

**CONACYT – CONAFOVI
FONDOS SECTORIALES**

INFORME TÉCNICO FINAL

ANEXO 1. Desarrollo de la investigación

Clave de Registro: 00236447

Título del proyecto: CARACTERIZACIÓN FÍSICO TÉRMICA DE MORTEROS ALTERNATIVOS PARA RECUBRIMIENTOS DE EDIFICACIONES CON AGREGADOS CALIZOS EN CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO

Responsable del proyecto o Coordinador General: Dr. Ing. José Antonio Domínguez Lepe.

Sujeto de Apoyo (Institución o Empresa): Instituto Tecnológico de Chetumal.

RESUMEN.

Los materiales que utilizamos en su gran mayoría han sido adoptados mediante un largo proceso de prueba y error, a través de múltiples circunstancias históricas y sociales. Se evaluaron las características físico-mecánicas y térmicas de morteros tradicionales más utilizados en la región sureste de México para recubrimientos de edificaciones, así como morteros alternativos, con adición de residuos, que demostraron tener viabilidad técnica para su uso como recubrimiento, utilizando agregados calizos en un clima cálido sub-húmedo. Este trabajo de investigación evaluó las propiedades físico-mecánicas y térmicas de 5 morteros tradicionales en proporción 1:3, 1:5, 1:1:3 y 1:1:5 así como el calcreto, que es un recubrimiento tradicional en azoteas originario de la península de Yucatán. A si mismo 5 morteros alternativos con sustitución parcial de agregado fino, polvo de caucho en un 30 %, polvo de PET en un 15%, ceniza de bagazo de caña en un 5% y mortero reforzado con fibras de polipropileno y esferas de poliestireno.

Se conoció la resistencia a la compresión, densidad, absorción, adherencia y conductividad térmica de cada mortero con las siguiendo las especificaciones de la norma correspondiente a cada caso, los cuáles se muestran en la sección de resultados.

1. Metodología General empleada

La metodología utilizada en este trabajo para evaluar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de morteros tradicionales y alternativos estuvo apegada a las normas mexicanas y las normas de la ASTM correspondiente a cada prueba y consistió en lo siguiente:

1.1.- Selección de materiales tradicionales y alternativos.

Con base a la literatura y conocimiento del medio, se seleccionaron los materiales tradicionales más usados y materiales alternativos más viables en morteros de recubrimiento para la envolvente de una edificación, resultando los siguientes:

Materiales tradicionales

Mortero 1:1:3

Mortero 1:3

Mortero 1:1:5

Mortero 1:5

Calcreto (1:3:7)

Materiales alternativos

Mortero con sustitución de agregado fino por polvo de caucho en un 30 %.

Mortero con sustitución de agregado fino por agregado fino de PET en un 15%.

Mortero con sustitución de agregado fino por agregado de ceniza de bagazo de caña en un 5%.

Mortero adicionado con fibras de polipropileno.

Mortero adicionado con esferas de poliestireno

1.2.- Diseño de los experimentos.

Las dimensiones y número de los especímenes ensayados se determinaron en función del tipo de prueba y las especificaciones de la norma correspondiente, que a continuación se explica:

- Resistencia a la compresión, y absorción. - cubos de mortero 50 mm por lado de acuerdo con la norma NMX-C-061-ONNCCE-2010 “Industria de la construcción – cementos hidráulicos – determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos”
- Conductividad térmica, calor específico y densidad. - Probetas de 152 x 127 mm \pm 2 de sección y de 25 mm \pm 2 de espesor, dimensiones que se ajustan a las características del conductímetro de placa caliente con guarda y de acuerdo con la norma 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”.
- Adherencia. – Probetas circulares de 34 mm cortadas en una muestra de mortero adherida a la pared y curada por 28 días, con 5.971 cm² de área de contacto paralela al plano de corte por arrancamiento.

1.3.- Caracterización de materiales.

La caracterización de los materiales consistió en el análisis granulométrico de los agregados y de los materiales alternativos, pruebas de absorción del agregado fino y pesos volumétrico del agregado fino tradicional así como de los materiales alternativos, datos que se consideran suficientes para el diseño de las mezclas.

1.4.- Elaboración de especímenes.

Se procedió a la preparación de las mezclas para morteros tradicionales y alternativos de acuerdo a la norma ASTM C 270 y habiendo cumplido la especificación de agregado fino para morteros por la norma ASTM C 144 y la norma NMX-C-061-ONNCCE-2010, se elaboraron los especímenes con las dimensiones mencionadas en el punto 2.

El proceso aplicado en la elaboración de especímenes consistió básicamente en la incorporación de agregados fino pétreo y aglomerantes en el caso de los morteros tradicionales. En el caso de los morteros alternativos se incorporó a la mezcla de mortero un componente inerte como son el caucho, el polvo de PET, las fibras de polipropileno, las esferas de poliestireno y la ceniza de bagazo de caña; seguido de un proceso de mezclado.

1.5.- Ensaye de especímenes.

En esta etapa se procedió a la realización de las pruebas de resistencia a la compresión, densidad, absorción, adherencia, conductividad térmica y calor específico de acuerdo con las especificaciones de la norma correspondiente a cada caso.

1.6.- Análisis e interpretación de resultados.

En esta etapa se clasificaron, ordenaron e interpretaron los resultados obtenidos en las pruebas realizadas. Con base en dicho análisis se formularon las conclusiones y las recomendaciones.

2. Desarrollo experimental

2.1. Resistencia a la compresión

De acuerdo con la norma NMX-C-061-ONNCCE-2010 "*Industria de la construcción – cementos hidráulicos – determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*", es necesario tener un mínimo de 3 valores en cada prueba para obtener un promedio.

Se aplicó la prueba a 9 cubos de mortero de 50mm por lado para cada mezcla estudiada con el fin de obtener un rango mayor de datos. La ruptura de los especímenes se realizó en forma aleatoria a las edades de 7, 14 y 28 días, posteriormente se determinó la resistencia a la compresión de cada mezcla tomando el promedio de sus resultados.

2.2. Absorción

Debido a que no se encontró alguna norma específica para determinar la absorción de cubos de mortero con materiales alternativos, se decide realizar dicha prueba de acuerdo con la norma NMX-C-164-ONNCCE-2002 "*Industria de la construcción - agregados - determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso*", considerando que la diferencia entre el peso saturado superficialmente seco y el peso seco es el peso ocupado por el agua de absorción.

Se elaboraron 9 cubos de mortero de 50mm para cada mezcla en estudio.

La prueba se efectuó a la edad de 28 días tomando los cubos en forma aleatoria, posteriormente se determinó el porcentaje de absorción con el promedio de sus resultados.

2.3. Adherencia

En la bibliografía consultada no se encontró alguna norma específica para pruebas de adherencia de morteros tradicionales y morteros con adición de materiales alternativos, por lo que se aplicó un mecanismo similar a un brazo de grúa, el cual propicio el efecto de arrancamiento de la probeta sobre la pared, así se determinó la capacidad de adherencia de cada uno de los morteros estudiados.

Se elaboraron 9 probetas por cada proporción, la prueba se efectuó a la edad de 28 días en forma aleatoria, posteriormente se calculó el esfuerzo ocasionado por la carga perpendicular al área de contacto, tomando como valor final el promedio de los resultados obtenidos para cada mezcla.

2.4. Densidad y calor específico

El estudio de la densidad y el calor específico se realizó a las probetas que posteriormente fueron utilizadas para determinar el coeficiente de conductividad térmica de las mezclas, siendo cuatro especímenes por tipo de mezcla.

En cada caso se obtuvo el valor para cada probeta, tomando como resultado final la mediana de los cuatro especímenes.

Los cálculos se efectuaron con base en las normas ASTM C 118 99 y ASTM C 351 92. *Standard Test Method for Mean Specific Heat of Thermal Insulation.*

2.5. Conductividad térmica

De acuerdo con las características del Conductímetro de placa caliente con guarda, para las pruebas de conductividad térmica se elaboraron cuatro 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.

3. Resultados

3.1 Caracterización de los materiales

Materiales: Los materiales a utilizados para la fabricación de los morteros estudiados en este trabajo, se describen a continuación:

- **Cemento:** Se utilizó cemento gris CPC 30R debido a que es el de mayor uso en el sureste de México, marca Maya, de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010, corresponde a Cemento Portland Compuesto de resistencia rápida de 204 kg/cm² desarrollada a los tres días y de 306 a 510 kg/cm² desarrollada a los 28 días. Posee una densidad de 3.05 g/cm³, y peso volumétrico de 1216.22 kg/m³.
- **Cal:** Se utilizó cal hidratada, debido a que es la de mayor uso en el sureste de México, marca Mitza, Posee un peso volumétrico de 640 kg/m³.
- **Polvo de piedra caliza de la Región:** El agregado fino utilizado es producto de piedra caliza triturada, de uso común en la región.
- **Materiales alternativos:**
 - Polvo de Caucho: Se utilizó polvo de caucho como sustituto del agregado fino en proporción de 30%. El polvo de caucho fue obtenido como resultado de la trituración de neumáticos procesado en la ciudad de Guadalajara, Jalisco.
 - Polvo de PET: Se utilizó polvo de PET como sustituto del agregado fino en proporción de 15%. El polvo de PET fue obtenido como resultado de la trituración de botellas de PET recicladas.
 - Ceniza de bagazo de caña: Se utilizó ceniza de bagazo de caña como sustituto de agregado fino en proporción de 5%. La ceniza de bagazo de caña fue obtenida como resultado de la combustión de bagazo de caña en las calderas del Ingenio San Rafael de Pucté, localizado en los ejidos de

Pucté y Álvaro Obregón, 63 km al sur de la ciudad de Chetumal, cerca de la frontera con Belice.

- Esferas de poliestireno: Se utilizaron esferas de poliestireno como adición en volumen total del mortero en proporción 50%. Las esferas de poliestireno fueron obtenidas de manera comercial.
- Fibras de polipropileno: Se utilizaron fibras de polipropileno como adición en 600 gr por metro cubico de mortero. Las fibras de polipropileno marca sika fueron obtenidas de manera comercial.

3.1.1 Análisis granulométrico del agregado.

Las muestras fueron obtenidas mediante cuarteo manual, de acuerdo con la norma NMX-C-170-1997-ONNCCE. Posteriormente utilizando mallas estándar (ASTM) números 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200 con fondo y tapa se efectuará el cribado mediante agitador eléctrico durante 10 minutos de acuerdo con la norma NMX-C-077-1997-ONNCCE “Industria de la construcción – Agregados para concreto – Análisis granulométrico – Método de prueba”.



Fig. 3.1 Reduccion de la muestra por cuarteo.



Fig. 3.2 Juego de mallas ASTM y agitador.

Los porcentajes de material retenido en las mallas durante el cribado del polvo de piedra, polvo de caucho y polvo de PET, se muestran en la tabla 3.1. Dichos porcentajes de material retenido cumplen con los límites granulométricos del agregado fino expresados en la norma ASTM C 144.

Tabla. 3.1 Análisis granulométrico.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO			
No. DE MALLA	% RETENIDO		
	POLVO DE PIEDRA	POLVO DE CAUCHO	POLVO DE PET
4	0	0	0
8	4.4	0	0
16	24.2	4.8	30.8
30	19	50.7	48.2
50	18.8	33	11.6
100	16.8	10.7	5.4
200	12.4	0.9	1.4
Módulo de finura	3.26	3.48	3.94

Las tablas 3.2 a 3.4 muestran los resultados del ensaye granulométrico del polvo de piedra, caucho y PET, con sus graficas correspondientes.

Tabla. 3.2 Porcentaje que pasa por las mallas: Polvo de piedra.

No. MALLA	% PASA
No.4	100.0
No.8	95.6
No.16	71.4
No.30	52.4
No.50	33.6
No.100	16.8
No.200	4.4

Fig. 3.1.- Curva granulométrica del polvo de piedra.

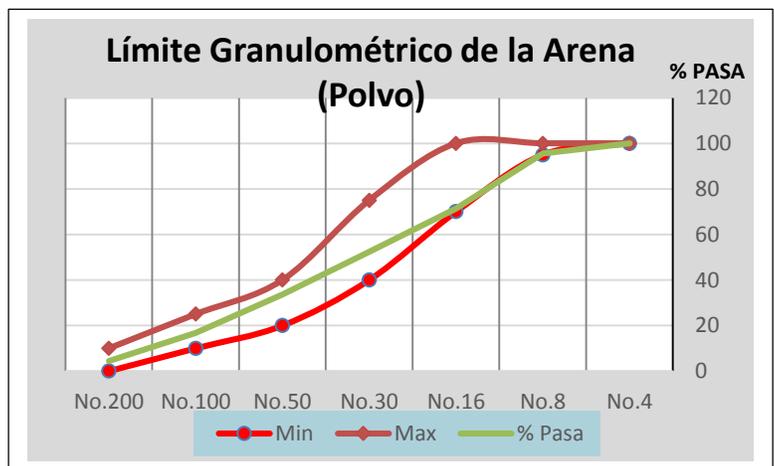


Tabla. 3.3 Porcentaje que pasa por las mallas: Polvo de caucho.

No. MALLA	% Pasa
No.4	100.0
No.8	100.0
No.16	95.2
No.30	44.5
No.50	11.5
No.100	0.9
No.200	0.0

Fig. 3.2.- Curva granulométrica del polvo de caucho.

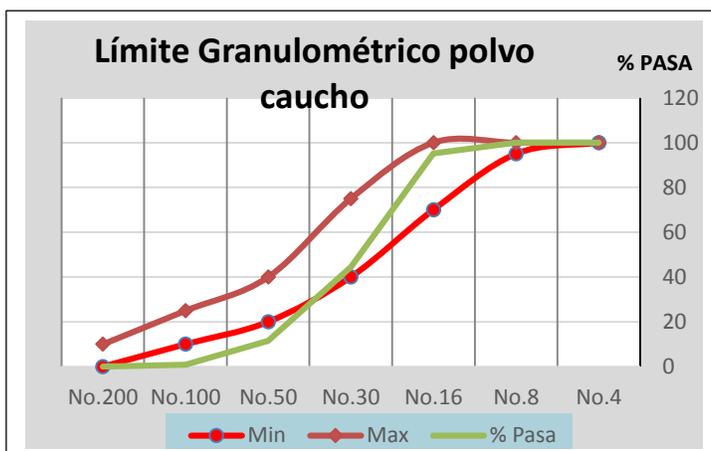
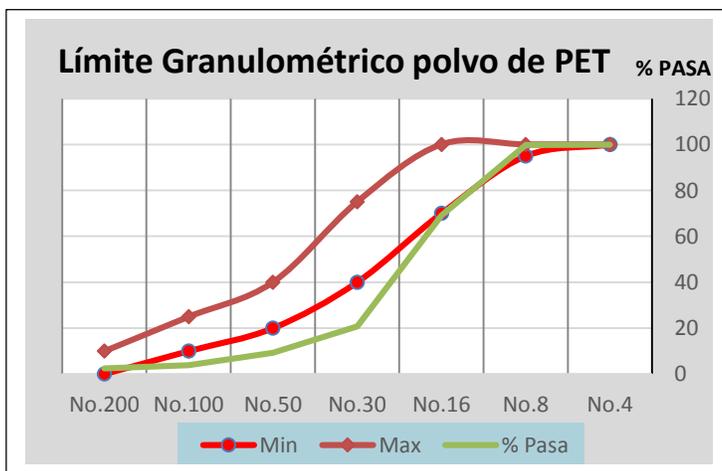


Tabla. 3.4 Porcentaje que pasa por las mallas: Polvo de PET.

No. MALLA	% Pasa
No.4	100.0
No.8	99.8
No.16	69.0
No.30	20.8
No.50	9.2
No.100	3.8
No.200	2.4

Fig. 3.3.- Curva granulométrica del polvo de PET



3.1.2 Peso volumétrico.

- Peso volumétrico seco suelto

Se pesó un recipiente de volumen conocido (fig. 3.4) y posteriormente empleando el cucharón se dejó caer dentro del recipiente el polvo de piedra desde una altura de 5 cm, hasta que se llenó, evitando el reacomodo del material por movimientos indebidos; después se procedió a enrasar.

Se pesó el recipiente contenido el material registrando dicho peso (fig. 3.5)



Fig. 3.4 Recipiente de volumen conocido.



Fig. 3.5 Obtención del peso de la muestra.

De igual manera se aplicó el mismo procedimiento para conocer el peso volumétrico de los demás materiales alternativos.

Se calculó el peso volumétrico del material seco y suelto, con la siguiente fórmula:

$$P.V.S.S. = \frac{W_m}{V_r} \quad (1)$$

Donde:

W_m = Peso del material = kg.

W_m = (Peso del recipiente + material.) – (Peso del recipiente.)

V_r = Volumen del recipiente = m^3

- **Peso volumétrico seco suelto**

Polvo de piedra:

$$P.V.S.S. = (11.116 - 3.953) \text{ Kg} / 0.00485 \text{ m}^3 = 1471.95 \text{ kg/m}^3$$

Polvo de caucho:

$$P.V.S.S. = (5.038 - 3.23) \text{ Kg} / 0.00502 \text{ m}^3 = 359.78 \text{ kg/m}^3$$

Polvo de PET:

$$P.V.S.S. = (5.043 - 3.235) \text{ Kg} / 0.005023 \text{ m}^3 = 359.95 \text{ kg/m}^3$$

Ceniza de bagazo de caña:

$$P.V.S.S. = (5.073 - 3.265) \text{ Kg} / 0.005043 \text{ m}^3 = 358.51 \text{ kg/m}^3$$

Esferas de poliestireno:

$$P.V.S.S. = (3.285 - 3.235) \text{ Kg} / 0.005023 \text{ m}^3 = 9.95 \text{ kg/m}^3$$

- **Peso volumétrico seco compacto**

Empleando el cucharón se tomó el material y se dejó caer dentro del recipiente desde una altura de 5cm, llenando el recipiente en 3 capas, dándole 25 golpes de varilla a cada capa, después se procedió a enrasar y pesar el recipiente conteniendo el material y se registró su peso.

Se calculó el peso volumétrico del material seco y compactado, con la fórmula:

$$P.V.S.C. = \frac{W_m}{V_r} \quad (2)$$

Dónde: W_m = Peso del material

$$W_m = (\text{Peso del recipiente} + \text{material}) - (\text{Peso del recipiente}) = \text{kg.}$$

$$V_r = \text{Volumen del recipiente} = \text{m}^3$$

Peso volumétrico seco y compacto

Polvo de piedra:

$$\text{P.V.S.C.} = (11.834 - 3.953) \text{ Kg} / 0.00485 \text{ m}^3 = 1624.94 \text{ kg/m}^3$$

Polvo de caucho:

$$\text{P.V.S.C.} = (5.465 - 3.23) \text{ Kg} / 0.00502 \text{ m}^3 = 444.67 \text{ kg/m}^3$$

Polvo de PET:

$$\text{P.V.S.C.} = (5.54 - 3.235) \text{ Kg} / 0.005023 \text{ m}^3 = 458.81 \text{ kg/m}^3$$

Ceniza de bagazo de caña:

$$\text{P.V.S.C.} = (5.338 - 3.265) \text{ Kg} / 0.005043 \text{ m}^3 = 411.05 \text{ kg/m}^3$$

Esferas de poliestireno:

$$\text{P.V.S.C.} = (3.29 - 3.235) \text{ Kg} / 0.005023 \text{ m}^3 = 10.94 \text{ kg/m}^3$$

3.1.3 Absorción

Se colocó una muestra de 1.2 kg de polvo de piedra en agua durante 24 hr a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, después de sumergió una muestra de 1 kg de polvo de piedra seco en agua durante 24 hr, seguidamente se escurrió el agua sobrante cuidando no tirar el material fino. Se extendió sobre una charola la cual fue puesta sobre una parrilla eléctrica, removiéndola frecuentemente a fin de que el exceso de agua se evaporara, hasta perder el agua superficial, como se encuentra en la figura 3.6.

Posteriormente se llenó el cono truncado y se compacto suavemente con el pisón, dando 25 golpes y dejando al ras del borde del molde.

Al retirar el molde se observó que el material se desmoronaba en los bordes, lo que indica que se encontraba superficialmente seco.

Se pesaron 500 gr del material superficialmente seco los cuales se introdujeron en el horno, a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, durante 24 horas.

Se calculó el porcentaje de absorción con la siguiente formula:

$$\text{Porcentaje de absorcion} = \frac{B-A}{A} * 100 \quad (3)$$

Donde:

A = Peso de la muestra seca (peso constante)

B = Peso de la muestra saturada (superficialmente seco)

Porcentaje de absorción = $(500-486.66/486.66) \text{ gr} = 0.0266 \times 100 = 2.74\%$



Fig. 3.5 muestra saturada y equipo utilizado.



Fig. 3.6 muestra saturada superficialmente seca.

3.2 Caracterización de los morteros

3.2.1. Diseño de mezclas

- **Dosificación en volumen**

El diseño de las mezclas se realizó con base en los resultados de la caracterización de materiales.

Conocidos los pesos volumétricos del agregado fino, del cemento, de la cal y los materiales alternativos, se procedió a calcular el peso de los componentes de cada mezcla considerando el volumen requerido para elaborar 12 cubos de 5 cm de lado para cada familia y tipo de mezcla propuesta, considerando desperdicio.

De allí:

$$V_m = 12 \times 0.05 \times 0.05 \times 0.05 = 0.0015 \text{ m}^3. \quad (4)$$

Para obtener el volumen de material alternativo en las mezclas respectivas, se multiplico el volumen de agregado por el porcentaje de sustitución correspondiente.

Para la proporción 1: 3 y considerando que cada volumen está compuesto por 4 partes, 1 de cemento y 3 de agregado, se calculó el volumen de cada componente de la siguiente manera:

$$V_{ce} = 0.0015 / 4 = 0.000375 \text{ m}^3 \quad (5)$$

$$V_a = 0.000375 * 3 = 0.001125 \text{ m}^3 \quad (6)$$

Donde:

V_{ce} = volumen de cemento

V_a = volumen del agregado

Para la proporción 1: 1: 3 y considerando que cada volumen está compuesto por 5 partes, 1 de cemento, 1 de cal y 3 de agregado, se calculó el volumen de cada componente de la siguiente manera:

$$V_{ce} = 0.0015 / 5 = 0.0003 \text{ m}^3 \quad (7)$$

$$V_{ca} = 0.0015 / 5 = 0.0003 \text{ m}^3 \quad (8)$$

$$V_a = 0.0003 * 3 = 0.0009 \text{ m}^3 \quad (9)$$

Donde:

V_{ce} = volumen de cemento

V_{ca} = volumen cal

V_a = volumen del agregado

Para la proporción 1: 5, 1:1:5 y calcreto (1: 3: 7) se siguió el mismo procedimiento, obteniendo los datos que se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Dosificación de las mezclas tradicionales en volumen.

MEZCLA	VOLUMEN (m ³)		
	CEMENTO	CAL	POLVO DE PIEDRA
1:3	0.000375	0.00	0.001125
1:5	0.000250	0.00	0.001250
1:1:3	0.000300	0.000300	0.000900
1:1:5	0.000214	0.000214	0.001070
CALCRETO 1:3:7	0.000114	0.000409	0.000955

Para obtener el volumen del polvo de caucho, del polvo de PET, polvo, de la ceniza de bagazo de caña, se multiplico el volumen de agregado por el porcentaje de sustitución correspondiente, obteniendo los datos que se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Dosificación de las mezclas alternativas en volumen por sustitución.

MEZCLA	VOLUMEN (m ³)		
	CEMENTO	POLVO DE PIEDRA	MATERIAL ALTERNATIVO
TESTIGO	0.000375	0.0011250	0.00
CAUCHO 30%	0.000375	0.000788	0.000338
POLVO DE PET 15%	0.000375	0.000956	0.000169
CENIZA BAGAZO DE CAÑA 5%	0.000375	0.001069	0.000056

Para obtener el volumen de las esferas de poliestireno y las fibras de polipropileno, se multiplico el volumen total del mortero por el porcentaje de adición correspondiente, obteniendo los datos que se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Dosificación de las mezclas alternativas en volumen por adición.

MEZCLA	VOLUMEN (m ³)			
	TOTAL MORTERO	CEMENTO	POLVO DE PIEDRA	MATERIAL ALTERNATIVO
TESTIGO	0.0015	0.000375	0.001125	0.00
ESFERAS POLIESTIRENO 50%	0.0015	0.000375	0.001125	0.000750
FIBRA POLIPROPILENO 0.15%	0.0015	0.000375	0.001125	0.000225

- **Dosificación en peso**

Ya conocidos los volúmenes, y conociendo el peso volumétrico de cada componente, se procedió a la dosificación de las mezclas en peso.

Para lo anterior, se procedió a multiplicar el volumen de cada componente por su peso volumétrico considerado en estado seco.

Los resultados se presentan en la tabla 3.8 y 3.9 en las cuales se incluye el peso del agua, la suficiente para obtener una fluidez de 110 +-5%.

Tabla 3.8 Dosificación de las mezclas tradicionales en peso.

MEZCLA	PESO kg			AGUA ml
	CEMENTO	CAL	ARENA	
1:3	0.456	0.00	1.655	440
1:5	0.304	0.00	1.839	520
1:1:3	0.410	0.216	1.490	495
1:1:5	0.293	0.154	1.774	453
CALCRETO 1:3:7	0.187	0.295	1.678	495
La suficiente para obtener una fluidez de 110 +-5 %				

Tabla 3.9 Dosificación de las mezclas alternativas en peso.

MEZCLA	PESO (kg)			AGUA ml
	CEMENTO	POLVO DE PIEDRA	MATERIAL ALTERNATIVO	
TESTIGO	0.456	1.6550000	0.00	440
CAUCHO 30%	0.456	1.159000	0.121000	440
POLVO DE PET 15%	0.456	0.000956	0.000169	420
CENIZA BAGAZO DE CAÑA 5%	0.456	0.001069	0.000056	440
ESFERAS POLIESTIRENO 50%	0.456	0.001125	0.000750	440
FIBRA POLIPROPILENO 0.15%	0.456	0.001125	0.000225	440
La suficiente para obtener una fluidez de 110 +-5 %				

3.2.2. Elaboración de especímenes.

Se procede a la preparación de las mezclas con sustitución del volumen de agregado fino por los diferentes materiales alternativos respectivamente para cada una de las pruebas de acuerdo con la norma NM X-C-061-0NNCCE-2010, y posteriormente se elaboraran los especímenes con las dimensiones mencionadas en el punto 2.

El procedimiento aplicado en la producción de las mezclas consiste básicamente en la incorporación a la mezcla de mortero de un componente inerte como el de materiales alternativos y que de acuerdo a la literatura resultaron viables.

Mezclado

El mezclado se realizó de acuerdo con la norma NMX-C-085-ONNCCE-2010 “Industria de la construcción – Cementos hidráulicos – Determinación estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos”.

Moldeado

El moldeado de las probetas se efectuó de acuerdo con la norma NMX-C-061-ONNCCE-2001.

Almacenamiento y curado

Luego de la colocación del mortero en los moldes, se mantuvo 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 un recipiente con agua para su curado, en el cual permanecieron hasta la fecha programada para realizar el ensayo de resistencia a la compresión (7, 14 y 28 días).

3.2.3. Ensaye de especímenes.

En esta etapa se procedió a la realización de los ensayos de resistencia a la compresión, densidad, absorción, adherencia, conductividad térmica y calor específico de acuerdo con las especificaciones de la norma correspondiente a cada caso. **POR SU EXTENSIÓN LOS RESULTADOS DEL CATÁLOGO Y SU RESPALDO, SE DAN EN ARCHIVOS ANEXOS DE EXCEL. (Específicamente en las fechas de los ensayos de conductividad térmica las fechas no son las reales por daños a la pila interna de la computadora integrada al APCG, (Fig.3.11).**

Previas a su colocación en el APCG, las probetas son medidas cuidadosamente en sus tres dimensiones y ranuradas para recibir los termopares.



FIGURA 3.11. Conductímetro de Placa Caliente Guardada.

Posteriormente las probetas se colocaron en el conductímetro con las placas de cobre entre ellas como se muestra en la figura 3.14, teniendo cuidado de lograr un buen contacto debido a que una de las placas está provista de una resistencia eléctrica (fig. 3.15) mediante la cual se proporciona calor en la cara interna de cada probeta, el flujo de calor va de la cara interna a la externa la cual está a su vez protegida por una placa de aluminio, una vez colocadas las probetas el conductímetro se selló con silicón para altas temperaturas y se dejó secar.



FIGURA 3.14. Probetas colocadas en el conductímetro



FIGURA 3.15. Placa de cobre.- suministro de calor.

El siguiente paso consistió en conectar los cuatro termopares de los especímenes a un monitor de termopares de 16 canales Stanford Research System modelo SR630

(fig. 3.16) mientras que a la resistencia eléctrica se le suministró calor a través de un variac hasta alcanzar un estado permanente, considerándose éste cuando las diferencias de temperaturas entre cuatro mediciones consecutivas con intervalos de quince minutos, no varían en más de 0.1 °C.



FIGURA 3.16. termopares conectados al monitor SR630

El proceso completo de la prueba de conductividad térmica incluye cuatro corridas para cada mezcla, la primera se realiza suministrando a la resistencia 20 volts durante 12 horas consecutivas y se apaga el equipo.

Para la segunda, tercera y cuarta corrida, se aumenta el voltaje cada 24 horas a 25 , 30 y 35 volts respectivamente.

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 monitorean con dos multímetros (fig. 3.17).



FIGURA 3.17. Equipo funcionando.- prueba de conductividad térmica

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

$$K=Q (L_1 + L_2) / 2 A (\Delta T_1 + \Delta T_2) \quad (8)$$

Donde

K= conductividad térmica (W/m °C)

Q= calor suministrado (W)

L₁, L₂= espesor de cada probeta (m)

A= área promedio de las probetas (m²)

ΔT₁, ΔT₂= diferencial de temperatura de cada probeta (°C)

En la tabla 3.10 se muestra un resumen de resultados, tanto físico mecánicos como de conductividad térmica de los morteros estudiados.

Tabla 3.10 Caracterización físico mecánica y térmica de morteros

MORTERO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²)	ABSORCIÓN (%)	ADHERENCIA (kg/cm ²)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA k=(W/m°C)
1:3	164.19	13.34	9.51	0.942
1:5	42.25	16.07	7.84	0.994
1:1:3	95.71	17.26	5.15	0.612
1:1:5	43.18	16.92	7.69	0.822
Calcreto (1:3:7)	20.72	18.84	4.18	0.775
Sustitución 30% caucho	69.78	14.72	8.34	1.225
Sustitución 5% ceniza bagazo caña	161.28	14.41	5.60	1.273
Sustitución 15% polvo de PET	140.24	14.85	8.27	1.166
Adición Fibras de Polipropileno (0.15%)	137.39	13.57	6.01	1.265
Adición de esferas de Poliestireno (50%)	54.50	15.38	4.88	0.596

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después del análisis de resultados se puede concluir que los materiales aquí estudiados y llamados *alternativos*, al ser mezclas adicionadas con diferentes tipos de residuos, sí reducen la conductividad térmica y por lo tanto se espera que reduzcan el consumo energético y mejoren la calidad ambiental de las viviendas y demás edificios donde sean usados en la región. De manera sucinta, podemos resumir que el mejor mortero para fines de mejorar el confort térmico resultó ser el

adicionado con esferas de poliestireno con $k=0.596 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, pero a cambio, sacrifica su capacidad de adherencia al solo alcanzar 4.88 kg/cm^2 . En segundo término se encuentran los morteros 1:1:3 y el calcreto 1:3:7, con $k= 0.612$ y 0.775 , esto se atribuye a la utilización de cal y disminución del volumen de agregado, pero a cambio se obtienen absorciones altas con 17.26 y 18.84% , siempre atribuible a la utilización de la cal.

Por otro lado, dadas las características térmicas encontradas, éstos no pueden ser considerados como aislantes térmicos (valores entre 0.1 y $0.4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), sino como “morteros mejorados” o como “pobres conductores”, ya que las adiciones utilizadas lo mejor que consiguen es reducir la conductividad, pero en ningún caso consiguen ser aislantes térmicos.

Después de realizar el análisis físico mecánico, no se recomienda aumentar los porcentajes de sustitución o adición de materiales producto de residuos como los aquí estudiados, debido a que si bien si existiría una ganancia en la reducción de la conductividad térmica, esta sería marginal comparada con la reducción de las cualidades de los morteros, sobre todo en cuanto a la resistencia a la compresión y adherencia se refiere.

Por último se recomienda seguir en busca de alternativas que si bien reduzcan la conductividad térmica y por lo tanto mejoren el confort higrotérmico en climas cálido-húmedos, no sacrifiquen la calidad o durabilidad de las envolventes. Una alternativa sería combinar estos “morteros mejorados” pero a través de un sistema de capas, combinándolos con placas de poliestireno o poliuretano, en las que se podría obtener lo mejor de ambos grupos de materiales.

Todo con la finalidad de seguir conociendo las características de los materiales empleados en la región y las propuestas que surjan y por lo tanto ampliando el catalogo inicial que aquí se presenta, que se espera sirva para mejorar la toma de decisiones en cuanto al uso de materiales para las envolventes en las edificaciones regionales.

5. BIBLIOGRAFIA DE APOYO Y REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ASTM C 351 92. Standard Test Method for Mean Specific Heat of Thermal Insulation.
2. 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.
3. Barrios, Guillermo. (2010) Selección de los materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas. Centro de investigación de energía, UNAM.
4. Barrios, Guillermo; Huelsz, Guadalupe; Rojas, Jorge. (2011). Herramienta Numérica para la Evaluación Térmica de la Envolvente de una Edificación. Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México, A. P. 34 Temixco Centro, Morelos, México.
5. Barrios, Guillermo; Huelsz, Guadalupe; Rojas, Jorge. (2013). Ener-Habitat: A cloud computing numerical tool to evaluate the thermal performance of walls/roofs. Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 34 Temixco Centro, 62580, Temixco, Mor. México.
6. Bojórquez I. (2005). Desarrollo de un nuevo material a base de Fibras Orgánicas del Sureste Mexicano en Matriz de cemento Portland para producir paneles ligeros. Tesis para obtener el Doctorado en Ciencias Técnicas. La Habana, Cuba.
7. Bojórquez, Inocente; Castillo, Set J.; Flores, Fernando; Hernández, José. (2010) Criterios para el diseño térmico de techumbres en climas cálido-húmedos, a partir de materiales locales. Revista de ingeniería de construcción.
8. Camargo Macedo, Pamela; Pereira, Adriana María; Akasaki, Jorge Luis; Floriti, Cesar Fabiano, Paya, Jordi; Pinheiro Melges, José Luis. (2014). Rendimiento de morteros producidos con la incorporación de ceniza de bagazo de caña de azúcar. Revista de ingeniería de construcción. Vol.29 No.2, PP. 187-199.
9. Catálogo de elementos constructivos del CTE. (2010) Instituto Eduardo Torroja De Ciencias De La Construcción. CEPCO. AICIA.

10. Díaz, H. (2009). Ahorro de energía a través de la geometría y de la orientación de las techumbres. Tesis Recepcional para obtener el grado de Ingeniero en Sistemas de Energía. Universidad de Quintana Roo. Chetumal.
11. Domínguez Lepe, José Antonio; Martínez Lobeck, Emilio; Villanueva Cuevas. (2004). Caracterización físico-química de agregados reciclados. Tecnología y Construcción. Vol. 20-I, 2004, pp. 23-29.
12. Huelsz, Guadalupe; Barrios, Guillermo; Rojas, Jorge. (2013). Differences on Results from Steady-state and Time-dependent Wall/roof Heat Transfer Models in Mexican Climates. Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 34 Temixco Centro, 62580, Temixco, Mor. México.
13. Esquivel Salazar, Miguel Isabel. (2013) Evaluación de las propiedades físicas y térmicas de morteros con adición de caucho en clima cálido subhúmedo. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Chetumal. México.
14. Espinoza Pérez, L.J y Escalante García, J.I. (2011). Morteros a base de vidrio de desecho/escoria de alto horno; activación mecano química del vidrio en soluciones alcalinas. Revista Científica Nexo. Vol.24, no. 02, pp. 92-103.
15. Ferrándiz Mas, V. y García Alcocer, E. (2012). Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS). Materiales de construcción. Publicado online, 1-II-12.
16. González Uh, Jhonatan. (2013) Evaluación de las resistencias mecánicas (compresión y cortante) de un mortero para aplanados con la sustitución parcial del agregado fino por PET. Tesis licenciatura. México.
17. Hincapié Henao, Ángela María y Aguja López, Elisa Andrea. (2003). Agregado reciclado para morteros. Universidad Eafit, vol.39, numero 132. Medellín, Colombia, pp.76-89.
18. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (2002). Terminología del Cemento y del Concreto ACI 116R-00. IMCYC. México.
19. Machado, María V. Brito, Celina. Neila, Javier. (2004). El cálculo de la conductividad térmica equivalente en la cubierta ecológica.

20. Moreno E. I., Varela-Rivera J., Solís-Carcaño R. Sánchez-Pech O. (2013) Efecto de las fibras poliméricas en la permeabilidad y características mecánicas del concreto con agregado calizo de alta absorción. Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 17, No. 3, ISSN 1665-529-X.
21. Morley, S. (1994). La Civilización Maya. Fondo de Cultura Económica. México.
22. Noriega Ramírez, Natalia. Hernández Paz, Juan Francisco. (2015) Fabricación y caracterización de nano partículas de sílice huecas para uso en aislantes térmicos mediante un análisis factorial. Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. México.
23. NMX-C-061-ONNCCE-2010 “Industria de la construcción – cementos hidráulicos – determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos”,
24. NMX-C-083-ONNCCE-2002.-“Industria de la construcción – concreto – determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto – método de prueba”
25. NMX-C-164-ONNCCE-2002. Industria de la construcción - agregados - determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso.
26. NMX-C-414-ONNCCE-2010. “Industria de la construcción -cementantes hidráulicos -especificaciones y métodos de ensayo.
27. Norma C-177- ASTM. Método estándar de prueba para las mediciones del flujo de calor en estado estable por medio del aparato de placa caliente protegida.
28. Norma Basoca de la edificación NBE-CT-79. Condiciones térmicas en los edificios.
29. Norma Oficial Mexicana NOM-018-ENER-2011. Aislantes térmicos para edificaciones, características, límites y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación.
30. Pérez Sánchez, María Milagrosa, Centeno Lara, Roberto. Lazcano Serrano, Fernando. (2012) Desarrollo de un prototipo para la caracterización térmica de los materiales de construcción regionales. UADY. México.

31. Santamarina, Rodrigo Emanuel. (2015). Caracterización de Material Compuesto PET - Vidrio. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
32. Uc Rivas, Francisco Alejandro. (2014) Evaluación preliminar de mortero con sustitución de PET pulverizado post uso como inhibidor de la corrosión. Tesis Licenciatura.
33. Oliver Ramírez, Alicia. (2009). Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Madrid. España.
34. Pedraza, Sandra P; Pineda, Yaneth; Gutiérrez, Oscar (2014). Influence of the unburned residues in fly ash additives on the mechanical properties of cement mortars. Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales INCITEMA, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sede Central, Tunja, Boyacá, Colombia.
35. Pérez Sánchez, María Milagrosa; Centeno Lara, Roberto y Serrano, Fernando Lazcano. (2002). Desarrollo de un prototipo para la caracterización térmica de los materiales de construcción regionales. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
36. Puc Ortiz, Lorena. (2009) Caracterización Térmica de Morteros Utilizados en Acabados de Viviendas en la Ciudad de Chetumal Quintana Roo.
37. Vargas, Zetola; García Santos, V.; Neila González, F. J. (2013). Mortero de cemento Portland con parafinas microencapsuladas. Revista de la Construcción, vol. 12, núm. 1, abril, 2013, pp. 75-86 Pontificia Universidad Católica de Chile Santiago, Chile.