene influencia sobre la temperatura sucede lo mismo en la humedad, siendo más elevada en el exterior que en el interior de ambos prototipos.

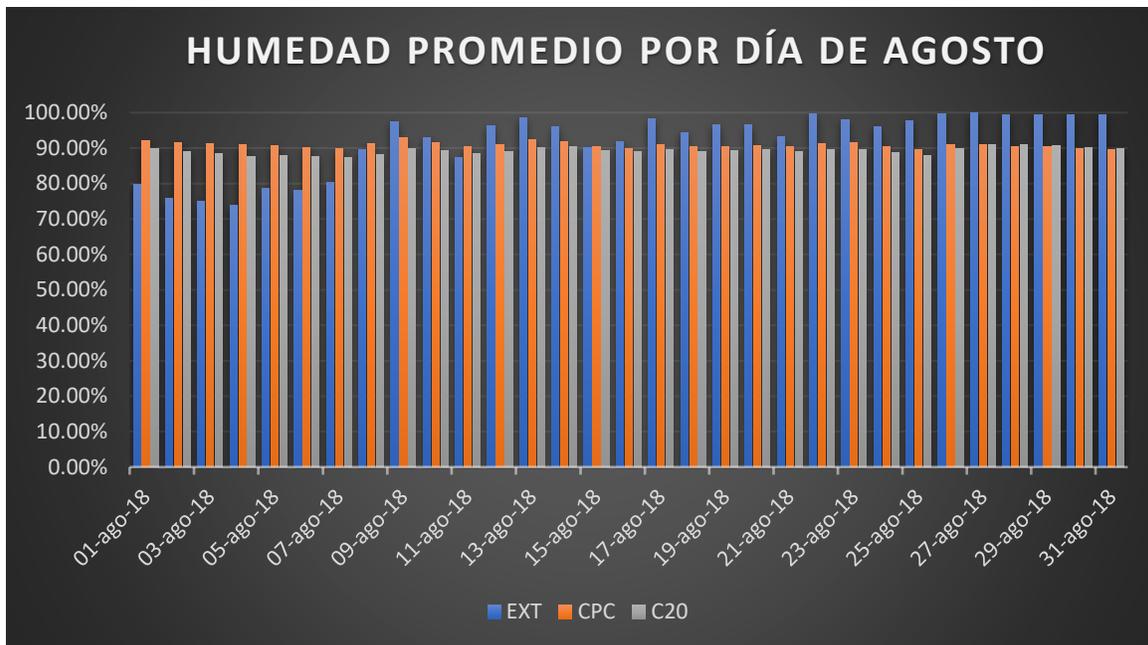


Figura 57. humedad promedio por día del mes de agosto.

En el mes de septiembre, debido al aumento de lluvias esporádicas y bajas temperaturas, se presenta una mayor variación en los resultados, como se observa en Figura 58, esto se debe a que la temperatura puede ser elevada en un día soleado, pero el día siguiente puede amanecer con lluvias intensas, lo cual disminuye la temperatura exterior, al grado de que sea más baja que la interior en ambos prototipo., Es esa sensación que se da en invierno cuando al entrar al hogar se percibe más cálido que el exterior, lo cual indica que el material funciona igual en temperaturas bajas, manteniendo la temperatura interior más elevada que la exterior.

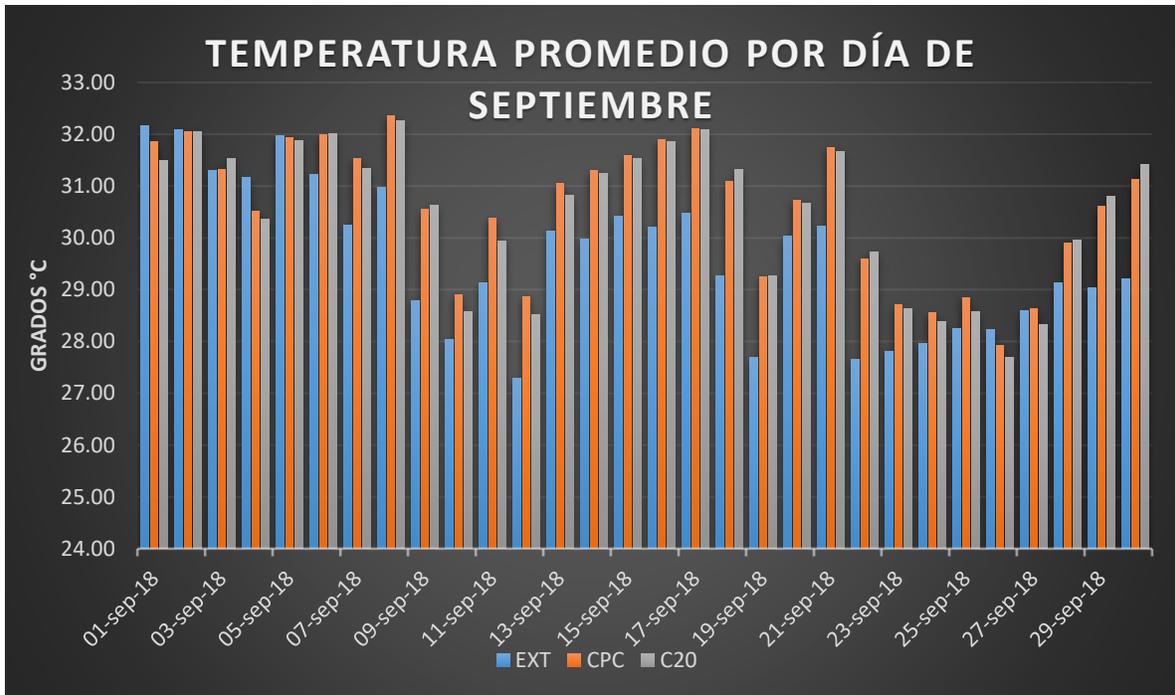


Figura 58. Temperatura promedio por día del mes de septiembre.

Del mismo modo como se observa en la Figura 59, la humedad en el interior de los prototipos fue más baja que en el exterior durante casi todo el mes, debido a las lluvias y a la evaporación del agua durante el mediodía.

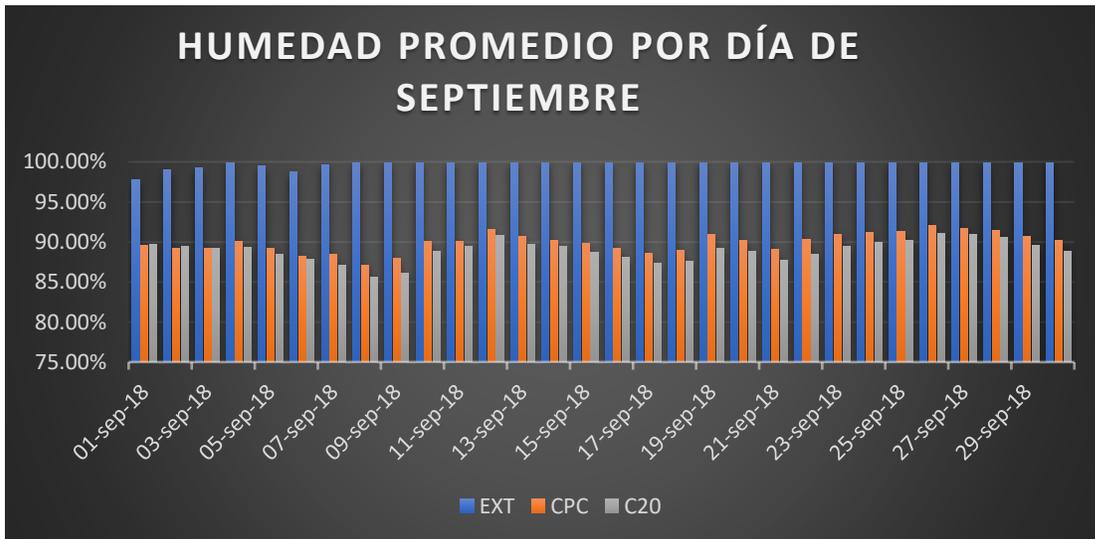


Figura 59. Humedad promedio por día del mes de septiembre.

Microscopia electrónica de barrido.

Para complementar los estudios sobre sustituir agregado fino por espuma de poliuretano es necesario saber qué es lo que sucede en la superficie de contacto entre las partículas de poliuretano y la pasta de mortero, por lo que se realizó un análisis por microscopia electrónica de barrido.

Para la prueba se tomaron cuatro muestras de 16 mm cuadrados de superficie por cada una de las diferentes dosificaciones como se aprecia en la Figura 60.



Figura 60. Muestras para microscopia.

Las muestras se depositaron en las placas bases del microscopio, estas deben de ser sin relieves superficiales como se aprecia en la Figura 61.

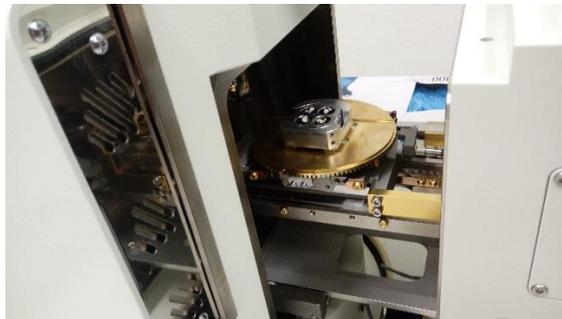


Figura 61. Instalación de las muestras en probetas del microscopio.

En la Figura 62, se puede observar una muestra de C15 vista a 750x en donde se aprecia que la superficie de la partícula de poliuretano es de una textura lisa, lo cual reduce la adherencia con la pasta de mortero. Por otro lado, se permite observar

como en lugar de adherirse la pasta de cemento a la partícula, en realidad la pasta de mortero recubre o encofra la partícula de poliuretano, por lo que la mantiene unida.

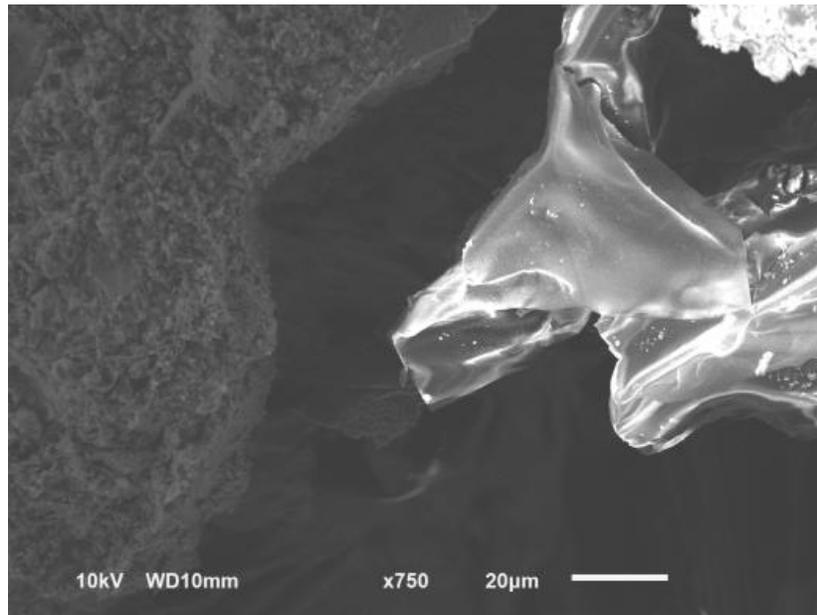


Figura 62. MEB (750x) morfología de partículas de poliuretano en mortero con sustitución del 15 % de agregado fino por espuma de poliuretano.

En la Figura 63 se puede observar la zona de interfase entre la partícula de poliuretano y la pasta de mortero, en las pruebas mecánicas de resistencia a la compresión se destacó, que a medida que la sustitución de agregado fino por espuma de poliuretano incrementaba, la resistencia a la compresión disminuía, esto puede corroborarse con la evidente falta de adherencia de la partícula de poliuretano con la pasta de mortero como señala Gadea (2010) en su investigación sobre morteros aligerados con espuma de poliuretano.

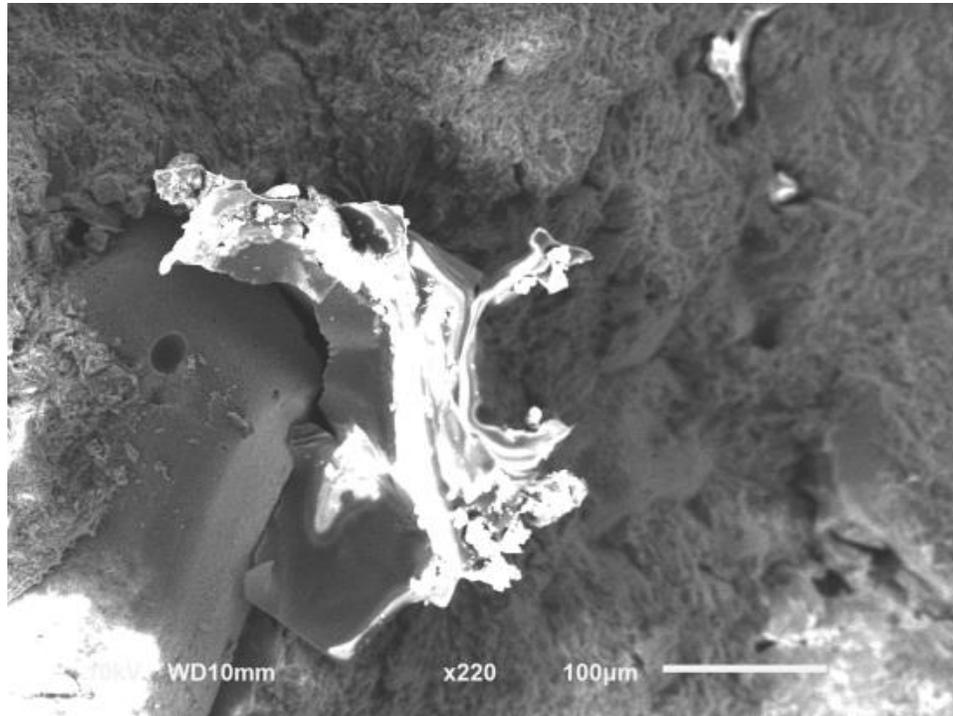


Figura 63. MED (220X) zona de interfase entre partícula de poliuretano y pasta de mortero con sustitución del 20 % de agregado fino por espuma de poliuretano.

Resumen de resultados

En este trabajo de investigación se evaluó el desempeño mecánico y físico de un mortero, elaborado en relación 1:3 cemento-agregado fino, con sustitución parcial del agregado fino calizo al 15, 20 y 25 %, con respecto a su volumen por espuma rígida de poliuretano reciclado. Los resultados de la investigación incluyen los valores de resistencia a la compresión de las diferentes composiciones, así como: sus valores máximos, mínimos y promedios; los valores promedio de resistencia mecánica a la compresión fueron los siguientes CPC de 30.86 MPa, C15 de 27.62 MPa. En el caso de C20 de 24.21 MPa y por último C25 de 23.15 MPa. De igual modo se presentan los resultados de la adherencia entre el mortero de recubrimiento y el muro de block CPC de 11.0461 kg/cm², C15 de 8.2575 kg/cm², C20 de 11.3710 kg/cm² y por último C25 de 10.6941 kg/cm². Es importante señalar que dos de las características más importantes de cualquier envolvente, son su resistencia a la compresión y la adherencia entre recubrimiento y soporte, la cual

brinda la durabilidad del material en su sitio y le permite desempeñar su función correctamente, ambas relacionadas debido a que si una disminuye la otra se ve afectada. Un recubrimiento muy resistente pero que no se mantiene en su sitio, por falta de adherencia no funciona correctamente, del mismo modo un recubrimiento que se mantiene adherido, pero al golpearlo se desborona tampoco sirve.

El coeficiente de conductividad térmico más bajo fue el de la muestra C20 con un valor de 1.434412106 W/m °C, los aislantes térmicos comerciales se encuentran en el rango de valores menores a 1, pero tomando en cuenta que se está empleando un material de desecho y de acuerdo a los resultados del monitoreo térmico, en donde la variación de temperatura está en el orden de 0 a 1.5 grados menos en el prototipo modificado que en el prototipo muestra, se llega a la conclusión de que el material está cumpliendo con su objetivo, simplemente es necesario analizar de qué modo se pudiera hacer más óptimo, como por ejemplo aplicarlo en el plafón o en muros interiores para mejorar la envolvente térmica de todo el espacio.

Conclusiones

Los resultados demuestran que la sustitución parcial en el mortero de 20 % del agregado fino por espuma de poliuretano, presenta los mejores resultados de resistencia a la compresión de 24.21 MPa y adherencia de 11.3710 kg/cm², debido a la gran cantidad de agregado que se puede sustituir, sin comprometer los valores de resistencia mecánica y adherencia del mortero de recubrimiento.

Los resultados del monitoreo en condiciones reales demuestran que el prototipo C20 con sustitución parcial del 20 % de agregado fino, comparado con el CPC (mortero relación 1:5), reduce la temperatura interior en márgenes de 0 a 1.5 grados, manteniendo la humedad estable, lo cual cumple con la hipótesis propuesta.

Recomendaciones

Trabajos futuros se podrían enfocar sobre el desempeño térmico y durabilidad del mortero con sustitución parcial de agregado fino por espuma rígida de poliuretano aplicado en los muros interiores o azoteas, donde el objetivo sea obtener un aislante térmico de bajo costo y fácil aplicación, la bibliografía nos presenta estudios similares, pero con materiales diferentes como el poliestireno, cascara de arroz, papel, entre otros; los cuales se estudiaron sustituyendo arena de río la cual en la zona sur de Quintana Roo no se encuentra disponible.

Bibliografía

- Aranda, L. J. (2009). *Análisis de avances tecnológicos en aislantes térmicos industriales*. DELTA *Proyectos y Desarrollo*. Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/20695494><http://www.jstor.org/><http://www.jstor.org/action/showPublisher?publisherCode=iif>.
- Arboit, M., Arena, P., & de Rosa, C. (2008). Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 12, 2008. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12, 97–104. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- ASTM C109/C109M. Historical Standard: Normalizado de Ensayo de Resistencia a Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Utilizando Especímenes Cúbicos de 2 in. o [50-mm]). (2008).
- ASTM C230 / C230M. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. (2014).
- ASTM C952. Standard Test Method for Bond Strength of Mortar to Masonry Units. (2012).
- ASTM C 177 97. *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*.
- ASTM C 1046 95 Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components.
- Barrera Castro, G. P. (2016). Caracterización de las propiedades mecánicas y térmicas de muestras de EPS pos consumo, utilizadas en la industria de alimentos y sometidas a un proceso de recuperación. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/50885/>
- Ben Fraj, A., Kismi, M., & Mounanga, P. (2010). Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24(6), 1069–1077. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.010>

- Candela, C., & Milla, S. (2010). *Libro blanco del Poliuretano Proyectado*. (AISLA, Ed.), *Asociación Técnica del Poliuretano Aplicado* (Vol. 3.2). Madrid. Retrieved from <http://www.iedar.es/pdf/Libro-Blanco-del-Azucar-Indice-Interactivo.pdf>
- Esquivel, M. I. (2013). *Evaluación de las propiedades físicas y térmicas de morteros con adición de caucho en clima cálido subhúmedo*. Instituto Tecnológico de Chetumal.
- Ferrándiz-Mas, V., Bond, T., García-Alcocel, E., & Cheeseman, C. R. (2014). Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. *Construction and Building Materials*, *61*, 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.028>
- Ferrándiz-Mas, V., & García-Alcocel, E. (2012). Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS). *Materiales de Construcción*, *62*(308), 547–566. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.04611>
- Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P. L., Garabito, J., & Calderón, V. (2010). Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, *32*(9), 672–677. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.017>
- Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., & Calderón, V. (2012). Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, *28*(1), 653–658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.055>
- Hobaica, M. E., Sosa, M. E., Rosales, L., & Eugenia, M. (2000). *Del Aire Interior De Viviendas*, *25*, 136–142.
- Junco, C., Gadea, J., Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2012). Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, *34*(10), 1174–1179. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.006>
- Junco Petrement, C. (2012). Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano Obtención , caracterización y puesta en obra.
- Kramar, D., & Bindiganavile, V. (2011). Mechanical properties and size effects in lightweight mortars containing expanded perlite aggregate, 735–748. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9662-0>
- Kramar, D., & Bindiganavile, V. (2013). Cement & Concrete Composites Impact response of lightweight mortars containing expanded perlite. *Cement and Concrete Composites*, *37*, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.10.004>
- Mauricio, H., & Quezada, P. (2014). ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL POLIURETANO UTILIZADO COMO AISLANTE TÉRMICO , EN LA EMPRESA ESPROM-PUR AMBATO.
- Mónica Cristina Lituma Vicuña, & Brigida Tatiana Zhunio Cárdenas. (2015). Influencia De Las Perlas De Poliestireno Expandido (Eps) En El Peso Y En La Resistencia a Compresión Del Hormigón. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23112/1/Tesis.pdf>
- Mounanga, P., Gbongbon, W., Poullain, P., & Turcry, P. (2008). Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement and*

- Concrete Composites*, 30(9), 806–814. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.007>
- NMX-C-414-ONNCCE. Cementantes hidráulicos - especificaciones y métodos de ensayo. (2010).
- Pineda, N. (2018). Microscopía Electrónica de Barrido. Retrieved from <http://mty.cimav.edu.mx/sem/>
- Serrano, T., & Borrachero, M. V. (2012). DISEÑO DE MEZCLAS Y EVALUACIÓN DE PROPIEDADES LIGHTWEIGHT MORTARS WITH RICE HUSK : MIX DESIGN AND PROPERTIES EVALUATION, 128–136.
- Václavík, V., Dvorský, T., Dirner, V., Daxner, J., & Šťastný, M. (2012). Polyurethane foam as aggregate for thermal insulating mortars and lightweight concrete. *Tehnički Vjesnik*, 19(September), 665–672. Retrieved from http://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=129106
- Vergara, N. (2007). *Estudio de la relación composición química y propiedades en el proceso de obtención de una espuma de poliuretano flexible.pdf*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zia, K. M., Bhatti, H. N., & Ahmad Bhatti, I. (2007). Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review. *Reactive and Functional Polymers*, 67(8), 675–692. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2007.05.004>

ANEXO 1

Calor específico

NORMA ASTM 351 92

$$C_p = m_a C_a (T_{fa} - T_{ia}) / m_m (T_{im} - T_{fm})$$

Donde:

C_p = calor específico del espécimen (kJ / kg °C)

m_a = masa del agua (kg)

C_a = calor específico del agua (kJ/kg °C)

T_{fa} = temperatura final del agua (°C)

T_{ia} = temperatura inicial del agua (°C)

m_m = masa de la muestra (kg)

T_{im} = temperatura inicial de la muestra (°C)

T_{fm} = temperatura final de la muestra (°C)

Cp	0.700	kJ / kg °C
m_a	2.800	kg
C_a	4.180	kJ / kg °C
T_{fa}	32.100	°c
T_{ia}	28.200	°c
m_m	0.960	kg
T_{im}	100.000	°c
T_{fm}	32.100	°c

Cp	0.743	kJ / kg °C
m_a	2.800	kg
C_a	4.180	kJ / kg °C
T_{fa}	33.025	°c
T_{ia}	28.900	°c
m_m	0.970	kg
T_{im}	100.000	°c
T_{fm}	33.025	°c

P1 CPC	TERMOPAR SR630	
FECHA	HORA	TERMOPAR
11/09/2018	12:11	30.6
11/09/2018	12:41	32.0
11/09/2018	13:11	32.1
11/09/2018	13:41	32.2
11/09/2018	14:11	32.1
promedio		32.10

P2 CPC	TERMOPAR SR630	
FECHA	HORA	TERMOPAR
11/09/2018	03:18	31.2
11/09/2018	03:48	32.8
11/09/2018	04:18	32.9
11/09/2018	04:48	33.1
11/09/2018	05:18	33.1
11/09/2018	05:48	33.0
11/09/2018	06:18	32.9
promedio		33.03

Cp	0.700	kJ / kg °C
ma	2.800	kg
Ca	4.180	kJ / kg °C
Tfa	32.100	°c
Tia	28.200	°c
mm	0.960	kg
Tim	100.000	°c
Tfm	32.100	°c

Cp	0.743	kJ / kg °C
ma	2.800	kg
Ca	4.180	kJ / kg °C
Tfa	33.025	°c
Tia	28.900	°c
mm	0.970	kg
Tim	100.000	°c
Tfm	33.025	°c

P1 CPC	TERMOPAR SR630	
FECHA	HORA	TERMOPAR
11/09/2018	12:11	30.6
11/09/2018	12:41	32.0
11/09/2018	13:11	32.1
11/09/2018	13:41	32.2
11/09/2018	14:11	32.1
promedio		32.10

P2 CPC	TERMOPAR SR630	
FECHA	HORA	TERMOPAR
11/09/2018	03:18	31.2
11/09/2018	03:48	32.8
11/09/2018	04:18	32.9
11/09/2018	04:48	33.1
11/09/2018	05:18	33.1
11/09/2018	05:48	33.0
11/09/2018	06:18	32.9
promedio		33.03

Cp	0.782	kJ / kg °C
ma	2.800	kg
Ca	4.180	kJ / kg °C
Tfa	33.100	°c
Tia	28.900	°c
mm	0.940	kg
Tim	100.000	°c
Tfm	33.100	°c

Cp	0.728	kJ / kg °C
ma	2.800	kg
Ca	4.180	kJ / kg °C
Tfa	31.950	°c
Tia	28.100	°c
mm	0.910	kg
Tim	100.000	°c
Tfm	31.950	°c

P1 Pu 15%	TERMOPAR SR630	
FECHA	HORA	TERMOPAR
12/09/2018	08:47	31.3
12/09/2018	09:17	33.0
12/09/2018	09:47	33.0
12/09/2018	10:17	33.2
12/09/2018	10:47	33.1
12/09/2018	11:17	33.1
12/09/2018	11:47	33.0
promedio		33.10

P2 Pu 15%	TERMOPAR SR630	
FECHA	HORA	TERMOPAR
12/09/2018	12:13	30.2
12/09/2018	12:43	31.9
12/09/2018	13:13	31.9
12/09/2018	13:43	32.0
12/09/2018	14:13	32.0
promedio		31.95

Cp	0.738	kJ / kg °C
ma	2.800	kg
Ca	4.180	kJ / kg °C
Tfa	32.000	°c
Tia	28.100	°c
mm	0.910	kg
Tim	100.000	°c
Tfm	32.000	°c

Cp	0.767	kJ / kg °C
ma	2.800	kg
Ca	4.180	kJ / kg °C
Tfa	31.950	°c
Tia	27.800	°c
mm	0.930	kg
Tim	100.000	°c
Tfm	31.950	°c

P1 Pu 20%	TERMOPAR SR630	
FECHA	HORA	TERMOPAR
12/09/2018	02:42	29.9
12/09/2018	03:12	31.9
12/09/2018	03:42	32.0
12/09/2018	04:12	32.0
12/09/2018	04:42	32.1
12/09/2018		
12/09/2018		
promedio		32.00

P2 Pu 20%	TERMOPAR SR630	
FECHA	HORA	TERMOPAR
13/09/2018	09:29	29.6
13/09/2018	09:59	31.9
13/09/2018	10:29	31.9
13/09/2018	10:59	32.0
13/09/2018	11:29	32.0
13/09/2018		
13/09/2018		
promedio		31.95

Cp	0.769	kJ / kg °C
ma	2.800	kg
Ca	4.180	kJ / kg °C
Tfa	31.550	°c
Tia	27.500	°c
mm	0.900	kg
Tim	100.000	°c
Tfm	31.550	°c

Cp	0.823	kJ / kg °C
ma	2.800	kg
Ca	4.180	kJ / kg °C
Tfa	31.625	°c
Tia	27.200	°c
mm	0.920	kg
Tim	100.000	°c
Tfm	31.625	°c

P1 Pu 25%	TERMOPAR SR630	
FECHA	HORA	TERMOPAR
13/09/2018	11:57	29.8
13/09/2018	12:27	31.5
13/09/2018	12:57	31.6
13/09/2018	13:27	31.5
13/09/2018	13:57	31.6
13/09/2018		
13/09/2018		
promedio		31.55

P2 Pu 25%	TERMOPAR SR630	
FECHA	HORA	TERMOPAR
13/09/2018	02:22	29.5
13/09/2018	02:52	31.5
13/09/2018	03:22	31.6
13/09/2018	03:52	31.7
13/09/2018	04:22	31.7
13/09/2018		
13/09/2018		
promedio		31.63