



# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL**

**Caracterización físico-mecánica y térmica de  
materiales tradicionales y alternativos para la  
envolvente de una edificación**

Tesis que para obtener el Grado de:

**Maestro en Construcción**

Presenta:

**Ing. Gerardo Mendoza García**

Director:

**Dr. Ing. José Antonio Domínguez Lepe**

Chetumal, Quintana Roo, México, Marzo de 2018



DEPENDENCIA: DIRECCIÓN  
SECCIÓN: División de Estudios de Posgrado  
OFICIO No. W-060/2018

Chetumal, Q. Roo, 5 de marzo de 2018.

ASUNTO: Autorización de impresión.

**C. GERARDO MENDOZA GARCÍA**

De acuerdo a las Disposiciones para la Operación de Estudios de Posgrado de el Tecnológico Nacional de México, dependiente de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que el comité tutorial le hizo con respecto a su tesis titulada:

**“CARACTERIZACIÓN FÍSICO – MECÁNICA Y TÉRMICA DE MATERIALES TRADICIONALES Y ALTERNATIVOS PARA LA ENVOLVENTE DE UNA EDIFICACIÓN”**

La División a mi cargo le concede la autorización para que proceda a la impresión de la misma.

(R)  
**ATENTAMENTE**  
*“Cultura Ciencia y Tecnología para la superación de México”*  
  
**DRA. ALICIA CARRILLO BASTOS**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C.c.p. Departamento de Servicios Escolares.  
C.c.p. Minutario.  
ACB/gaby



## AGRADECIMIENTOS

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

A mis padres Emiliano Mendoza Palma y Valentina García Cruz por darme la vida y estar presentes a pesar de la distancia, su apoyo incondicional y cariño me mantuvieron a flote en los tiempos más difíciles.

A mi tío, Luis Baltazar Palma, quien no me alcanzara la vida para agradecerle todo su apoyo brindado a mi persona, cada uno de mis logros académicos son dedicados a usted. Gracias también a su esposa Josefina, sus atenciones fueron importantes.

A mi tía, Marcela Mendoza Palma, quien es como una segunda madre para mí, su amor, cariño y cuidado me impulsaron a nunca desistir, cada uno de los objetivos que me propuse, han sido logrados y han permitido el desarrollo de gran parte de mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, que me coadyuvo con el apoyo económico para la solvencia de esta investigación.

Agradezco especialmente a mi director de tesis, Dr. Ing. José Antonio Domínguez Lepe, por su apoyo incondicional para realizar este estudio, su experiencia, conocimiento y opiniones fueron de gran importancia para la culminación de este trabajo.

Así mismo, al Instituto Tecnológico de Chetumal, que me brindó la oportunidad de formarme profesionalmente en sus aulas y contar con el magnífico grupo de docentes, de los cuales adquirí los mejores atributos.

Mi más sincero agradecimiento a mis maestros: Dr. Julio Cesar Cruz Arguello, Dr. Felipe Jiménez Torres, Dr. Ricardo Enrique Vega Azamar y M.C. Alberto Yeladaqui Tello; gracias a todos por compartir sus conocimientos y por brindarme su apoyo y su amistad.

Agradezco especialmente a la Universidad de Quintana Roo, por facilitarme el espacio y equipos para la ejecución de las pruebas térmicas de la presente tesis, al Dr. Inocente Bojórquez Báez, Profesor-Investigador jubilado de la División de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Quintana Roo, por su apoyo desinteresado e incondicional para realizar las pruebas de conductividad térmica y calor específico en las instalaciones de Taller de Ingenierías de la UQROO.

Así como 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 Ing. Abraham Selem Buenfil, responsable del Laboratorio de Obras Civiles del Instituto Tecnológico de Chetumal, muchas gracias por el apoyo brindado durante las pruebas de adherencia.

De igual forma al Ing. Juan Luna Guerrero y al laboratorio de Supervisión de Obras Civiles en Control de Calidad de Materiales SOCCMA, por facilitar sus instalaciones y equipo para la prueba de fluidez de los morteros tradicionales.

A la Arq. Yahairy Estephani Ku Poot, por su apoyo incondicional durante todo el tiempo que duro la ejecución de este proyecto.

A mi residente, Br. Marisol Rodríguez Ramos y M.C. Jade Isel Álvarez Muñoz por su apoyo en la caracterización físico-mecánica de materiales tradicionales.

A mis compañeros de estudio: Ricardo, Carlos, Abraham, Alejandra, Jarely, Estefanía, Yuriko, Barbara, Leyla, Vianey, Efraín y Patsy; gracias por compartir todo este tiempo y por brindarme su amistad, que por cierto es ampliamente correspondida.

A mis amigas Angela, Alejandra, Cristian, Diana, Erika y Aylin por su apoyo incondicional y moral, gracias por su amistad.

Y 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.

CONTENIDO	página
AGRADECIMIENTOS	
CONTENIDO.....	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS	
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Planteamiento de la problemática.....	9
1.3 Marco teórico.....	10
1.4 Justificación.....	13
1.5 Objetivos.....	14
1.6 Metas.....	14
CAPITULO 2 DISEÑO DE LA INVESTIGACION	
2.1 Metodología.....	16
2.2 Diseño experimental.....	19
2.2.1 Resistencia a la compresión.....	20
2.2.2 Absorción.....	20
2.2.3 Adherencia.....	20
2.2.4 Densidad y calor específico.....	21
2.2.5 Conductividad térmica.....	21

## CAPITULO 3 TRABAJO DE LABORATORIO

3.1 Caracterización de los materiales.....	23
3.1.1 Análisis granulométrico del agregado.....	24
3.1.2 Peso volumétrico.....	26
3.1.3 Absorción.....	29
3.2 Diseño de mezclas.....	30
3.2.1 Dosificación en volumen.....	30
3.2.2 Dosificación en peso.....	33
3.2.3 Fluidez.....	33
3.3 Elaboración de especímenes.....	38
3.3.1 Mezclado.....	38
3.3.2 Moldeado.....	41
3.3.3 Almacenamiento y curado.....	43
3.4 Propiedades físico – mecánicas.....	44
3.4.1 Resistencia a la compresión.....	44
3.4.2 Absorción.....	44
3.4.3 Densidad.....	45
3.4.4 Adherencia.....	46
3.5 Propiedades térmicas.....	47
3.5.1 Conductividad térmica.....	47
3.5.2 Calor específico.....	51

## CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de incertidumbre.....	54
4.2 Propiedades físico-mecánicas.....	57
4.2.1 Resistencia a la compresión.....	57
4.2.2 Absorción.....	61
4.2.3 Densidad.....	62
4.2.4 Adherencia.....	63

4.3 Propiedades Térmicas.....	67
4.3.1 Conductividad térmica.....	67
4.3.2 Calor específico.....	68
4.4 Correlación entre conductividad térmica y calor específico.....	69
4.5 Correlación entre conductividad térmica y densidad.....	70
4.6 Correlación entre calor específico y densidad.....	71
4.7 Correlación entre absorción y resistencia a la compresión.....	71
4.8 Correlación entre absorción y adherencia.....	72
4.9 Catalogo de características físico-mecánicas y térmicas de materiales tradicionales y alternativos para la envolvente de una edificación.....	73
CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.....	74
RECOMENDACIONES.....	77
BIBLIOGRAFIA.....	78
ANEXOS.....	83

## Índice de tablas

Tabla 1.1 Conductividad térmica de morteros tradicionales (Puc, 2010).

Tabla 1.2 Resultados de las pruebas de conductividad térmica y calor específico (Esquivel, 2013).

Tabla 1.3. Investigaciones sobre materiales alternativos.

Tabla 2.1 Diseño experimental.

Tabla. 3.1 Datos obtenidos en el análisis granulométrico.

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

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

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

Tabla 3.5 Dosificación de las mezclas tradicionales en volumen.

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

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

Tabla 3.8 Cantidad de agua suficiente para obtener una fluidez de  $110 \pm 5\%$

Tabla 3.9 Dosificación de las mezclas tradicionales en peso.

Tabla 3.10 Dosificación de las mezclas alternativas en peso.

Tabla 4.1 Estimación de incertidumbre de la medición (calor suministrado, Watts).

Tabla 4.2 Estimación de incertidumbre de la medición (espesor, m).

Tabla 4.3 Espesor promedio y desviación estándar PET15.

Tabla 4.4 Estimación de incertidumbre de la medición (área, m<sup>2</sup>).

Tabla 4.5 Estimación de incertidumbre de la medición (diferencial temperatura, °C).

Tabla 4.6 Análisis de incertidumbre de conductividad térmica.

Tabla 4.7 Incertidumbre de pruebas físico-mecánicas.

Tabla 4.8 Resultados de la prueba de resistencia a la compresión.

Tabla 4.9 Resultados de las pruebas de conductividad térmica y calor específico.

Tabla 4.10 Catálogo de materiales tradicionales y alternativos.

Índice de figuras

Figura 3.1 Reducción de la muestra por cuarteo.

Figura 3.2 Juego de mallas ASTM y agitador.

Figura 3.3.- Curva granulométrica del polvo de piedra.

Figura 3.4.- Curva granulométrica del polvo de caucho.

Figura 3.5.- Curva granulométrica del polvo de PET.

Figura 3.6 Calibración recipiente.

Figura 3.7 Llenado en capas de la muestra

Figura 3.8 Evaporación muestra saturada.

Figura 3.9 Muestra saturada superficialmente seca.

Figura 3.10 Mesa de fluidez

Figura 3.11 Llenado en capas

Figura 3.12 Retiro de cono

Figura 3.13 Expansión del mortero

Figura 3.14 Medición cuatro diámetros

Figura 3.15 Mezclado del mortero.

Figura 3.16 Morteros tradicionales cemento-polvo de piedra y cemento-cal-polvo de piedra.

Figura 3.17 Morteros alternativos con diferentes porcentajes de sustitución de agregado fino y adición.

Figura 3.18 Molde para pruebas compresión.

Figura 3.19 Molde para pruebas conductividad térmica.

Figura 3.20 Aplicación de cera en las juntas.

Figura 3.21 Aplicación de aceite en los moldes.

Figura 3.22 Colocación de los morteros tradicionales y alternativos en los moldes.

Figura 3.23 Aplicación de recubrimiento.

Figura 3.24 Acabado final aplanado.

Figura 3.25 Señalización e identificación de las probetas.

Figura 3.26 Curado de las probetas.

Figura 3.27 Prensa para ensaye a compresión.

Figura 3.28 Ensayo resistencia a la compresión.

Figura 3.29 Secado, saturado y pesaje de probetas.

Figura 3.30 Mecanismo para prueba de adherencia.

Figura 3.31 Prueba de adherencia.

Figura 3.32 Anclaje probeta al mecanismo de adherencia.

Figura 3.33 Conductímetro de placa caliente con guarda.

Figura 3.34 Probetas morteros tradicionales y alternativos.

Figura 3.35 Probetas con termopares en las ranuras.

Figura 3.36 Colocación placas de cobre y aluminio.

Figura 3.37 Resistencia eléctrica.

Figura 3.38 Monitor SR630, variac y multímetros.

Figura 3.39 Respaldo de lecturas en el ordenador.

Figura 3.40 Calorímetro.

Figura 3.41 Espécimen hirviendo a 100 °C.

Figura 3.42 Ensaye calor específico.

Figura 4.1 Comportamiento de los especímenes a diferentes edades.

Figura 4.2 Resistencia a la compresión 28 días.

Figura 4.3.- Resultados de la prueba de absorción.

Figura 4.4.- Resultados de la prueba de densidad.

Figura 4.5 Prueba de adherencia, falla por carga perpendicular.

Figura 4.6.- Resultados de la prueba de adherencia a 28 días.

Figura 4.7.- Conductividad térmica.

Figura 4.8.- Calor específico.

Figura 4.9.- Correlación entre conductividad térmica y calor específico de los 10 materiales.

Figura 4.10.- Correlación entre conductividad y densidad de los 10 materiales.

Figura 4.11.- Correlación entre calor específico y densidad de los 10 materiales.

Figura 4.12.- Correlación entre absorción y resistencia a la compresión.

Figura 4.13.- Correlación entre absorción y adherencia.

## RESUMEN

En una edificación, la envolvente es el escudo que la protege de los rayos solares. En este trabajo se evaluaron las características físicas, mecánicas y térmicas de morteros tradicionales más utilizados en la región sur 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. Los morteros tradicionales con proporción 1:3, 1:5, 1:1:3, 1:1:5 y calcreto; así como 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 ensayaron especímenes para obtener la resistencia a la compresión, densidad, absorción y adherencia; así mismo conductividad térmica y calor específico de cada mortero con las especificaciones de la norma correspondiente a cada caso. Los resultados muestran que la mezcla 1:3 ofrece mayores condiciones mecánicas y las mezclas alternativas C30, PET15 y EPS50 presentan en forma general características físico-mecánicas y térmicas viables que le permitirán al diseñador y constructor generar modelos de vivienda sustentable con un mejor nivel de habitabilidad.

**Palabras clave: morteros, alternativos, adherencia.**

## **Abstract**

In a building, the envelope is the shield that protects it from the sun's rays. In this work the physical, mechanical, and thermal characteristics of traditional mortars most used in the southern region of Mexico for building coverings, as well as alternative mortars, with addition of residues, were evaluated, which proved to have technical feasibility for its use as a coating, using limestone aggregates in a sub-humid warm climate. Traditional mortars with a ratio of 1: 3, 1: 5, 1: 1: 3, 1: 1: 5 and calcrete; as well as alternative mortars with partial replacement of fine aggregate, rubber powder by 30%, PET powder by 15%, cane bagasse ash by 5% and mortar reinforced with polypropylene fibers and polystyrene spheres. Specimens were tested to obtain compressive strength, density, absorption, and adhesion; also, thermal conductivity and specific heat of each mortar with the specifications of the corresponding norm in each case. The results show that the 1: 3 mixture offers higher mechanical conditions and the alternative mixtures C30, PET15 and EPS50 present in a general way viable physical-mechanical and thermal characteristic that will allow the designer and builder to generate models of sustainable housing with a better level of habitability.

**Keywords: mortars, alternative, adhesion.**

## INTRODUCCIÓN

La mayor parte del tiempo las personas realizan las distintas actividades de la vida cotidiana en un edificio, por lo que es importante que el ambiente de los recintos donde habitualmente se trabaja, tenga condiciones óptimas para los usuarios Castilla, et.al., (2010).

En una edificación, la envolvente es el escudo que la protege de los rayos solares. De acuerdo con Díaz (2009), las techumbres son los mayores conductores térmicos hacia los espacios interiores; sin embargo, la conducción también se lleva a cabo a través de los muros, ventanas, puertas y pisos.

Para saber si los materiales son adecuados para la construcción de edificios y viviendas confortables y económicas en el aspecto energético, es necesario conocer las propiedades termo físicas de los materiales utilizados para su edificación (Pérez ,2002).

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.

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.

En el capítulo 1 se encuentran los fundamentos que dan pie al desarrollo del trabajo y se señalan objetivos y metas. Mientras que en el capítulo 2 se vierte el diseño de la investigación para lograr los objetivos y metas antes señalados.

En el capítulo 3 se explica el procedimiento para la caracterización de los materiales mediante las pruebas de laboratorio obteniendo datos de granulometría, módulo de finura y pesos volumétricos con los cuales se realizó la dosificación de los morteros tradicionales y alternativos con sustitución parcial de volumen de agregado fino.

Se elaboraron los especímenes y se realizaron los ensayos correspondientes obteniendo los valores de adherencia, absorción, densidad, conductividad térmica y calor específico a la edad de 28 días, mientras que la resistencia a compresión fue evaluada a 7, 14 y 28 días.

En el capítulo 4 se presenta el análisis de resultados obtenidos, con base en los cuales se formularon las conclusiones y recomendaciones.

**CAPITULO 1**  
**FUNDAMENTOS**

## 1.1.- Antecedentes

En la Península de Yucatán, la civilización maya fue la que comenzó a utilizar el mortero. Morley (1994), menciona que se utilizaba en las viviendas unifamiliares y también en las pirámides desde el periodo clásico tardío (600-900 d.C.).

En la región se utilizan comúnmente morteros: cemento-polvo, cemento- cal y cemento-cal-polvo. Estos juegan un papel fundamental en el flujo de calor hacia el interior de la vivienda o edificaciones ya que son los primeros en recibir los rayos solares antes que el bloque y, por consiguiente, la temperatura superficial de la cara exterior ( $T_e$ ) del sistema siempre es diferente a la temperatura superficial de la cara interior ( $T_i$ ) del elemento, Puc (2009).

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 el aceptado para considerar como termoaislante a un material tal como se muestra en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1.-** Conductividad térmica de morteros tradicionales (Puc, 2009).

MORTERO	CONDUCTIVIDAD TERMICA (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

La principal característica de un aislante térmico es su baja conductividad térmica (Noriega, et.al. ,2015).

Distintos estudios existen sobre el comportamiento físico, mecánico y químico de los morteros, como el realizado por el Instituto Americano del Concreto (ACI), que recomienda las relaciones del material cementante (cemento o cemento y cal) y la arena (ACI, 2002).

Bojórquez (2005) realizó estudios de conductividad térmica en materiales compuestos a base de matriz de cemento y refuerzo de fibras orgánicas, cuyos resultados de conductividad térmica fueron de 0.188 W/m°C, valor menor que el reportado para el bagazo-cemento de fabricación cubana: 0.340 W/m°C.

Oliver (2009) en su estudio somete placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno como un sistema constructivo, al realizar ensayos térmicos se observa una ventana térmica (rango de temperatura) de entre 18 y 30 °C, próximas a la temperatura de confort.

Bojórquez, et al., (2010) también realizaron estudios con diferentes materiales utilizados en la construcción de muros y recubrimientos estableciendo que, a menor volumen de polvo de piedra, la conductividad térmica del mortero cemento-polvo de piedra es menor, disminuyendo hasta en un 10% entre el mortero C-P 1:5 y el C-P 1:3.

Esquivel (2013) evalúa las propiedades físicas y térmicas del mortero cemento - polvo de piedra en proporción 1:3, con sustitución parcial del agregado fino por caucho triturado. De tal manera que al ser utilizado como recubrimiento de muros y plafones proporciona confort térmico al interior de las edificaciones.

**Tabla 1.2.-** Resultados de las pruebas de conductividad térmica y calor específico (Esquivel, 2013).

Mezclas	conductividad térmica (W/m°C)	calor específico (KJ/kg °C)
T	1.725	0.838
C30	1.244	0.945
C40	0.970	0.966
C50	0.686	0.957

Ferrándiz y García (2013), evalúan la influencia de la adición de poliestireno expandido, tanto comercial como procedente de reciclado, sobre la durabilidad de los morteros de cemento Portland. Concluyendo que la durabilidad de los morteros mejora con la presencia de poliestireno expandido, haciéndolos viables para un uso más sostenible en mampostería, estuco y morteros de yeso.

Aun así, se cuenta con muy poca información de las características térmicas de morteros alternativos fabricados con materiales locales y en nuestro clima cálido subhúmedo. Algunas investigaciones acerca de materiales alternativos para morteros de recubrimiento se presentan a continuación:

**Tabla 1.3.-** Investigaciones sobre materiales alternativos.

AUTOR/ PAIS/ AÑO	INVESTIGACION SOBRE:	METODOLOGIA UTILIZADA	RESULTADOS
Bojórquez, Inocente; Castillo, Set J.; Flores, Fernando; Hernández, José. México, 2010.	Criterios para el diseño térmico de techumbres en climas cálido- húmedos, a partir de materiales locales.	Calculo conductividad térmica ASTM-C- 518-91	Mortero 1:3, 1:1:3,1:5 y 1:1:5. $k=0.935$ W/m°C, $k=0.604$ W/m°C, $k=0.989$ W/m°C y $k=0.810$ W/m°C.
Ferrandiz-Mass, V.; Garcia-Alcolcel, E. España. 2012.	Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricados con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS).	Según norma: UNE- EN 196-1:2005, UNE-EN 1015- 3:2007 y UNE-EN 1015-10:2000.	EPSg 10%,30% 50% y 70% excelente trabajabilidad. $F'c= 26.8,19.7,27.6$ y $19.4$ N/mm <sup>2</sup> .
Moreno E. I., Varela- Rivera J., Solís-Carcaño R. Sánchez-Pech O. Mexico.2013	Efecto de las fibras poliméricas en la permeabilidad y características mecánicas del concreto con agregado calizo de alta absorción.	Calculo propiedades mecánicas, NMX-C- 83-2002, NMX-C- 163-1997 y NMX-C- 191-2004.	Compresión: $a/c=0.80$ y $a/c=0.62$ ; $f'c=182$ kg/cm <sup>2</sup> y $f'c=256$ kg/cm <sup>2</sup> ; $f't=17$ kg/cm <sup>2</sup> , $f't=24$ kg/cm <sup>2</sup> .
Benosman, Ahmed Soufiane; Mouli, Mohamed; Taibi, Hamed; Belbachir, Mohamed; Senhadji, Yassine; Bahloudi, Ilies; Houivet, David. Algeria.2013	Studies on Chemical Resistance of PET- Mortar Composites: Microstructure and Phase Composition Change.	Propiedades físicas pasta de mortero de acuerdo con EN 19-3 y EN 196-1. Resistencia química, ASTM C267-97.	Sustitución 0, 2.5, 5.0, 7.5 %. Densidad: 2.28, 2.23, 2.22, 2.21 g/cm <sup>3</sup> . Compresión 28 días: 41.6, 38.6, 36.6, 32.5 MPa. Decrecimiento de dimensiones por ataque químico probetas. 0.5%, 1%,1.5%.

Zetola Vargas, V.; García Santos, A.; Neila González, F. J. Chile. 2013	Mortero de cemento portland con parafinas microencapsuladas.	Calculo Flexión y compresión de acuerdo con la norma UNE EN 196-1	PCM 10%,15 y 20%. $f'c=20.7$ MPa, 19.1 MPa y 14.1 MPa.
Camargo Macedo, Pamela. Pereira, Adriana María. Akasaki Jorge Luis. Brazil.2014	Rendimiento de morteros producidos con la incorporación de ceniza de bagazo de caña de azúcar.	Evaluación mecánica: Según la norma NBR13279 y NBR7222.	Mortero CBC 3%,5%,8% y 10%; $f'c= 7, 6, 6.5$ y $6.4$ Mpa, 28 días.
Almeida, Fernando C.R; Sales, Almir; Moretti, Juliana P.; Mendes, Paulo C.D. Brazil.2014.	Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by- product for use in mortar.	Calculo según la norma ABNT NBR 7215:1996.	RM, SBAS 30 % y 50%: $f'c=$ $45.94$ MPa, $f'c= 46.27$ MPa y $f'c= 45.63$ MPa.
Ge, Zhi; Yue, Hongya; Sun, Renjuan. China.2015.	Properties of mortar produced with recycled clay brick aggregate and PET.	Calculo de acuerdo con la norma: ASTM C 109 y ASTM C 348.	Ratio 1:1,1:2 y 1:3. Highest compressive $42.5$ Mpa and flexural strength $12.6$ MPa.
Arif, Elisabet; Clark, Malcolm W.; Lake, Neal. Australia.2016.	Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co- generation boiler: Applications in cement and mortar production.	Según la norma: AS 3583.5 y AS 35836 - 1995.	CPOA, CP5%, CP10%, CP15% y CP20%. $f'c=57.7$ MPa, $56.2$ MPa, $50.3$ MPa, $50.3$ MPa y $41.3$ MPa.

<p>Rashad, Alaa M. Egipto. 2016</p>	<p>A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials.</p>	<p>Análisis de diversos estudios previos, la presencia de caucho residual como reemplazo parcial de agregado fino en mezclas tradicionales de morteros.</p>	<p>La arena de caucho reduce la trabajabilidad. Reduce densidad fresca y seca. Reduce fuerza mecánica. 50% energía de impacto mejorada. 20% mejor comportamiento de carga de impacto. Aumento de su ductibilidad. Aumento su contracción. Aumento resistencia a la abrasión en concreto. aumento de la resistencia a la congelación. aumento su porcentaje de absorción y porosidad. aumento de la penetración del ion cloruro. reducción de resistencia a la carbonatación. aumento de aislamiento térmico, absorción de sonido y resistencia eléctrica. redujo su resistencia al fuego.</p>
<p>Sofi, A. India. 2017</p>	<p>Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete- A review.</p>	<p>Evaluación de acuerdo con las normas: Indian Estándar (IS): 8112-1989, IS: 10262-2010. SEM.</p>	<p>Posible sustitución hasta 12.5 %, en diseño de concreto estructural. Reducción compresión a 28 días de 10 a 23%. Penetración de cloruros hasta 7.5%. absorción por ataque de ácido, incrementa gradualmente.</p>

## **1.2.- Planteamiento de la problemática**

La mayor parte del tiempo las personas realizan las distintas actividades de la vida cotidiana en un edificio, por lo que es importante que el ambiente de los recintos donde habitualmente se trabaja tenga condiciones óptimas para los usuarios Castilla, et.al. (2010).

En una edificación, la envolvente es el escudo que la protege de los rayos solares. De acuerdo con Díaz (2009), las techumbres son los mayores conductores térmicos hacia los espacios interiores; sin embargo, la conducción también se lleva a cabo a través de los muros, ventanas, puertas y pisos.

Para saber si los materiales son adecuados para la construcción de edificios y viviendas confortables y económicas en el aspecto energético, es necesario conocer las propiedades termo físicas de los materiales utilizados para su edificación (Pérez ,2002).

El diseño bioclimático requiere que los materiales que conforman la envolvente arquitectónica sean seleccionados de acuerdo con el clima de la localidad, de tal manera que estos logren mejorar el confort térmico al interior de la edificación sin la necesidad de hacer uso de los sistemas electromecánicos de acondicionamiento para el enfriamiento o calentamiento de la edificación (Barrios, 2010).

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 evaluará térmicamente materiales tradicionales y alternativos como recubrimiento para la envolvente de edificaciones. En la cual se realizarán en un inicio diferentes pruebas físicas y mecánicas para determinar si son viables técnicamente para su uso como recubrimiento y así proseguir a la determinación de su coeficiente de conductividad térmica.

## **1.3.- Marco teórico**

### **Mortero**

En su definición más general un mortero es toda mezcla plástica obtenida mediante la combinación de aglomerante + agregado fino + agua (y posibles aditivos), mismo que puede tener función estructural o no, dependiendo el uso al que sea destinado.

Por su origen, los morteros pueden ser premezclados en planta, premezclados secos o elaborados en obra.

En relación con su dosificación, se acostumbra mencionar a los morteros como una relación (1:3, 1:5, etc.), en la que normalmente se indican partes de aglomerante: agregado, sin embargo al no definir si se trata de volumen o masa, se incurre implícitamente en un error puesto que varios morteros con la misma relación 1: n, incluso con igual manejabilidad pueden alcanzar diferentes resistencias a la compresión a los 28 días debido fundamentalmente a la granulometría del agregado fino utilizado (Esquivel, 2013).

### **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.
- **Plasticidad:** Es la característica que define la manejabilidad o trabajabilidad del mortero. Depende de la consistencia de la mezcla, de la granulometría de la arena utilizada, de la cantidad de finos y del empleo de aditivos.
- **Retención de agua:** es de suma importancia debido a que evita la evaporación de agua al ambiente, reduciendo el potencial de grietas por cambios de volumen.

- Tamaño del agregado: El tamaño máximo del grano en el agregado determina la rugosidad de la superficie terminada.
- Adherencia: Es la capacidad del mortero para absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie cubierta. Una adherencia correcta impide que el mortero se despegue como consecuencia de variaciones dimensionales ocasionadas por agentes externos.

En el concreto fresco la adherencia se basa en las propiedades reológicas de la pasta de cemento. En el concreto endurecido depende de la superficie del soporte, su rugosidad, tratamiento con adherente químico y la granulometría de la arena utilizada.

### **Morteros compuestos (alternativos)**

Olivares et al., (2003) definen material compuesto como aquél constituido por dos o más componentes cuyas propiedades son superiores a las que tienen cada uno por separado, permaneciendo todos perfectamente identificables en la masa del elemento.

Fundamentalmente, lo que se entiende por material compuesto o “composite” es un material artificial integrado por fases diferentes y diferenciadas, cuyo mayor volumen lo ocupa su “fase matriz”, componente de no muy alta densidad, de naturaleza polimérica y sintética, en la mayoría de las preparaciones, que engloba una segunda fase, “fase de refuerzo”, compuesta a base de fibras (partículas o láminas), con resistencia (a tracción, compresión, rozamiento...) muy superior a la que posee la matriz. Las partículas, fibras o láminas, englobadas dentro de la matriz, actúan como armaduras o refuerzos de esta, pudiendo llegar a absorber la práctica totalidad de las cargas que se aplican al compuesto (Barbera,2006).

### **Envolvente**

La envolvente de un edificio es el conjunto de cerramientos exteriores de la edificación (piso, muros y techo) que protegen a los usuarios y sus actividades y pertenencias de la intemperie.

Una envolvente térmica es una envolvente con reducida transmisión del calor. Esto se logra por medio de la aplicación de “aislantes térmicos” que son materiales con una baja conducción de calor, y además de medidas que reducen las (in)filtraciones de aire y de humedad, hacia y por los elementos que conforman la envolvente.

Con la envolvente térmica 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 CO<sub>2</sub> 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.

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.

### **Relaciones básicas Sistema Internacional (SI)**

Unidades de calor:

1 kcal (kilocaloría) = 4.186 J (Julio) 1 J = 0.2389 x 10<sup>-3</sup> kcal

Unidad de flujo de calor (pérdidas o ganancias térmicas):

1 kcal/h = 1.163 W (vatio) 1W= 0.868 kcal/h

Coefficiente de conductividad térmica

Símbolo:  $\lambda$       Unidades: kcal/m h °C (W/m °C)

## **Método de placa caliente con guarda (Astm-C-177 o ISO 8302)**

Se miden materiales aislantes, la muestra es grande, el área de medición se calienta y se rodea de una guarda, controlada con termopares diferenciales, puede ser de uno o dos lados de medición. Es un método absoluto y su aplicación requiere flujo de calor unidimensional en estado permanente.

Medición de la temperatura de placas fría y caliente, el espesor de la muestra y el área de medición y el flujo de energía. Operan en condiciones ambientales, bajas temperaturas -180 °C y altas temperaturas 600 °C.

### **1.4.- Justificación**

El presente trabajo tiene como objeto cumplir una de las demandas requeridas por la nueva política de vivienda del país, específicamente en sustentabilidad, “Impacto en la salud del habitante, debido al diseño de la vivienda en los 4 principales climas de México, considerando los factores acústico, térmico, higrométrico y de calidad del aire “. CONAVI (2014).

Normalmente las viviendas están diseñadas conforme a preceptos económicos o espaciales y no se consideran otros elementos en su diseño, por lo que a veces las viviendas son demasiado frías o húmedas, poco ventiladas o muy calientes y ello repercute en problemas de salud de los habitantes, haciendo vulnerables a los adultos mayores y a los niños.

Ener-Hábitat es una herramienta numérica de computación en la nube, diseñada para evaluar el rendimiento térmico de paredes o techos de la envolvente de un edificio de cualquier ciudad de México, el usuario selecciona el periodo de tiempo, el tipo de sistema constructivo y la condición en la que se evalúa (Barrios, et al., 2014). De manera que al conocer los coeficientes de conductividad térmica de materiales tradicionales y alternativos permitirán realizar un mejor análisis y selección de sistemas constructivos que contribuyan a las condiciones de confort térmico en el interior de edificios.

## **1.5.- Objetivos**

### General

Evaluar las características físico-mecánica y térmica de morteros tradicionales y alternativos con adición de residuos, para ser utilizados como recubrimiento de edificaciones, utilizando agregado calizo en clima cálido sub-húmedo.

### Específicos

- Determinar con base a estudios anteriores de la región, cuáles son los morteros tradicionales más utilizados para recubrimiento de edificaciones.
- Determinar con base a estudios anteriores de la región, cuáles son los morteros alternativos, con adición de residuos, que han demostrado tener viabilidad técnica para su uso como recubrimiento de edificaciones.
- Caracterización físico- mecánica de morteros tradicionales y alternativos.
- Caracterización térmica de morteros tradicionales y alternativos.
- Elaborar un catálogo local de las características térmicas más importantes de morteros para recubrimientos tanto tradicionales como alternativos, para ser utilizados en la envolvente de las edificaciones.

## **1.6.- Metas.**

- Caracterización físico- mecánica y térmica de 5 morteros más utilizados en la región para acabados.
- Caracterización físico- mecánica y térmica de 5 materiales alternativos, que han demostrado viabilidad para ser utilizados como acabados en la región.
- Generar un catálogo local con las características físico-mecánicas y térmicas de materiales para recubrimiento de la región tanto tradicionales como alternativos.

**CAPITULO 2**  
**DISEÑO DE LA INVESTIGACION**

## **2.1.- Metodología**

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.- Selección de materiales tradicionales y alternativos.**

Con base a la literatura se seleccionaron los materiales tradicionales más usados y materiales alternativos más viables en morteros de recubrimiento para la envolvente de una edificación.

#### **Materiales tradicionales**

Mortero 1:1:3

Mortero 1:3

Mortero 1:1:5

Mortero 1:5

Calcreto

#### **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 reforzado con fibras de polipropileno, 600 gr por m<sup>3</sup>.

Mortero reforzado con esferas de poliestireno, adición 50 %.

## **2.- Selección de los especímenes.**

Las dimensiones 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 cm<sup>2</sup> de área de contacto paralela al plano de corte por arrancamiento.

## **3.- Caracterización de materiales.**

La caracterización de los materiales consiste en un análisis de mallas para la estandarización de la distribución de tamaño de partícula del agregado y de los materiales alternativos, prueba de absorción del polvo de piedra y peso volumétrico del agregado fino y de los materiales alternativos.

#### **4.- Elaboración de especímenes.**

Se procedió a la preparación de las mezclas para morteros tradicionales y alternativos de acuerdo con 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-144-ONNCCE que calcula el porcentaje de agua óptimo necesario para fabricar los cubos de mortero, la cantidad óptima de agua de mezclado deberá ser tal que produzca una fluidez de  $110 \pm 5\%$  y NMX-C-061-ONNCCE-2010 que señala la elaboración de los especímenes.

El proceso aplicado en la elaboración de especímenes consistió básicamente en la incorporación de agregados fino pétreo, aglomerantes y agua 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.

#### **5.- Ensaye de especímenes.**

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

#### **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.

## 2.2.- Diseño experimental

Tabla 2.1 Diseño experimental.

DISEÑO EXPERIMENTAL				
PRUEBA	MÍNIMO DE ESPECIMENES	PROPUESTA DE ESPECIMENES	MORTEROS	TOTAL
<b>Resistencia a la compresión</b> NMX-C-061-OONNCCE-2010 Cubos de 50 mm x 50 mm Edades 7,14 y 28 días	3	9	5 tradicionales	135
			5 alternativos	135
<b>Absorción</b> NMX-C-164-OONNCCE-2002 Cubos de 50 mm x 50 mm Edad 28 días	3	9	5 tradicionales	45
			5 alternativos	45
<b>Adherencia</b> Especímenes circulares, con 5.971 cm <sup>2</sup> de área de contacto por arrancamiento Edad 28 días	3	9	5 tradicionales	45
			5 alternativos	45
<b>Densidad y calor específico</b> ASTM C 118 99 y ASTM C 351 92 Probetas 152 x 127 mm de sección y 25 mm de espesor Edad 28 días	3	4	5 tradicionales	20
			5 alternativos	20
<b>Conductividad térmica</b> ASTM C 177 97 y ASTM C 518 98 Probetas 152 x 127 mm de sección y 25 mm de espesor. Edad 28 días	3	4	5 tradicionales	20
			5 alternativos	20

### **2.2.1.- 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.

### **2.2.2.- 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.

### **2.2.3.- 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 propició 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.

#### **2.2.4.- 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 la norma ASTM C 351 92. *Standard Test Method for Mean Specific Heat of Thermal Insulation.*

#### **2.2.5.- 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, tal como se explica en la sección 3.5.1.

Cabe señalar, que, para las pruebas de conductividad térmica, se probó cada material 2 veces por cada uno, para después de acuerdo con una media se obtenga un valor más preciso y que permita mayor confiabilidad con los resultados obtenidos.

**CAPITULO 3**  
**TRABAJO DE LABORATORIO**

### 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 utilizo cemento gris CPC 30R debido a que es el de mayor uso en el sureste de México, marca Maya, Portland tipo I clasificado como CPC 30 R que de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2010, corresponde a Cemento Portland Compuesto de resistencia rápida de 204 kg/cm<sup>2</sup> desarrollada a los tres días y de 306 a 510 kg/cm<sup>2</sup> desarrollada a los 28 días. Posee una densidad de 3.05 g/cm<sup>3</sup>, y peso volumétrico de 1216.22 kg/m<sup>3</sup>.
- **Cal:** Se utilizo cal hidratada, debido a que es la de mayor uso en el sureste de México, marca Mitza, Posee un peso volumétrico de 640 kg/m<sup>3</sup>.
- **Polvo de piedra caliza de la Región:** El agregado utilizado es polvo de piedra caliza triturada, por ser el agregado fino de uso común en la región. La muestra se obtuvo del banco de material del ejido Juan Sarabia (banco kilómetro 21), localizado en el kilómetro 0+252 de la carretera 186 Villahermosa-Chetumal.
- **Materiales alternativos:**
  - Polvo de Caucho: Se utilizo 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 utilizo 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 utilizo 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 utilizo 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 utilizo fibra de polipropileno como adición en 600 gr por metro cubico de mortero. Las fibras de polipropileno 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.-** Reducción 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 limites granulométricos del agregado fino expresados en la norma ASTM C 144.

**Tabla 3.1.-** Datos obtenidos en el análisis granulométrico.

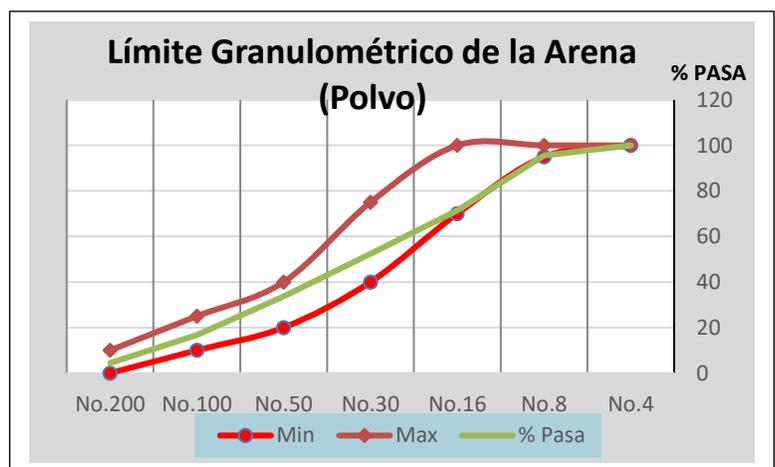
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO			
No. DE MALLA	% RETENIDO		
	POLVO DE PIEDRA	POLVO DE CAUCHO	POLVO DE PET
4	0	0	0
8	4.4	0	0
16	24.2	4.8	30.8
30	19	50.7	48.2
50	18.8	33	11.6
100	16.8	10.7	5.4
200	12.4	0.9	1.4
<b>Módulo de finura</b>	3.26	3.48	3.94

Las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 muestran los resultados obtenidos durante el cribado, los cuales permitieron construir las curvas granulométricas del polvo de piedra, caucho y PET.

**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

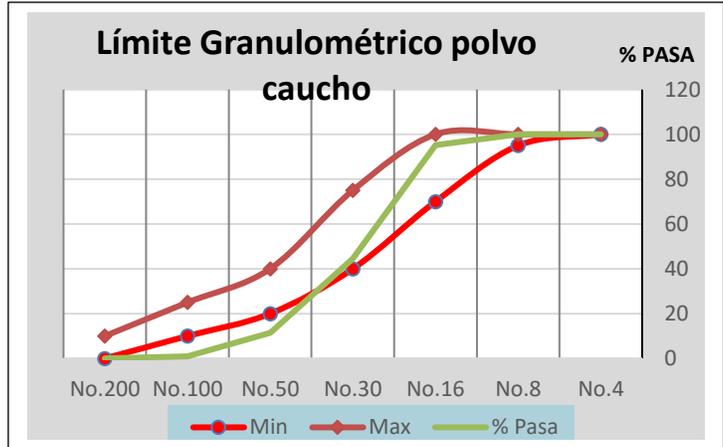
**Fig. 3.3.-** Curva granulométrica del polvo de piedra.



**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

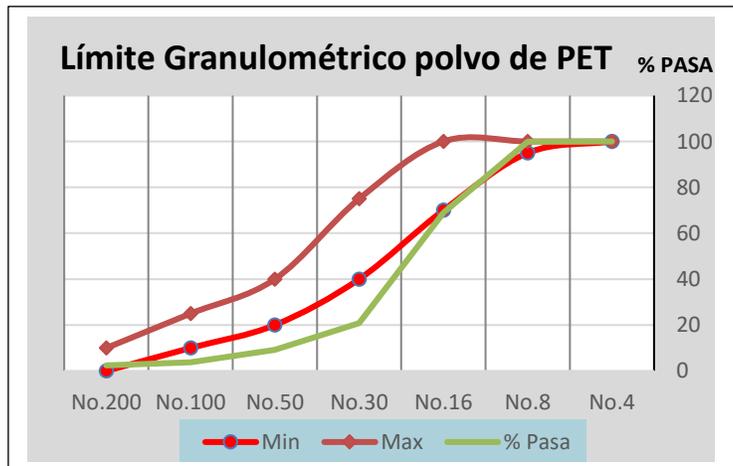
**Fig. 3.4.-** Curva granulométrica del polvo de caucho.



**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. 3.5.-** Curva granulométrica del polvo de PET



### 3.1.2.- Peso volumétrico.

- Peso volumétrico seco suelto

Se pesó un recipiente de volumen conocido (fig. 3.7) 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. 3.7)



**Fig. 3.6.-** Calibración recipiente.

**Fig. 3.7.-** Llenado en capas 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<sup>3</sup>

- **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 calculo el peso volumétrico del material seco y compactado, con la fórmula:

$$P.V.S.C. = \frac{Wm}{Vr} \quad (2)$$

Donde:  $Wm$  = Peso del material

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

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

Peso volumétrico seco y compacto

Polvo de piedra:

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

Polvo de caucho:

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

Polvo de PET:

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

Ceniza de bagazo de caña:

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

Esferas de poliestireno:

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

### **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 eléctrico, removiéndola frecuentemente a fin de que el exceso de agua se evaporara, hasta perder el agua superficial, como se encuentra en la figura 3.8.

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, como se encuentra en la figura 3.9.

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 calculo 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. 3.8** Evaporación muestra saturada.



**Fig. 3.9** Muestra saturada superficialmente seca.

## 3.2.- Diseño de mezclas

### 3.2.1.- 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.

Así mismo

$$V_m = 12 \times 0.5 \times 0.5 \times 0.5 = 0.0015 \text{ m}^3. \quad (4)$$

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:

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

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

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

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 <sup>3</sup>		
	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 <sup>3</sup>		
	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 m3			
	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

### 3.2.2.- 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 3.9 y 3.10 en las cuales se incluye el peso del agua, la suficiente para obtener una fluidez de 110 +-5%.

### 3.2.3.- Fluidez

Se colocó la mezcla en el molde sobre la mesa de fluidez (fig. 3.10), se realizó en dos capas aproximadamente de 25 mm de espesor, compactándolas por medio de la varilla con 20 golpes distribuidos (fig. 3.11), se enrasó el mortero excedente y posteriormente se tomó el tiempo de 60 segundos; se retiró el prisma truncado (fig. 3.12) y se hizo funcionar la mesa de fluidez dándole 25 golpes en 15 segundos, con

la ayuda de una regla se midieron 4 valores los cuales se promedian para obtener un único valor del diámetro, y así se estima la expansión de la base del mortero después de los golpes (fig. 3.13 y 3.14).



**Fig. 3.10.-** Mesa de fluidez.



**Fig. 3.11.-** Llenado en capas.



**Fig. 3.12.-** Retiro de cono.



**Fig. 3.13.-** Expansión del mortero.



**Fig. 3.14.-** Medición cuatro diámetros.

$$\% \text{ de fluidez} = \frac{(\text{Diámetro promedio} - \text{Diámetro inicial})}{\text{Diámetro inicial}} * 100 \quad (10)$$

Una vez obtenidos estos datos se calculó el porcentaje de fluidez de acuerdo con la ecuación 10, el ensayo se repitió 3 veces, eligiendo la que cumplía con la norma.

**Tabla 3.8.-** Cantidad de agua suficiente para obtener una fluidez de  $110 \pm 5\%$ .

Prueba de fluidez							
Mortero	# Ensaye	Diámetro inicial (cm)	Diámetro Final (cm)	Diámetro Promedio (cm)	DP -DI	Fluidez (%)	Agua (ml)
1:3	1	10	22	22.125	12.125	121.25	460
		10	21.5				
		10	22.5				
		10	22.5				
	2	10	21.7	21.55	11.55	115.5	440
		10	21.5				
		10	21.5				
		10	21.5				
	3	10	20.5	20.25	10.25	102.5	420
		10	20				
		10	20				
		10	20.5				
1:1:3	1	10	19	19.125	9.125	91.25	480
		10	19.5				
		10	19				
		10	19				
	2	10	23.5	22.65	12.65	126.5	525
		10	22.5				
		10	22				
		10	22.6				
	3	10	21	21.025	11.025	110.25	495
		10	21.4				
		10	21.2				
		10	20.5				
1:5	1	10	18.5	19	9	90	480
		10	18				
		10	19.5				
		10	20				
	2	10	20.5	20.75	10.75	107.5	520
		10	20.5				
		10	21				
		10	21				
	3	10	21	20.25	10.25	102.5	540
		10	21				
		10	19.5				
		10	19.5				

1:1:5	1	10	19	19	9	90	440
		10	19				
		10	19				
		10	19				
	2	10	22.5	22.5	12.5	125	466.6
		10	22.5				
		10	22.5				
		10	22.5				
	3	10	20	20.75	10.75	107.5	453.3
		10	21.5				
		10	20.5				
		10	21				
calcreto	1	10	20.5	20.625	10.625	106.25	480
		10	21				
		10	21				
		10	20				
	2	10	24.5	24.75	14.75	147.5	525
		10	25				
		10	25				
		10	24.5				
	3	10	21.5	21.375	11.375	113.75	495
		10	21.5				
		10	21.5				
		10	21				

La suficiente para obtener una fluidez de 110 +-5 %.

De acuerdo con la literatura las mezclas alternativas ya indicaban la cantidad de agua requerida para mezclado.

**Tabla 3.9.-** 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 3.10.-** 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 %				

### 3.3.- Elaboración de especímenes

#### 3.3.1.- Mezclado

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).



**Fig. 3.15.-** Mezclado del mortero.

Procedimiento de mezclado:

Se colocó toda el agua de mezcla en el recipiente, se añadió el aglomerante, ya sea cemento o cal, o ambos al agua; luego se mezcló a velocidad lenta durante 30 segundos, enseguida se adicionó la cantidad entera de agregado fino, lentamente durante un período de 30 segundos, mientras se mezcla a baja velocidad. Para el caso de morteros alternativos el polvo de caucho, el polvo de PET, la ceniza de bagazo de caña, las esferas de poliestireno y las fibras de polipropileno se añadieron luego de que se mezcló el cemento con el agua.

Una vez que se incorporaron todos los materiales al recipiente, se mezcló a velocidad media durante 30 segundos; posteriormente se dejó reposar la mezcla durante 90 segundos. Durante los primeros 15 segundos de este intervalo se raspó rápidamente cualquier mortero que pudo haberse adherido en el recipiente; luego durante el resto de esta fracción de tiempo, se cubrió el recipiente con un paño húmedo para luego terminar mezclando durante 60 segundos a velocidad alta.

En la fig. 3.16 se muestran los morteros tradicionales y en la fig. 3.17 se muestran los morteros alternativos.



**Fig. 3.16.-** Morteros tradicionales cemento-polvo de piedra y cemento-cal-polvo de piedra.



a) mortero con 30% caucho



b) mortero con 5% ceniza bagazo de caña



c) mortero con fibras de polipropileno



d) mortero con esferas de poliestireno



e) mortero con 15 % PET

**Fig. 3.17.-** Morteros alternativos con diferentes porcentajes de sustitución de agregado fino y adición.

### 3.3.2.- 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, como se muestra en la figura 3.18.

Para las pruebas de conductividad térmica se colocó los morteros tradicionales y alternativos en moldes con cavidades de 152 x 127 mm +- 2 de sección y de 25 mm +- 2 de espesor, como se muestra en la figura 3.19.



**Fig. 3.18.-** Molde para pruebas compresión. **Fig. 3.19.-** Molde para pruebas conductividad térmica.

Dichos moldes fueron cubiertos previamente con aceite para que el desmolde de las probetas fuesen más prácticos 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, como se muestra en la figura 3.20 y 3.21.



**Fig. 3.20.-** Aplicación de cera en las juntas.

**Fig. 3.21.-** Aplicación de aceite en los moldes.

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 se enrasó con una regla el exceso de mortero, como se muestra en la figura 3.22.



**Fig. 3.22.-** Colocación de los morteros tradicionales y alternativos en los moldes.

La prueba de adherencia requirió un aplanado de 450 x 50 mm de área y de 20 mm $\pm$ 2 de espesor. Previamente en la pared donde se aplicó el aplanado, se saturó con agua para evitar la pérdida acelerada de agua del mortero y causara grietas por contracción plástica. Se aplicó el aplanado de forma manual y se le proporcionó el acabado con una llana de esponja, como se muestra en las figuras 3.23 y 3.24.



**Fig. 3.23.-** Aplicación de recubrimiento.



**Fig. 3.24.-** Acabado final aplanado.

### 3.3.3.- 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 una pileta con agua y cal, en la cual permanecieron hasta la fecha programada para realizar el ensayo de resistencia a la compresión (7, 14 y 28 días), absorción y densidad (28 días). Así mismo las probetas para el ensayo de conductividad térmica y calor específico (28 días).



**Fig. 3.25.-** Señalización e identificación de las probetas.



**Fig. 3.26.-** Curado de las probetas.

Para el ensayo de adherencia, el aplanado se cubrió con una membrana plástica, a fin de evitar la evaporación acelerada de agua del mortero. Se aplicó agua directamente sobre el recubrimiento 2 veces al día, manteniendo hidratado los morteros durante 28 días.

### 3.4.- Propiedades físico – mecánicas

#### 3.4.1.- Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó de acuerdo con la norma NMX-C – 061 – ONNCCE – 2010, en una prensa hidráulica eléctrica digital para ensaye a la compresión, con cilindro de regresión automática y bomba de regulador variable de flujo, con capacidad de 25 toneladas (fig.3.27).

Los cubos de mortero estuvieron sumergidos en agua hasta el momento de su ensayo, se retiraron del recipiente y se secó el exceso de agua de la probeta con la ayuda de un paño absorbente, cuando la probeta ya no brillaba superficialmente se procedió a determinar su capacidad de resistencia a la compresión (fig.3.28).



**Fig. 3.27.-** Prensa para ensayo a compresión.    **Fig. 3.28.-** Ensayo resistencia a la compresión.

#### 3.4.2.- Absorción

Para esta prueba se utilizó un horno para secado de muestras a una temperatura constante de 110 °C durante 24 horas, se enfrió a temperatura ambiente durante 2 horas para facilitar su manejo, posteriormente se sumergieron los cubos de mortero en agua durante 24 horas.

Cumplido el tiempo especificado se retiraron los cubos, se dejaron secar y se registraron los pesos en estado saturado, superficialmente seco, se secaron de nuevo en el horno a 110 °C hasta obtener un peso seco constante en tres ocasiones

consecutivas, con esos datos se calculó la absorción de cada mezcla elaborada, de acuerdo con lo establecido en la norma NMX-C-164-ONNCCE-2002.



Fig. 3.29.- Secado, saturado y pesaje de probetas.

### 3.4.3.- Densidad

La densidad se determinó con el siguiente procedimiento:

Las probetas se midieron para calcular su volumen, posteriormente se pesaron para obtener su masa, una vez conocidos estos valores se procedió a su secado en un horno industrial a 110 °C durante 24 horas, cumpliendo el tiempo de secado se retiraron del horno y se determinó su masa durante varios días hasta que el dato de la masa se repitió en tres ocasiones seguidas.

El cálculo de la densidad se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 118 99 por medio de la ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (11)$$

Donde

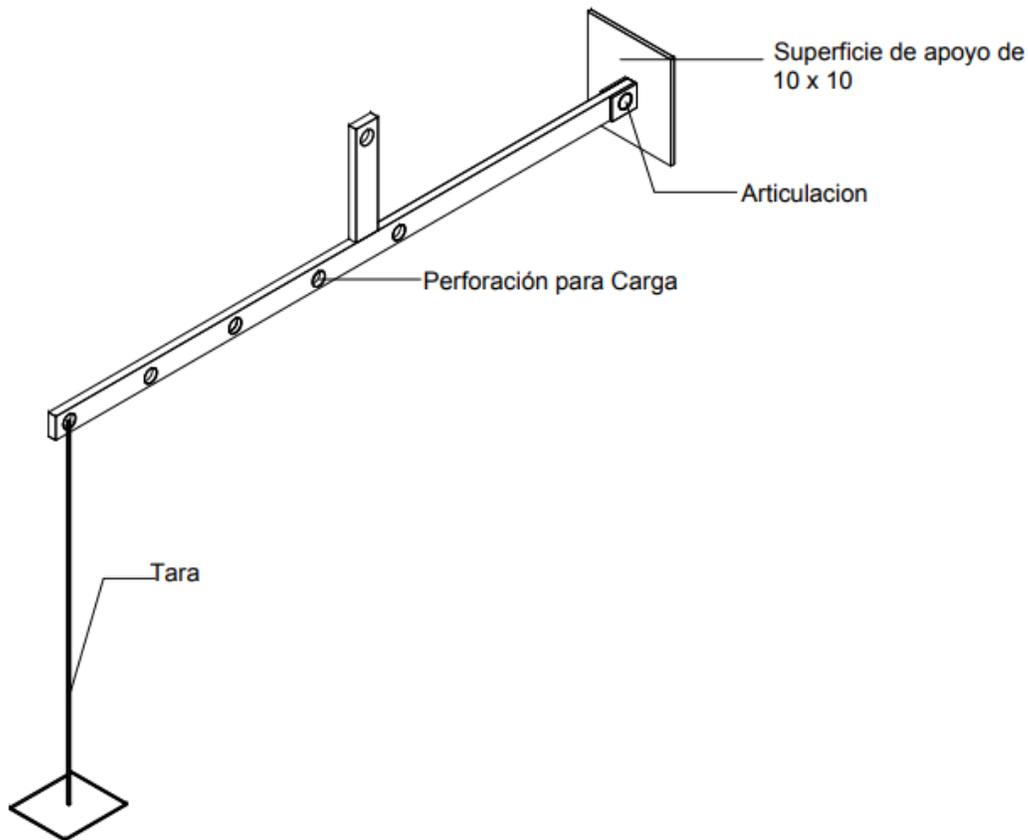
$\rho$  = densidad (gr/cm<sup>3</sup>)

m = masa (gr)

v = volumen (cm<sup>3</sup>)

### 3.4.4.- Adherencia

Los ensayos de adherencia se realizaron aplicando carga a los especímenes, con la ayuda de un mecanismo perpendicular a la probeta de ensaye.



**Fig.3.30.-** Mecanismo para prueba de adherencia.

Una placa de metal es unida al área de la probeta circular con pegamento epóxico. La placa de metal es anclada al mecanismo el cual fue diseñado para soportar cargas en el extremo, el mecanismo genera un momento y esta fuerza da como resultado dos reacciones en  $R_y$  y en  $R_x$ . Conociendo la reacción en “y”, se calculó el esfuerzo generado en el área de contacto de la probeta y el muro, así se obtuvo la resistencia de adherencia.



**Fig. 3.31.-** Prueba de adherencia.

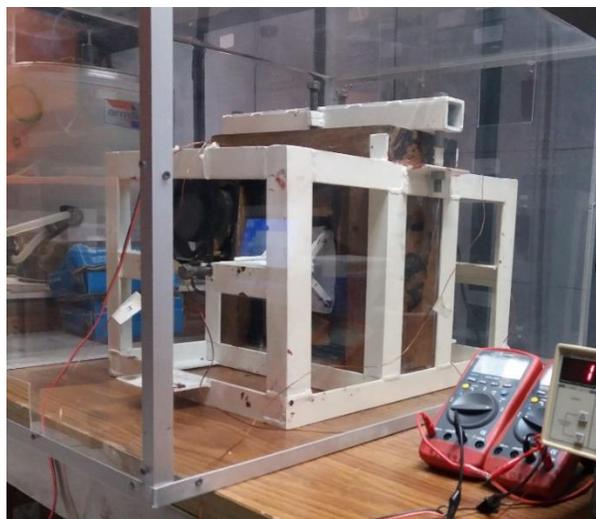


**Fig. 3.32.-** Anclaje probeta al mecanismo de adherencia.

## **3.5.- Propiedades térmicas**

### **3.5.1.- Conductividad Térmica**

Para el estudio de conductividad térmica, se utilizó un conductímetro de placa caliente con guarda (fig.3.33), fabricado en el laboratorio de Ingeniería en Sistemas de Energía de la Universidad de Quintana Roo de acuerdo con la norma ASTM C 177 97.



**Fig. 3.33.-** Conductímetro de placa caliente con guarda.

El procedimiento se llevó a cabo con base a 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 (fig. 3.34), con los morteros tradicionales y alternativos utilizados en las pruebas físico-mecánicas en las siguientes proporciones: cemento-polvo de piedra 1:3 y 1:5, cemento-cal-polvo de piedra 1:1:3 y 1:1:5, y calcreto; mortero con sustitución de polvo de piedra por 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.



**Fig. 3.34.-** Probetas morteros tradicionales y alternativos.

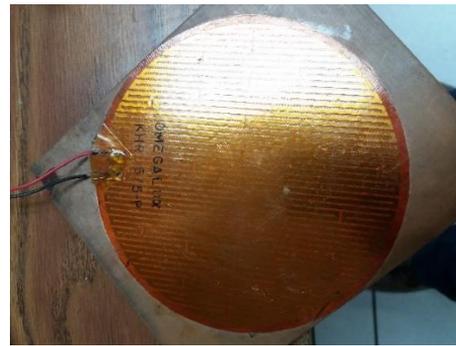
El procedimiento fue el siguiente:

Paso 1: Para cada prueba se utilizaron dos probetas a las que se les hizo una ranura de 7.6 cm de largo por 5mm de profundidad en la parte central de cada cara, en cada ranura se colocó un termopar el cual fue cubierto con silicón para altas temperaturas, se dejó secar para facilitar su colocación en el equipo de conductividad térmica (fig.3.35).



**Fig. 3.35.-** Probetas con termopares en las ranuras.

Paso 2: Se colocaron los dos especímenes dentro del conductímetro, colocando entre las probetas las placas de cobre, como se muestra en la figura 3.36, teniendo cuidado de lograr un buen contacto entre ambas caras interiores de las probetas y las placas de cobre, debido a que una de las placas esta provista de una resistencia eléctrica (fig. 3.37) 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 cara exterior de la probeta está protegida por una placa de aluminio, una vez colocadas las probetas en el conductímetro se selló con silicón para altas temperaturas y se dejó secar.



**Fig. 3.36.-** Colocación placas de cobre y aluminio.      **Fig. 3.37.-** Resistencia eléctrica.

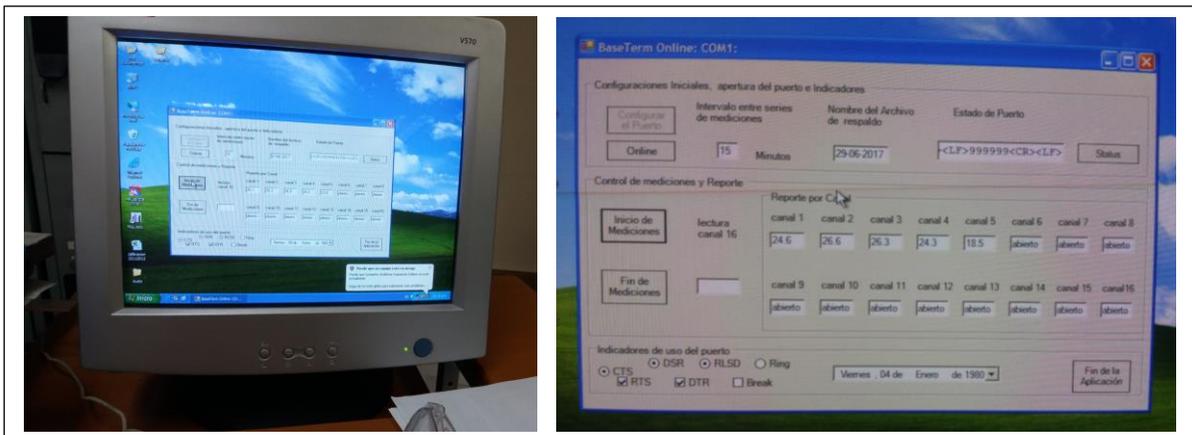
Paso 3: Se conectaron los cuatro termopares de los especímenes a un monitor de termopares de 16 canales Stanford Research System modelo SR630 (fig. 3.38), mientras que a la resistencia eléctrica se le suministro calor a través de un variac hasta alcanzar un estado permanente, considerándose este cuando las diferencias de temperaturas entre cuatro mediciones consecutivas con intervalos de quince minutos no varían en más de 0.1 °C.



**Fig. 3.38.-** Monitor SR630, variac y multímetros.

El proceso completo de la prueba de conductividad térmica incluye cuatro corridas para cada par de probetas, la primera se realiza suministrando a la resistencia 20 volts durante 12 horas consecutivas y se apaga el equipo. 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 monitorea con dos multímetros (fig. 3.39).



**Fig.3.39.-** Respaldo de lecturas en el ordenador.

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

$$K = \frac{Q(L_1+L_2)}{2 A(\Delta T_1+\Delta T_2)} \quad (12)$$

Donde:

K = conductividad térmica (W/m °C)

Q= calor suministrado (W)

L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> = espesor de cada probeta (m)

A= área promedio de las probetas (m<sup>2</sup>)

ΔT<sub>1</sub>, ΔT<sub>2</sub> = diferencial de temperatura de cada probeta (°C)

### 3.5.2.- Calor Especifico (Cp)

La prueba de calor específico se realizó para completar la información respecto de las propiedades térmicas primarias de los morteros. Para determinar el valor del calor específico se utilizó un calorímetro (fig. 3.40) y el procedimiento se pegó a la norma ASTM 351 92.



**Fig. 3.40.-** Calorímetro.

Se obtiene la masa del espécimen, se depositan 2.5 litros de agua en el calorímetro y se toma la temperatura inicial de esta. Por otra parte, en agua hirviendo (100 °C) se introduce el espécimen por un tiempo de 10 minutos y posteriormente se introduce en el calorímetro, una vez realizado el equilibrio térmico se toma la temperatura final y a continuación se obtiene de nuevo la masa del espécimen.



**Fig. 3.41.-** Espécimen hirviendo a 100 °C.



**Fig. 3.42.-** Ensaye calor específico.

El cálculo de calor específico se llevó a cabo bajo la norma ASTM 351 92 de acuerdo con la ecuación:

$$C_p = m_a C_a (T_{fa} - T_{ia}) / m_m (T_{im} - T_{fm}) \quad ( 13 )$$

Donde:

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

$m_m$  = 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)

**CAPITULO 4**  
**ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## 4.1.- Análisis de incertidumbre

- **Conductividad térmica**

En el Centro Nacional de Metrología (CENAM) se desarrolló un instrumento primario para medir la conductividad de materiales sólidos aislantes. El instrumento es denominado Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG), que es el Patrón Nacional de Conductividad Térmica de Materiales Sólidos Aislantes,  $\lambda=0.03$  a  $0.17$  W/mK La evaluación de incertidumbre se basó en la metodología proporcionada en el curso “Medición de conductividad térmica en materiales sólidos”, impartido por el CENAM (2017).

$$\lambda = \frac{q L}{A \Delta T} \quad (14)$$

$$\frac{u\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left[\frac{uq}{q}\right]^2 + \left[\frac{uL}{L}\right]^2 + \left[\frac{uA}{A}\right]^2} \quad (15)$$

Análisis de incertidumbre con un mortero PET15.

**Tabla 4.1.-** Estimación de incertidumbre de la medición (calor suministrado, Watts).

$\frac{uq}{q} = \sqrt{\left[\frac{uv}{v}\right]^2 + \left[\frac{ui}{I}\right]^2}$	Variable	Valor exp.	u tipo A	u tipo B	u total	u relativa
	V/Volt	27.78	0.0118	0.0006	0.0119	0.000427
	I/Ampere	0.219	0.00026	0.00003	0.0002614	0.001191
	q/Watt	6.083				0.0012653

u tipo A: Desviación estándar de los datos experimentales.

u tipo B: Del certificado de calibración.

$$u \text{ total} = \sqrt{[u \text{ tipo A}]^2 + [u \text{ tipo B}]^2} \quad (16)$$

$$u \text{ relativa} = u \text{ total} / \text{Valor experimental} \quad (17)$$

**Tabla 4.2.-** Estimación de incertidumbre de la medición (espesor, m).

$\frac{uL}{L}$	Variable	Valor exp.	$u$ tipo A	$u$ tipo B	$u$ total	$u$ relativa
		L/m	0.0255	0.0002819	0.00002	0.0002826

$u$  tipo A: Desviación estándar de los datos experimentales.

$u$  tipo B: Del certificado de calibración.

$$u_{total} = \sqrt{[u_{tipo A}]^2 + [u_{tipo B}]^2} \quad (17)$$

$$u_{relativa} = u_{total} / \text{Valor experimental} \quad (18)$$

**Tabla. 4.3.-** Espesor promedio y desviación estándar PET15.

Espesor mortero 15%PET (m)			
Probeta1	Probeta2	0.0255	<b>Promedio</b>
0.02542	0.02544		
0.0253	0.0256		
0.02542	0.0256		
0.0258	0.0253		
0.025	0.02564		
0.02522	0.02628		
0.0256	0.0254		
0.0256	0.0255		

**Tabla 4.4.-** Estimación de incertidumbre de la medición (área, m<sup>2</sup>).

$\frac{uA}{A}$	Variable	Valor exp.	$u$ tipo A	$u$ tipo B	$u$ total	$u$ relativa
	L	0.152	0.00048	0.00002	0.00048	0.0032
	A	0.1273	0.0008	0.00002	0.0008	0.006
	A/m <sup>2</sup>	0.0194				0.006725

**Tabla 4.5.-** Estimación de incertidumbre de la medición (diferencial temperatura, °C).

$\frac{u\Delta T}{\Delta T}$	Variable	Valor exp.	$u$ tipo A	$u$ tipo B	$u$ total	$u$ relativa
		$\Delta T/c$	5.094	0.0605	0.04	0.0726

u tipo A: Desviación estándar de los datos experimentales.

u tipo B: Del certificado de calibración.

$$u_{total} = \sqrt{[u_{tipo A}]^2 + [u_{tipo B}]^2} \quad (18)$$

$$u_{relativa} = u_{total}/Valor_{experimental} \quad (19)$$

**Tabla 4.6.-** Análisis de incertidumbre de conductividad térmica.

Variable	Valor	U relativa		
q/W	6.083	0.0012653		
L/m	0.0255	0.0110789		
A/m <sup>2</sup>	0.0194	0.006725		
ΔT/K	5.094	0.0142	%	k = 2
λ/W m°C	1.643	0.0192987	1.92987	3.85974

$$\frac{u_{\lambda}}{\lambda} = \sqrt{\left[\frac{u_q}{q}\right]^2 + \left[\frac{u_L}{L}\right]^2 + \left[\frac{u_A}{A}\right]^2 + \left[\frac{u_{\Delta T}}{\Delta T}\right]^2} \quad (20)$$

- **Propiedades físico- mecánicas.**

Los resultados que se presentan en este capítulo fueron obtenidos como el promedio de varias observaciones, por lo que se realizó la evaluación de la incertidumbre tipo A (Holman, Jack, 1988) utilizando la expresión:

$$u_{(x_i)} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (21)$$

donde:

$u_{(x_i)}$  Incertidumbre

s Desviación normal estimada de la muestra

n Numero de repeticiones; (grados de libertad: n-1)

La incertidumbre para cada prueba se muestra en la tabla 4.7.

**Tabla 4.7.-** Incertidumbre de pruebas físico-mecánicas.

Prueba	Mezcla	No. Datos (n)	Desviación normal (s)	Incertidumbre (u)
Resistencia a la compresión	1:3	9	0.775280982	0.258426994
	1:5	9	0.437527029	0.145842343
	1:1:3	9	0.530680456	0.176893485
	1:1:5	9	0.601047339	0.200349113
	CCT	9	0.192288988	0.064096329
	C30	9	0.903883260	0.301294420
	CBC5	9	1.139043711	0.379681237
	PET15	9	0.413135612	0.137711871
	EPS50	9	0.691230000	0.230410000
	FPP	9	0.803884910	0.267961640
Absorción	1:3	9	0.248923223	0.082974408
	1:5	9	0.331460114	0.110486705
	1:1:3	9	0.328958023	0.109652674
	1:1:5	9	0.298722741	0.099574247
	CCT	9	0.526022855	0.175340952
	C30	9	0.329174665	0.573737453
	CBC5	9	0.198299720	0.445308568
	PET15	9	0.169603222	0.411829117
	EPS50	9	0.130912277	0.361818016
	FPP	9	0.145345974	0.381242671

## 4.2.- Propiedades físico- mecánicas

### 4.2.1.- Resistencia a la compresión

se realizaron ensayos de resistencia a compresión a 9 especímenes por cada mezcla a edades de 7, 14 y 28 días, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.8, en donde:

Morteros tradicionales:

1:3 Mortero cemento – polvo de piedra en proporción 1:3

1:5 Mortero cemento – polvo de piedra en proporción 1:5

1:1:3 Mortero cemento – cal – polvo de piedra en proporción 1:1:3

1:1:5 Mortero cemento – cal – polvo de piedra en proporción 1:1:5

CCT Mortero cemento – cal – polvo de piedra en proporción 1:3:7

Morteros alternativos:

C30 Mortero cemento – polvo de piedra (30% de sustitución parcial por caucho)

CBC5 Mortero cemento – polvo de piedra (5% de sustitución parcial por ceniza de bagazo de caña)

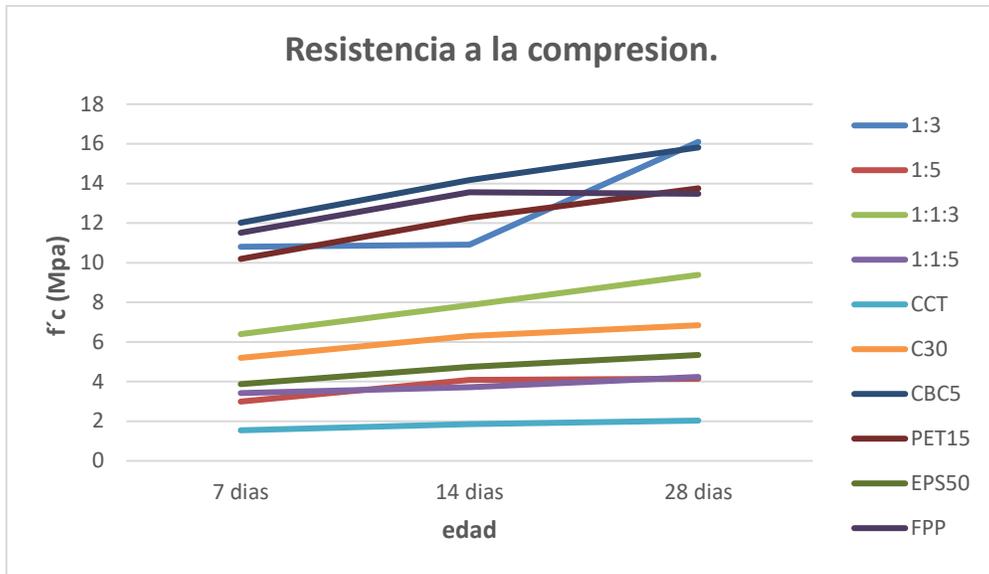
PET15 Mortero cemento – polvo de piedra (15% de sustitución parcial por polvo de PET)

EPS50 Mortero cemento – polvo de piedra adición de esferas de poliestireno 50 %.

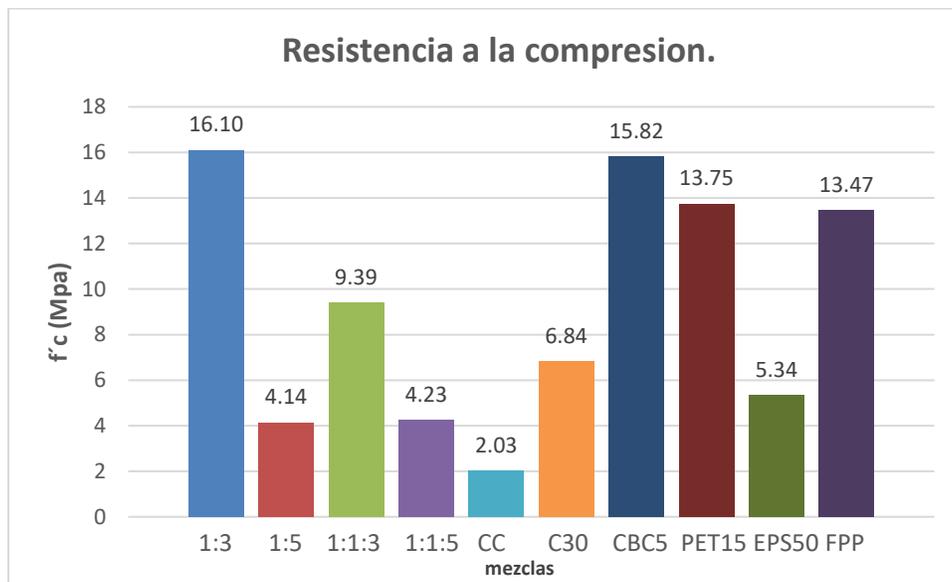
FPP Mortero cemento – polvo de piedra reforzado con fibras de polipropileno, 600 gr por m<sup>3</sup>

**Tabla 4.8.-** Resultados de la prueba de resistencia a la compresión.

Mortero	Mezcla	Resistencia a la compresión (f'c) en Mpa		
		7 días	14 días	28 días
Tradicionales	1:3	10.8042042	10.9093533	16.1011028
	1:5	2.99157306	4.07945744	4.14341859
	1:1:3	6.39687780	7.86547811	9.38627160
	1:1:5	3.42055952	3.71791894	4.23440251
	CCT	1.54138745	1.85607196	2.03171995
Alternativos	C30	5.19708865	6.30872691	6.84351622
	CBC5	12.0185944	14.1638536	15.8160562
	PET15	10.1912886	12.2528644	13.7531728
	EPS50	3.87177438	4.74532897	5.34484218
	FPP	11.5128981	13.5552964	13.4732475



**Fig. 4.1.-** Comportamiento de los especímenes a diferentes edades.



**Fig. 4.2.-** Resistencia a la compresión 28 días.

En la figura 4.1 se observa que el desarrollo de la resistencia a la compresión de las mezclas tradicionales muestra una tendencia ascendente entre los 14 y 28 días, lo cual coincide con lo que se afirma en la literatura consultada [30].

La mezcla 1:3 presenta el mayor incremento, un 47.59 %, contrario a la 1:5 con 1.57%, siendo las mezclas con adición de cal 1:1:3, 1:1:5 y CCT quienes presentan un comportamiento regular ascendente, 19.34%,13.89% y 9.46% respectivamente; así pues 1:3 es la que ofrece mejor desempeño.

A los 14 días, la muestra 1:3 presenta un ligero incremento, con respecto a la primera semana con 0.97%, sin embargo durante la semana 3 y 4 alcanza una resistencia superior a 1:5,1:1:3,1:1:5 y CCT.

En la figura 4.2, se observa que los morteros tradicionales con menor agregado fino, 1:3 y 1:1:3, desarrollan mejores condiciones mecánicas 16.10 Mpa y 9.39 Mpa respectivamente; contrario a las proporciones 1:5 y 1:1:5 que desarrollan menor resistencia a la compresión 4.14 Mpa y 4.23 Mpa respectivamente.

En la figura 4.1 se observa que el desarrollo de la resistencia a compresión de las mezclas alternativas muestra una tendencia ascendente entre los 14 y 28 días, con excepción de la mezcla FPP que sufre un decremento, ya que reduce en un 0.61%, en comparación con C30, CBC5, PET15 y EPS50 que muestran un incremento de 8.48%,11.66%,12.24% y 12.63% respectivamente.

Así pues, CBC5 es el mortero alternativo que ofrece mejor desempeño, solo por debajo del mortero tradicional 1:3 por menos del 2% a los 28 días, atribuido al efecto de llenado de vacíos por parte de granos finos como concluye los resultados obtenidos en Brasil (Camargo Macedo, Pamela, et al.,2014).

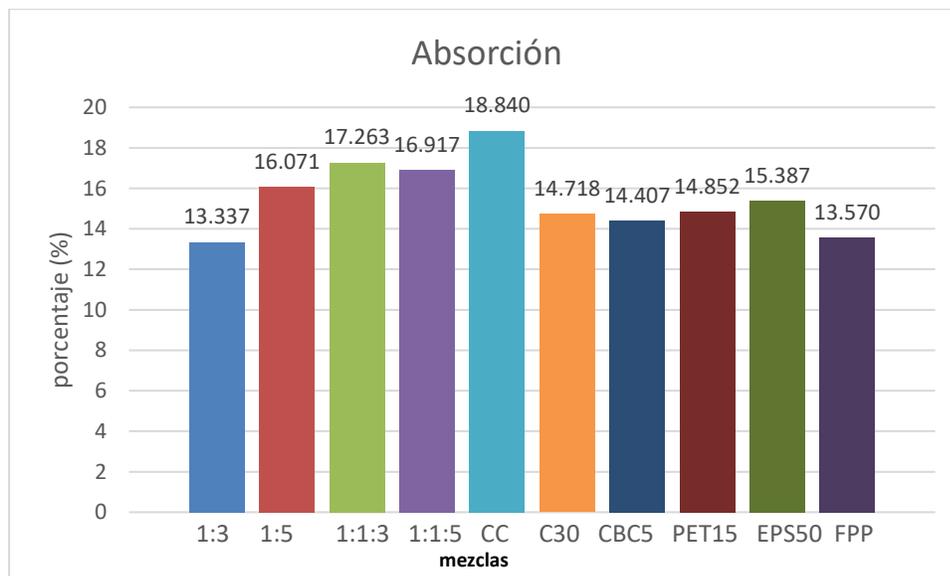
En la figura 4.2 se observa que la sustitución parcial del agregado fino por polvo de caucho y PET provocan una reducción de 57.51% y 14.6% respectivamente en la resistencia a la compresión, sin embargo, no produce alteraciones que puedan comprometer su desempeño como material de recubrimiento (Esquivel,2013).

El mortero EPS50 presenta la menor resistencia a compresión de los morteros cemento-polvo de piedra, más sin embargo es el material con menor conductividad térmica de los 10 materiales estudiados, aún por debajo de los morteros con cal.

#### 4.2.2.- Absorción

Los resultados de la prueba de absorción (fig. 4.3) indican que los morteros, cemento-polvo de piedra tienen menor porcentaje de absorción de agua, siendo 1:3 y FPP quienes tiene menor porcentaje con 13.337% y 13.570% respectivamente; esto permite afirmar que tendrán un mejor desempeño ante la humedad al ser aplicado como recubrimiento en una envolvente.

Contrario a los morteros cemento-cal-polvo de piedra, los resultados indican CC tiene mayor porcentaje de absorción de agua con 18.840%, seguidos de 1:1:3 y 1:1:5 quienes están debajo de la mezcla CC en 8.37% y 10.20% respectivamente; esto confirma la propiedad de la cal de retención de agua.



**Fig. 4.3.-** Resultados de la prueba de absorción.

### 4.2.3.- Densidad

Los resultados representados en la figura 4.4, indican que los morteros tradicionales 1:3,1:5, 1:1:3,1:1:5 y CCT están por debajo del mortero cemento-arena de la norma oficial mexicana (38), en un 9.2%,12.35%,7.85%,14.85% y 15.85% respectivamente.

Al comparar los morteros tradicionales se aprecia que CCT, es la densidad más baja, seguido de 1:1:5 y el mortero 1:5. Los morteros con mayor densidad son 1:1:3 y 1:3, la diferencia entre estos dos es de 1.5 %.

Como se observa en la gráfica 4.4 y tomando como referencia el mortero 1:3, los morteros alternativos CBC5 y FPP, están por encima de este, en un 2.32 y 0.6 % y los morteros C30, PET15 y EPS50 se encuentran por debajo, en un 9.9%,5.28% y 26.25%, siendo el ultimo el material menos denso.

La reducción de densidad de los morteros C30, PET15 y EPS50, es debido a la baja densidad del material inerte comparado con la densidad del polvo de piedra, confirmando los resultados en otros estudios de México [20], Turquía [2], y China [23].

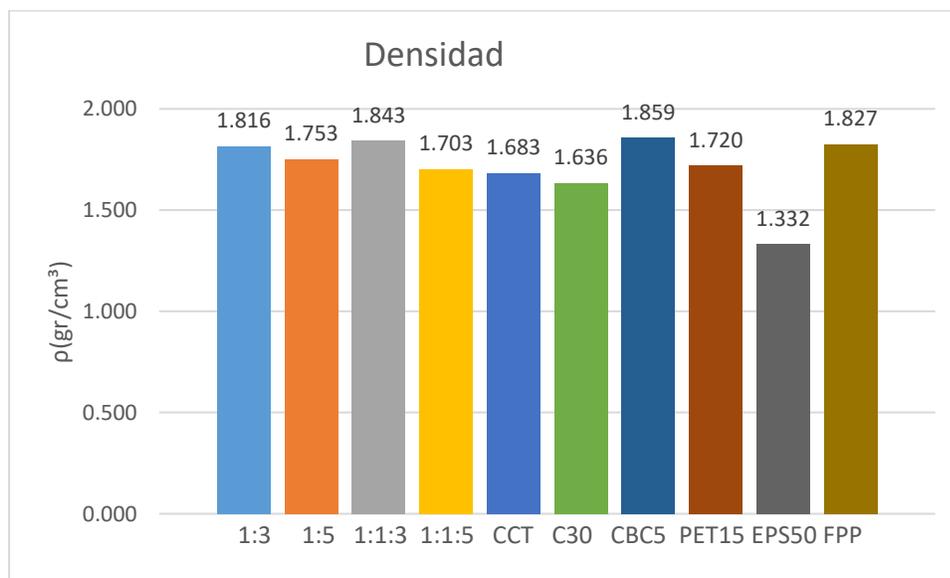
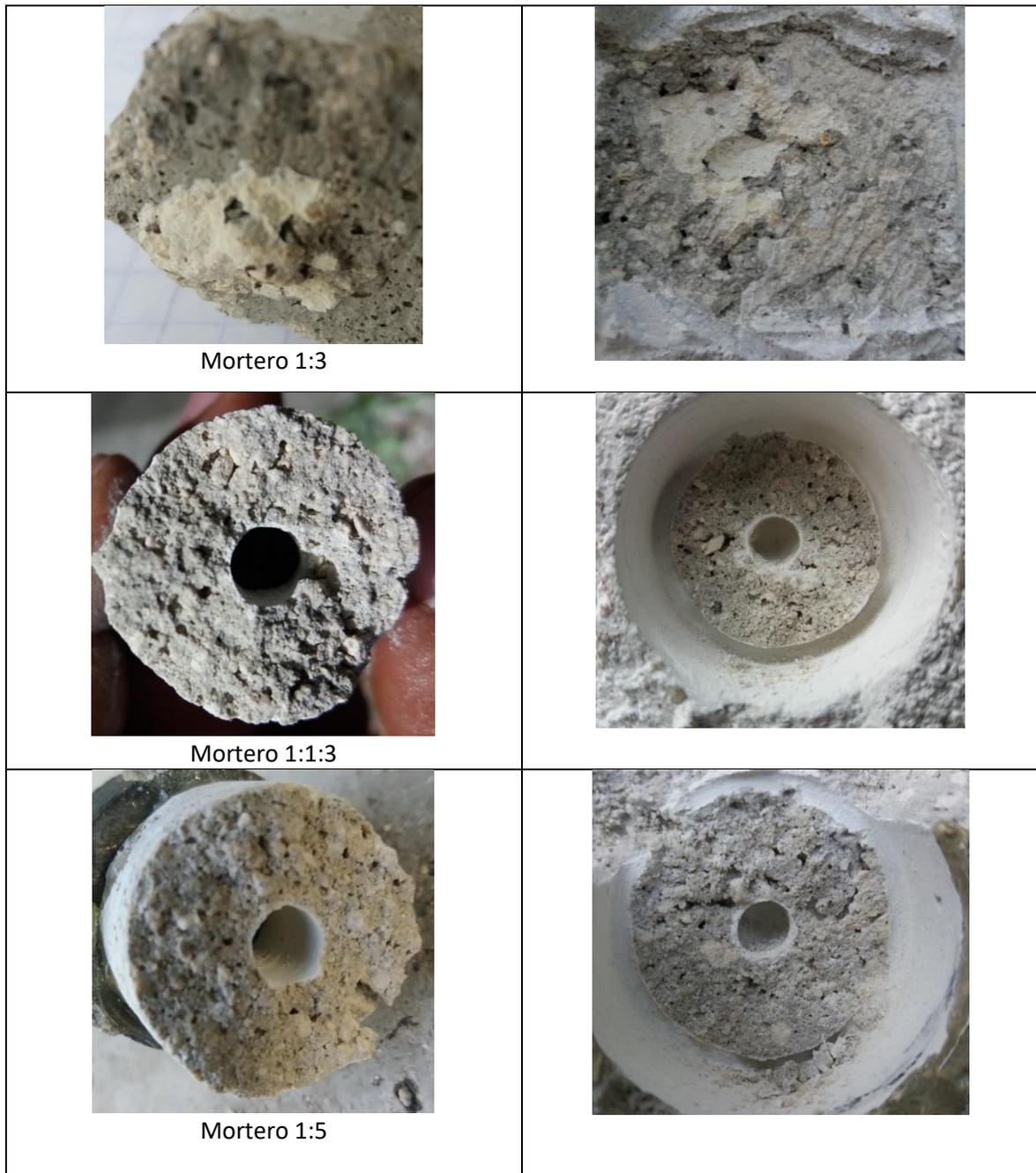


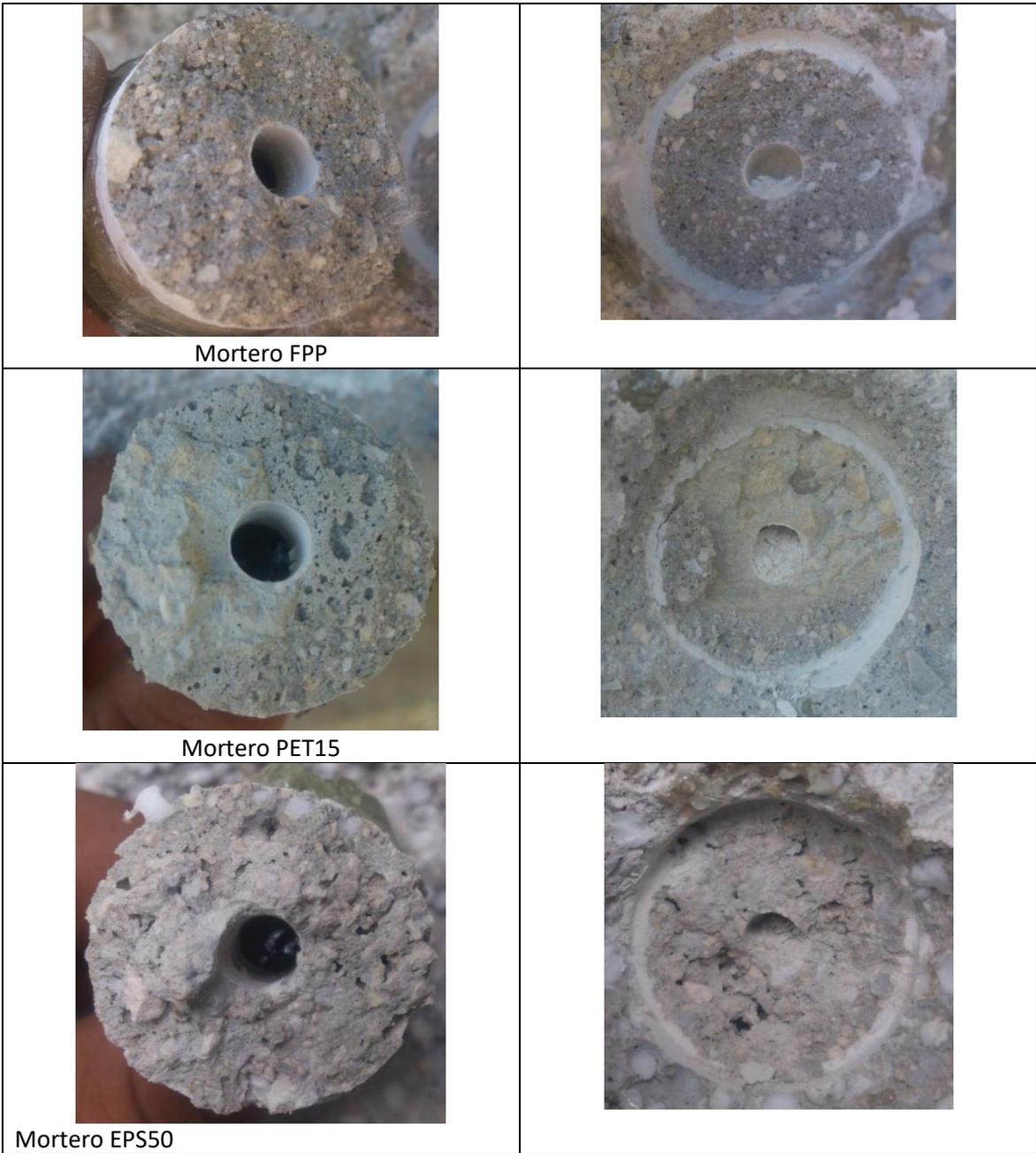
Fig. 4.4.- Resultados de la prueba de densidad.

#### 4.2.4 Adherencia

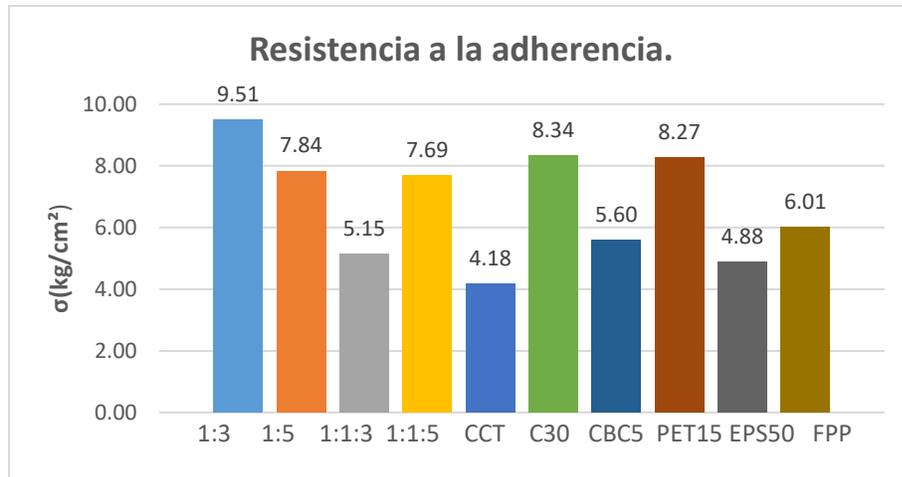
En la figura 4.5 se observa el efecto de la falla por arrancamiento de los especímenes sobre el muro de block, los morteros 1:3, 1:5, C30 y PET15 presentan una afectación significativamente mayor sobre el área donde ocurre el esfuerzo.



 <p data-bbox="435 541 602 575">Mortero 1:1:5</p>	
 <p data-bbox="467 968 570 1003">Calcreto</p>	
 <p data-bbox="440 1367 597 1402">Mortero C30</p>	
 <p data-bbox="435 1749 602 1785">Mortero CBC5</p>	



**Fig. 4.5.-** Prueba de adherencia, falla por carga perpendicular.



**Fig. 4.6.-** Resultados de la prueba de adherencia a 28 días.

En la figura 4.6 se observa que la adherencia de las mezclas tradicionales, cemento-polvo de piedra en proporción 1:3 y 1:5 son las que ofrecen un mejor desempeño, contrario a las cemento-cal-polvo de piedra en proporción 1:1:3, 1:1:5 y CCT que reduce un 45.84%, 19.13% y 56.04% respectivamente.

En comparación con las mezclas alternativas, C30 y PET15 presentan un comportamiento más regular, ya que reduce un 12.30% y 13.03% respectivamente. En el orden de menor a mayor adherencia de los morteros aun no mencionados son: EPS50, CBC5 y FPP.

### 4.3.- Propiedades Térmicas

Se estudiaron las propiedades térmicas primarias de los morteros tradicionales y alternativos, como son conductividad térmica y calor específico. Los resultados se presentan en la tabla 4.9.

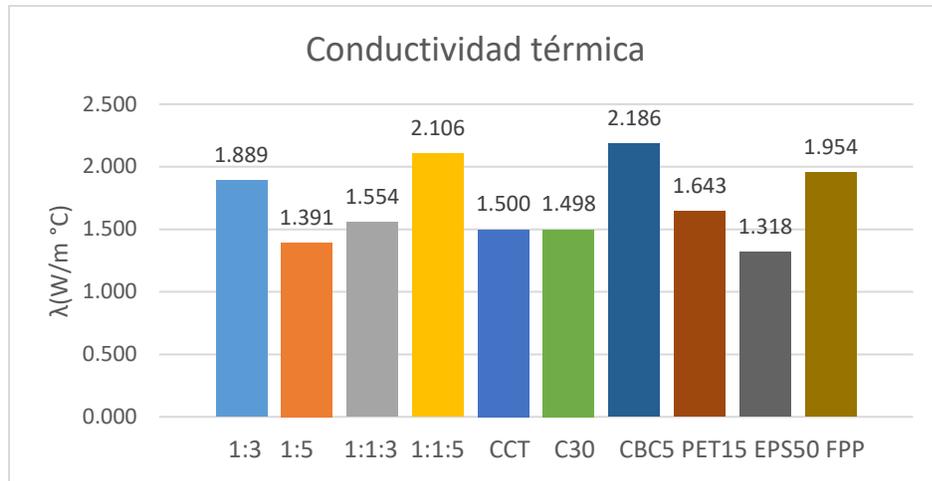
**Tabla 4.9.-** Resultados de las pruebas de conductividad térmica y calor específico.

Mortero	Mezclas	Conductividad térmica (W/m °C)	Calor específico (kJ/kg °C)
Tradicionales	1:3	1.889	0.981
	1:5	1.391	1.055
	1:1:3	1.554	1.140
	1:1:5	2.106	1.041
	CCT	1.500	1.277
Alternativos	C30	1.498	1.062
	CBC5	2.186	0.949
	PET15	1.643	1.163
	EPS50	1.318	1.126
	FPP	1.954	1.009

#### 4.3.1.- Conductividad térmica.

En la figura 4.7 se observa que los materiales con mayor conductividad térmica (k) son: mortero cemento-cal-polvo de piedra, 1:1:5 y cemento-polvo de piedra (5% sustitución parcial por ceniza de bagazo de caña), CBC5. Caso contrario, son: mortero cemento-polvo, 1:5 y mortero cemento-polvo de piedra adición de esferas de poliestireno 50 %, EPS50; la diferencia entre estos es un 5.4%.

En el orden de menor a mayor conductividad térmica de los morteros tradicionales y alternativos aun no mencionados son: C30, CCT, 1:1:3, PET15, 1:3 y FPP.



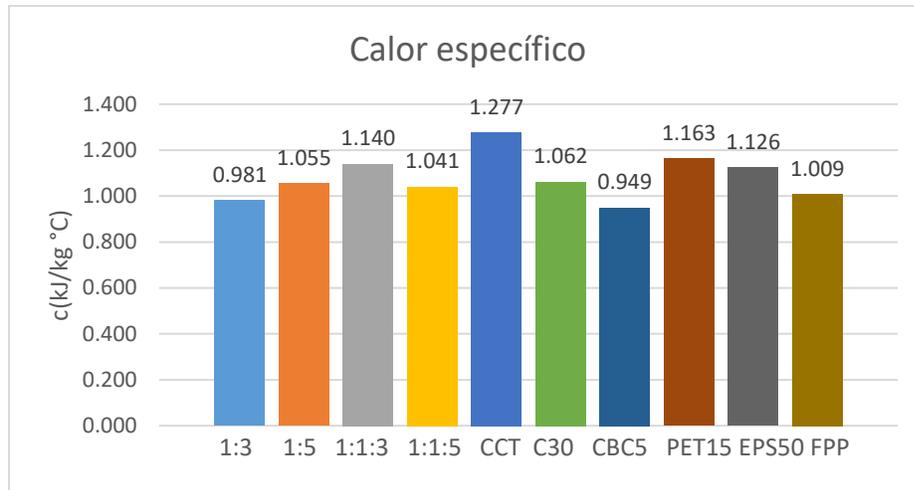
**Fig. 4.7.-** Conductividad térmica.

Así mismo los resultados que se muestran en la figura 4.7, permiten realizar la comparación entre la mezcla 1:3 y los morteros alternativos. En el caso de los morteros por sustitución parcial por polvo de caucho, polvo de PET y adición de esferas de poliestireno, la conductividad térmica disminuye 20.69%, 13.02% y 30.22% respectivamente; de donde se deduce que el porcentaje de sustitución de agregado fino incide directamente en el valor de la conductividad térmica.

#### **4.3.2.- Calor específico.**

Se observa en la figura 4.8, que el calor específico en los morteros tradicionales es mayor cuando en estos hay presencia de cal, como es el caso de los que tienen proporciones 1:1:5, 1:1:3 y CCT, cuyos valores tienden a estar por encima de los que se componen de cemento-polvo de piedra. El CCT que funciona como impermeabilizante comúnmente en la edificación local de vivienda, el alto contenido de cal lo hace actuar térmicamente de manera similar a los morteros (Puc,2009).

En cuanto al grupo de morteros alternativos, el CBC5 presenta el valor menor, aún por debajo del mortero tradicional 1:3, con 3.26%. Contrario a PET15 que presentó el valor mayor de las mezclas alternativas, 1.163 kJ/kg °C. Los morteros FPP, C30 y EPS50 ordenados de menor a mayor, presentan 1.009, 1.062 y 1.126 kJ/kg °C respectivamente.



**Fig. 4.8.-** Calor específico.

#### 4.4.- Correlación entre conductividad térmica y calor específico

La figura 4.9 muestra la correlación entre la conductividad térmica y el calor específico, si se observa a los 5 morteros tradicionales y los 5 morteros alternativos, se aprecia que las mezclas 1:3, 1:1:5, CBC5 y FPP tienen un comportamiento similar, se deduce que a mayor conductividad térmica menor calor específico, posiblemente sea porque tienen más polvo de piedra caliza, coincidiendo con las conclusiones que hace Bojórquez(2010), los morteros locales varían de acuerdo a la presencia de la cal y a la fracción volumétrica del polvo de piedra caliza. Los morteros alternativos EPS50, C30 Y PET15 reducen considerablemente su conductividad térmica en un 30.22%, 20.69% y 13.02% en comparación a la mezcla 1:3, esto coincide con el estudio de Esquivel (2013), el calor específico presenta la inversa de la conductividad térmica incrementando su valor mientras mayor es el porcentaje de sustitución del polvo de piedra, en el sentido de que los materiales con mayor calor específico poseen menores coeficientes de conductividad térmica.

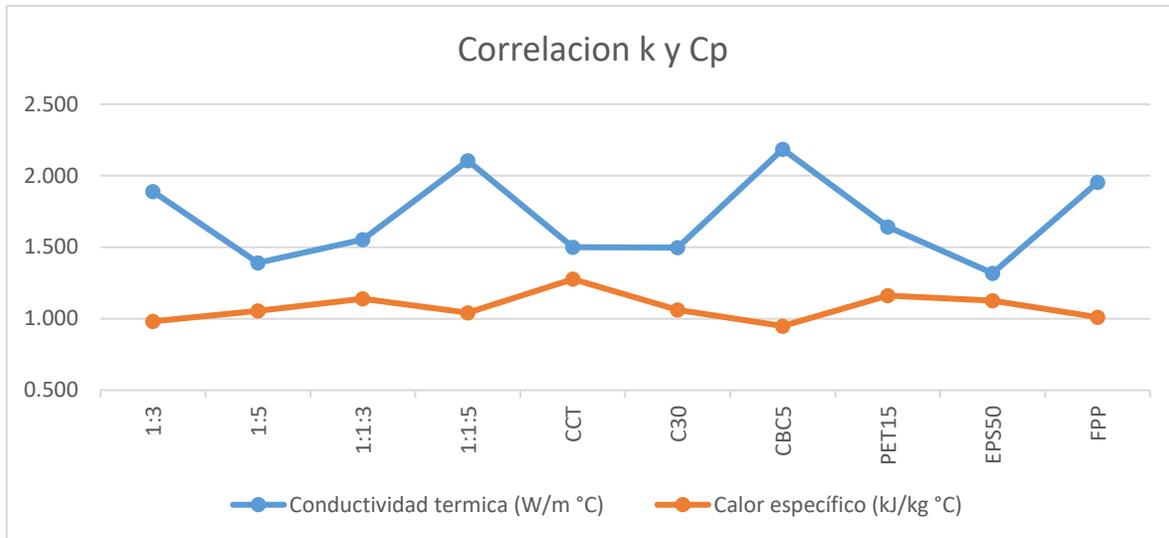


Fig. 4.9.- Correlación entre conductividad térmica y calor específico de los 10 materiales.

#### 4.5.- Correlación entre conductividad térmica y densidad.

En la figura 4.10, se observa que la correlación entre los diez morteros en estudio es que a mayor densidad mayor conductividad térmica. En términos generales la correlación entre la conductividad y densidad son similares en comportamiento entre los morteros de estudio. Y aunque la mezcla 1:1:5 no es tan denso, la simple presencia de cal tiende a aumentar su conductividad térmica.

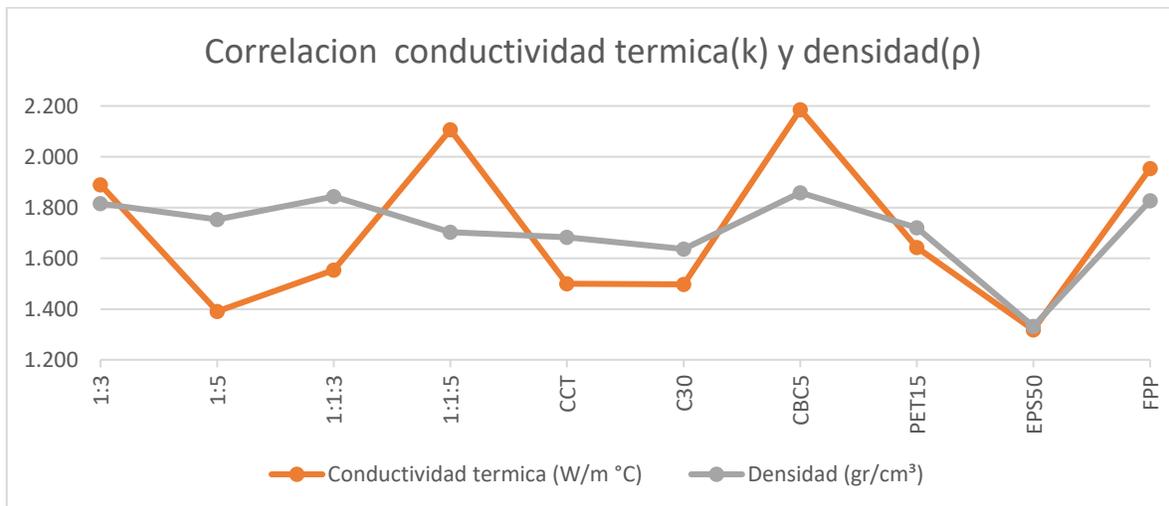


Fig. 4.10.- Correlación entre conductividad y densidad de los 10 materiales.

#### 4.6.- Correlación entre calor específico y densidad.

La figura 4.11, muestra que no existe correlación entre calor específico y la densidad en los morteros 1:3, CBC5 y FPP, ya que presentan; que a mayor densidad menor calor específico, caso contrario en los morteros 1:5, CCT y PET15, a menor densidad mayor calor específico. Mientras que 1:1:3, 1:1:5, C30 y EPS50 mantienen un comportamiento similar, lo cual es favorable en la capacidad de absorber calor y de esa manera incrementar con lentitud su temperatura.

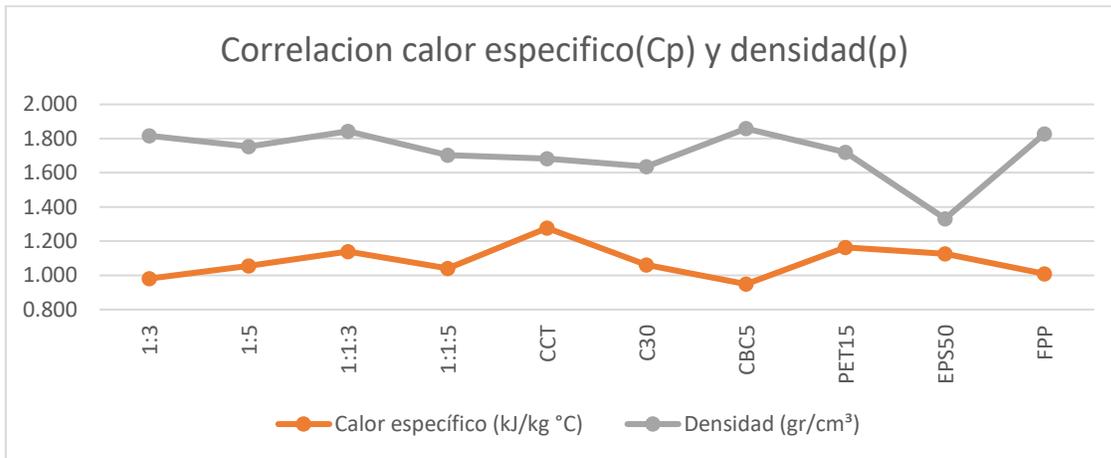
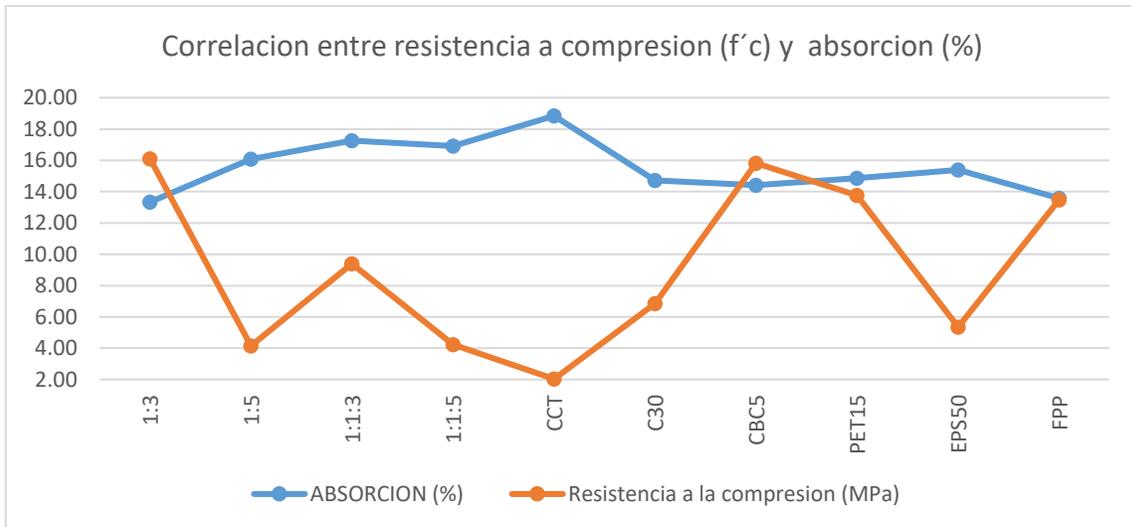


Fig. 4.11.- Correlación entre calor específico y densidad de los 10 materiales.

#### 4.7.- Correlación entre absorción y resistencia a la compresión.

La figura 4.12, presenta los resultados del comportamiento de las mezclas tradicionales y alternativas para la resistencia a la compresión y la absorción, en ella se puede apreciar que, en las mezclas tradicionales, 1:5, 1:1:3, 1:1:5 y CCT la disminución de cemento afecta considerablemente en su capacidad de resistencia a la compresión y aumento de la absorción. Contrario a 1:3 que presenta la mayor capacidad de resistencia a la compresión y el menor porcentaje de absorción.

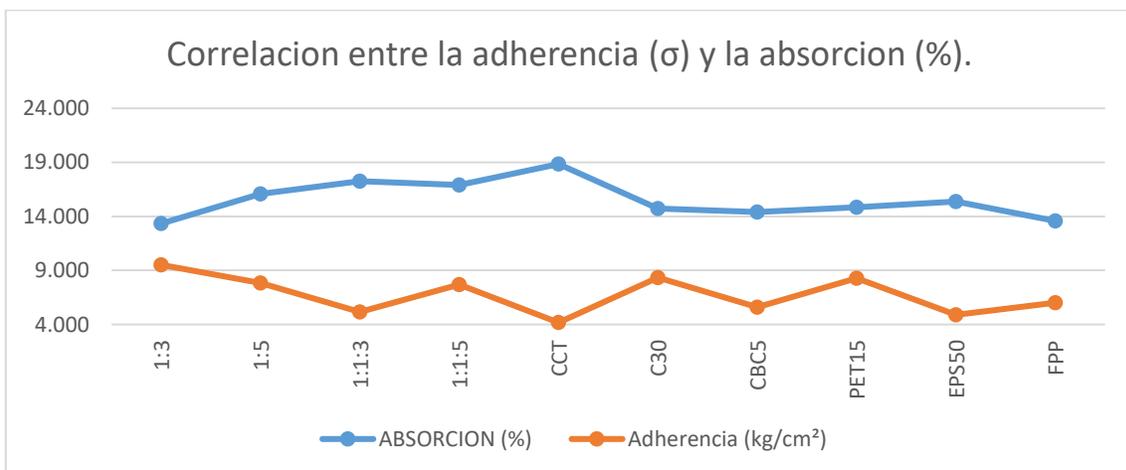
En las mezclas alternativas, se puede apreciar que el incremento del volumen de sustitución del agregado fino por polvo de caucho, de PET y adición de esferas de poliestireno, induce al aumento de la absorción y disminuye la resistencia a la compresión. Inverso a esto, las mezclas CBC5 y FPP, presentan menor absorción y mayor resistencia a la compresión.



**Fig. 4.12.-** Correlación entre absorción y resistencia a la compresión.

#### 4.8.- Correlación entre absorción y adherencia.

La figura 4.13 presenta los resultados del comportamiento de las mezclas tradicionales y alternativas para la adherencia y la absorción, en ella se puede apreciar que el aumento de la absorción disminuye la adherencia.



**Fig. 4.13.-** Correlación entre absorción y adherencia.

#### 4.9.- Catálogo de características físico-mecánicas y térmicas de materiales tradicionales y alternativos para la envolvente de una edificación.

Tabla 4.10.- Catálogo de materiales tradicionales y alternativos.

Catálogo de materiales							
Morteros		Resistencia a la compresión (MPa)	Adherencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Absorción (%)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/m °C)	Calor específico (kJ/kg °C)
Tradicionales	1:3	16.1	9.51	13.337	1.816	1.889	0.981
	1:5	4.14	7.84	16.071	1.753	1.391	1.055
	1:1:3	9.39	5.15	17.263	1.843	1.554	1.14
	1:1:5	4.23	7.69	16.917	1.703	2.106	1.041
	Calcreto	2.03	4.18	18.84	1.683	1.5	1.277
Alternativos	C30	6.84	8.34	14.718	1.636	1.498	1.062
	PET15	15.82	5.6	14.407	1.859	2.186	0.949
	CBC5	13.75	8.27	14.852	1.72	1.643	1.163
	EPS50	5.34	4.88	15.387	1.332	1.318	1.126
	FPP	13.47	6.01	13.57	1.827	1.954	1.009
NOM-008-ENER 2001	Cemento-arena				2	0.63	
	Mortero cal					0.872	
NBE-CT-79, 1979	Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido				$\rho > 2$	1.8	1
					$1.8 < \rho \leq 2$	1.3	1
					$1.6 < \rho \leq 1.8$	1	1
					$1.45 < \rho \leq 1.6$	0.8	1
					$1.25 < \rho \leq 1.45$	0.7	1
					$1 < \rho \leq 1.25$	0.55	1
					$0.75 < \rho \leq 1$	0.4	1
					$0.5 < \rho \leq 0.75$	0.3	1
Pérez, M., et al, 2002*	Placa de concreto				2.03	1.16	
Puc, 2009 *	1:3					0.935	1.42
	1:5					0.988	1.906
	1:1:3					0.604	2.447
	1:1:5					0.809	1.611
	Calcreto					0.782	1.11
Esquivel, 2013*	1:3	12.93		11.125	1.97	1.725	0.838
	C30	4.28		10.121	1.66	1.244	0.945

(1) Para el mortero colocado "in situ" se considera una densidad de 1900 kg/m<sup>3</sup>

(2) Los valores de diseño anotados corresponden a un percentil del 90% y provienen de los valores declarados obtenidos según la norma UNE EN 1745:2002 y corregidos según los criterios de la norma UNE EN 12524:2000, con factor de corrección de humedad,  $F_m$ , igual a 1,17.

\*Resultados de estudios hechos en la región, con clima cálido sub húmedo y material calizo.

## **CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.**

En esta investigación se cumplió con cada uno de los objetivos planteados para evaluar las propiedades físico-mecánicas y térmicas de los morteros tradicionales y alternativos de acuerdo con las Normas Mexicanas aplicables a la Industria de la Construcción, y las normas de la ASTM que corresponden a cada prueba, tal como se planteó en el capítulo 2.

La realización del presente estudio deja a la vista valiosa información relevante respecto a las propiedades mecánicas y térmicas de los morteros estudiados.

Los resultados fueron comparados entre ellos y un par de testigos disponibles en la NOM-008-ENER 2001 y con los valores obtenidos de la literatura [20], [30] y [43] los cuales se tomaron como parámetro para evaluar las diferentes mezclas.

Con respecto a la investigación de Puc (2009), los resultados de los morteros tradicionales estudiados en el presente trabajo se encuentran por encima y como se muestra en la tabla 4.10, solo se conoce la caracterización térmica de estos materiales. A diferencia con Esquivel (2013), solo el valor de adherencia no se menciona, pero los resultados de la caracterización física-mecánica y térmica son más apegados a los obtenidos en este trabajo.

Los resultados obtenidos confirman al mortero tradicional 1:3 como el mortero que ofrece excelentes propiedades mecánicas, la mayor resistencia a la compresión y adherencia de los 10 morteros estudiados; el mortero con menor porcentaje absorción y el cuarto material más denso. Aunque es uno de los dos morteros

tradicionales con mayor conductividad térmica debido a su menor capacidad de retener energía antes de aumentar su temperatura 1 °C.

La utilización de polvo de piedra caliza en los morteros, disminuyó la densidad en comparación con los morteros cemento-arena y cemento-cal establecidos en la NOM-008-ENER 2001.

De acuerdo con los resultados obtenidos la sustitución parcial de polvo de piedra en el mortero cemento-polvo 1:3, disminuye su capacidad de resistencia a la compresión, sin embargo, C30, PET15 y EPS50 presentan una mejora en las propiedades térmicas, ya que reduce su conductividad térmica y aumenta su capacidad de calorífica.

A sí mismo la adición de estos materiales alternativos en el mortero cemento-polvo de piedra no produce alteraciones que puedan comprometer su desempeño como material de recubrimiento. Esto propicia una alternativa sustentable para la producción de morteros en la industria de la construcción y para su aprovechamiento en modelos que evalúen el confort térmico de edificaciones.

Con relación a la adherencia, los morteros tradicionales cemento-polvo de piedra, 1:3 y 1:5, ofrecen mayor adherencia que los morteros cemento-cal-polvo de piedra, 1:1:3, 1:1:5 y CCT. En los morteros alternativos, la sustitución parcial de agregado fino por un material inerte, como lo es caucho y PET, reducen su adherencia en comparación con 1:3, pero permanecen adheridas al block, siendo las que mayor esfuerzo presentan.

En nuevas investigaciones, se podría evaluar esta propiedad (la adherencia) teniendo como variable adicional el ambiente de curado de los especímenes con el fin de determinar su influencia en el comportamiento de la adherencia entre el mortero y el material portante.

Al concluir con las pruebas de adherencia, se confirmó la influencia del área de contacto entre el block y los morteros, a mayor porosidad la adherencia aumenta.

Para la evaluación de las propiedades térmicas la metodología estuvo apegada a las normas ASTM y como resultado de ello se conocieron las características térmicas de los diez morteros en cuestión, los resultados de estos fueron comparados entre sí y con materiales testigos en la norma oficial mexicana NOM-008-ENER 2001.

Por lo general los materiales que contienen cal son de baja conductividad térmica y con alta capacidad calorífica, transmiten con lentitud el calor. Así pues, favorece las condiciones de confort térmico (Puc,2009), los resultados arrojaron que el mortero con proporciones 1:1:3, presento una de las conductividades térmicas más bajas y excelente resistencia a la compresión. Aunque la cal ayuda a disminuir la conductividad en estos morteros, su uso debe ser limitado ya que la cal en exceso puede producir fisuras en el acabado.

Los resultados proyectaron que el porcentaje de sustitución de agregado fino por polvo de caucho 30% y PET 15% en volumen, son favorables, puesto que estos morteros presentan en términos generales un mejor desempeño al analizar en conjunto las propiedades estudiadas, ya que presentan una conductividad térmica baja, capacidad calorífica alta en comparación de los morteros cemento-polvo de piedra. Resistencia a la adherencia alta y densidad baja; así como absorción baja también. Aunque el comportamiento de la resistencia a compresión de C30 y PET15 es baja, lo compensan sus demás propiedades y no comprometen su desempeño como material de recubrimiento.

## **RECOMENDACIONES**

Realizar análisis de todos los componentes químicos que lleva cada mezcla, así como el proceso de su degradación, se puede identificar el comportamiento de este material desde el punto de vista de su impacto en la calidad de vida de las personas al momento de ser utilizado como recubrimiento en la envolvente de una edificación.

Continuar con el estudio, para determinar sus características acústicas e higrométricas de los materiales tradicionales y alternativos; y así poder identificar el impacto en la salud del diseño constructivo.

Es conveniente seguir ampliando el catálogo de materiales con nuevos productos reciclables y que sean usados en la región. Así como la implementación de estos materiales en sistemas constructivos que permitan conocer su interacción en la envolvente.

Así mismo seguir investigando respecto a la durabilidad de estos materiales, pues si bien tardan un tiempo considerable en degradarse, no se conoce su ciclo de vida cuando se combina con la pasta de cemento y polvo de piedra.

## BIBLIOGRAFIA

1. Almeida, Fernando C.R.; Sales, Almir; Moretti Juliana P.; Mendes, Paulo C.D. (2015). *Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar*. *Construction and Building Materials*, 82(2015), 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.039>. Brazil.
2. Akçaözoğlu, Semiha; Ulub, Cüneyt (2014). *Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali-activated blast furnace slag/metakaolin blends*. *Construction and Building Materials*. 58(2014), 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.011>. Turkey.
3. Arif, Elisabeth; Clark, Malcolm W.; Lake, Neal, (2016). *Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production*. *Construction and Buildings Materials*. 128(2016), 287-297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.091>. Australia.
4. ASTM C 144. *Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar*.U.S.A.
5. 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*.U.S.A.
6. ASTM C 270 03ab. *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*.U.S.A.
7. ASTM C 305. *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*.U.S.A.
8. ASTM C 351 92. *Standard Test Method for Mean Specific Heat of Thermal Insulation*.U.S.A.
9. Barrios, Guillermo; Elías, Pablo; Huelsz Guadalupe; Rojas, Jorge, (2010). *Selección de los materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas*. *Estudios sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto*. 3(3),69-84. México.
10. Barrios, Guillermo; Huelsz, Guadalupe; Rojas, Jorge. (2014). *Ener-Habitat: A cloud computing numerical tool to evaluate the thermal performance of walls/roofs*. *Energy Procedia*, 57(2014), 2042-2051. doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.169. Mexico.
11. Benosman, Ahmed Soufiane; Mouli, Mohamed; Taibi, Hamed; Belbachir, Mohamed; Senhadji, Yassine; Bahloudi, Ilies; Houivet, David, (2013). *Studies on Chemical Resistance of PET-Mortar Composites: Microstructure and Phase Composition Changes*. *Engineering*. 5(2013), 359-378, <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2013.54049>. Algeria.

12. 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.
13. 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*. Palapa, 5(2), 27-38. México.
14. Camargo Macedo, Pamela; Pereira, Adriana María; Akasaki, Jorge Luis; Floriti, Cesar Fabiano, Paya, Jordi; Pinheiro Melges, José Luis. (2014). *Performance of mortars produced with the incorporation of sugar cane bagasse ash*. Revista de Ingeniería de Construcción, 29(2), 187-199. Brasil.
15. Castilla, M.; Álvarez, J.D.; Berenguel, M.; Pérez M.; Rodríguez, F.; Guzmán, J.L.; (2010). *Técnicas de Control del Confort en Edificios*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. 7(3), 5-24. doi: 10.4995/RIAI.2010.03.01. España.
16. Catálogo de elementos constructivos del CTE. (2010) Instituto Eduardo Torroja De Ciencias De La Construcción. CEPCO. AICIA. España.
17. CENAM (2017). *Medición de conductividad térmica en materiales sólidos*. Centro nacional de metrología. CNM-880126-ML4-0013. Querétaro, México.
18. CONAVI (2014). *Fondo de desarrollo científico y tecnológico para el fomento de la producción y financiamiento de vivienda y el crecimiento del sector habitacional. Demandas específicas*. 2014.
19. 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. México.
20. 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.
21. Ferrándiz-Mas, V. y 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. doi: 10.3989/mc.2012.04611.
22. Ferrándiz-Mas, V. y García-Alcocel, (2013). Durability of expanded polystyrene mortars. *Construction and building materials*. 46,175-182. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.029.
23. Ge, Zhi; Yue, Hongya; Sun, Renjuan, (2015). *Properties of mortar produced with recycled clay brick aggregate and PET*. *Construction and Building Materials*. 93(2015), 851-856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.081>. China.
24. 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.
25. Holman, Jack P. (1988). *Métodos experimentales para ingenieros*. McGraw-Hill. México.
26. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (2002). *Terminología del Cemento y del Concreto ACI 116R-00*. IMCYC. México.
27. Mas Barbera, X. (2006). Estudio y caracterización de morteros compuestos, para su aplicación en intervenciones de sellados, reposiciones y replicas, de elementos pétreos escultórico-ornamentales. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.
28. 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. México.
29. Morley, S. (1994). *La Civilización Maya*. Fondo de Cultura Económica. México.
30. Neville, A. (1999). *Tecnología del concreto*. IMCYC. México.
31. NMX-C-061-ONNCCE-2015. *Industria de la construcción-Cementantes hidráulicos-Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*.
32. NMX-C-077- ONNCCE-1997. *Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Análisis Granulométrico - Método de Prueba*.

33. NMX-C-144-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción-Cementantes hidráulicos-Requisitos para el aparato usado en la determinación de la fluidez de morteros.
34. NMX-C-164-ONNCCE-2002. Industria de la construcción - Agregados - determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso.
35. NMX-C-170-1997. Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo Al Tamaño Requerido para las Pruebas.
36. NMX-C-189-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción-Materiales termoaislantes-Determinación de la transmisión térmica (aparato de placa caliente aislada).
37. NMX-C-414-ONNCCE-2010. "Industria de la construcción -cementantes hidráulicos -especificaciones y métodos de ensayo.
38. NOM-018-ENER-2011. Aislantes térmicos para edificaciones, características, límites y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación.
39. Noriega Ramírez, Natalia; Hernández Paz, Juan Francisco; Sandoval Granados, José Luis; Ramírez Ambriz, María de los Ángeles; Abdelkefi, Abdessattar; Cornejo Monroy, Delfino, (2015). *Fabricación y caracterización de nanopartículas de sílice huecas para uso en aislantes térmicos mediante un análisis factorial*. Culcyt. 57(2), 114-124. México.
40. Pérez Sánchez, María Milagrosa, Centeno Lara, Roberto. Lazcano Serrano, Fernando (2002). Desarrollo de un prototipo para la caracterización térmica de los materiales de construcción regionales. Ingeniería 6(2), 13-22. México.
41. Olivares Santiago, M.; Galán Marín, C.; Roa Fernández, J.: Los Composites: características y aplicaciones en la edificación. Informes de la construcción, 54(484).
42. 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.

43. Puc Ortiz, Lorena. (2009). Caracterización Térmica de Morteros Utilizados en Acabados de Viviendas en la Ciudad de Chetumal Quintana Roo. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Chetumal. México.
44. Rashad, Alaa M. (2016). *A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in traditional cementitious materials*. International Journal of Sustainable Built Environment. 5(2016), 46-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.11.003>. Egypt.
45. Sofi, A. (2017). Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete- A review. Ain Shams Engineering Journal. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.08.007>. India.
46. Zetola Vargas, V.; García Santos, A. Neila González, F. J. (2013). Mortero de cemento Portland con parafinas microencapsuladas. Revista de la Construcción. 12(1), 75-86. ISSN: 0717-7925. Chile.

## ANEXOS

### Conductividad térmica

Ensayo 1, mortero cemento-polvo de piedra 1:3

MORTERO 1:3						
PROBETA	DIMENSIONES					Peso kg
	cm	m	Promedio m	Área m <sup>2</sup>		
1	L1	15.326	0.153	0.153	0.0194	0.900
	L2	15.290	0.153			
	L3	15.244	0.152			
	L4	15.236	0.152			
	A1	12.630	0.126	0.127		
	A2	12.648	0.126			
	A3	12.720	0.127			
	A4	12.754	0.128			
	E1	2.500	0.025	0.025	Volumen m <sup>3</sup>	
	E2	2.510	0.025		0.000489	
	E3	2.552	0.026			
	E4	2.522	0.025			
2	L1	15.256	0.153	0.153	Área m <sup>2</sup>	0.940
	L2	15.266	0.153			
	L3	15.256	0.153			
	L4	15.242	0.152			
	A1	12.816	0.128	0.128	0.0196	
	A2	12.834	0.128			
	A3	12.820	0.128			
	A4	12.800	0.128			
	E1	2.580	0.026	0.026	Volumen m <sup>3</sup>	
	E2	2.574	0.026		0.000506	
	E3	2.590	0.026			
	E4	2.600	0.026			

## Corrida a 20 volts

Datos de los canales del TermoPar SR630						
Fecha y Hora de inicio de las mediciones		canal 1	canal 2	canal 3	canal 4	canal 5
		09/05/2017 08:14 a.m.				
09/05/2017	08:29 a. m.	27.9	27.9	28	27.9	25.5
09/05/2017	08:44 a. m.	28.5	29.2	29.5	28.5	23.7
09/05/2017	08:59 a. m.	28.7	29.7	29.9	28.8	23.2
09/05/2017	09:14 a. m.	28.4	29.5	29.8	28.6	22.7
09/05/2017	09:29 a. m.	28.1	29.3	29.6	28.4	22
09/05/2017	09:44 a. m.	27.7	28.9	29.2	28	22
09/05/2017	09:59 a. m.	27.3	28.5	28.8	27.6	22
09/05/2017	10:14 a. m.	26.9	28.1	28.4	27.2	21.2
09/05/2017	10:29 a. m.	26.5	27.8	28	26.8	21.4
09/05/2017	10:44 a. m.	26.1	27.3	27.6	26.4	21.2
09/05/2017	10:59 a. m.	25.7	26.8	27.1	26	22.6
09/05/2017	11:14 a. m.	25.8	26.9	27.2	26.1	21.3
09/05/2017	11:29 a. m.	25.5	26.6	26.9	25.8	23.1
09/05/2017	11:44 a. m.	25.7	26.8	27.1	26	21.3
09/05/2017	11:59 a. m.	25.4	26.4	26.7	25.7	23.4
09/05/2017	12:14 p. m.	25.7	26.7	27	25.9	20.9
09/05/2017	12:29 p. m.	25.4	26.4	26.7	25.7	23.5
09/05/2017	12:44 p. m.	25.9	26.8	27.1	26	21.6
09/05/2017	12:59 p. m.	25.7	26.7	27	26	23.9
09/05/2017	01:14 p. m.	26	27	27.3	26.2	21.2
09/05/2017	01:29 p. m.	25.9	26.8	27.1	26.1	23.8
09/05/2017	01:44 p. m.	26.1	27.1	27.4	26.4	22.3
09/05/2017	01:59 p. m.	26.1	27.1	27.4	26.4	22.8
09/05/2017	02:14 p. m.	26.2	27.3	27.6	26.5	22.6
09/05/2017	02:29 p. m.	26.3	27.3	27.6	26.5	22.8
09/05/2017	02:44 p. m.	26.3	27.3	27.6	26.5	22.9
09/05/2017	02:59 p. m.	26.4	27.4	27.7	26.7	22.4
09/05/2017	03:14 p. m.	26.2	27.2	27.6	26.5	23.3
09/05/2017	03:29 p. m.	26.5	27.5	27.8	26.7	22.1
09/05/2017	03:44 p. m.	26.3	27.4	27.7	26.6	23.7
09/05/2017	03:59 p. m.	26.6	27.7	28	26.9	22.2
09/05/2017	04:14 p. m.	26.3	27.4	27.7	26.6	23.5
09/05/2017	04:29 p. m.	26.6	27.6	27.9	26.9	21.5
09/05/2017	04:44 p. m.	26.4	27.5	27.8	26.7	23.7
09/05/2017	04:59 p. m.	26.7	27.8	28	27	21.8
09/05/2017	05:14 p. m.	26.3	27.5	27.7	26.8	23.7

09/05/2017	05:29 p. m.	26.7	27.8	28	27	22
09/05/2017	05:44 p. m.	26.4	27.5	27.8	26.8	24
09/05/2017	05:59 p. m.	26.7	27.8	28	27	21.6
09/05/2017	06:14 p. m.	26.3	27.4	27.7	26.6	22.8
09/05/2017	06:29 p. m.	26.4	27.5	27.8	26.7	20.9
09/05/2017	06:44 p. m.	26.3	27.4	27.6	26.5	21.2
09/05/2017	06:59 p. m.	26.2	27.3	27.7	26.5	20.8
09/05/2017	07:14 p. m.	26	27.1	27.4	26.3	21.6

## Corrida a 25 volts

Datos de los canales del TermoPar SR630						
Fecha y Hora de inicio de las mediciones		canal 1	canal 2	canal 3	canal 4	canal 5
		10/05/2017 08:31:08 a.m.				
10/05/2017	08:46 a. m.	26.7	27.2	27.4	26.7	23
10/05/2017	09:01 a. m.	27.5	28.8	29.1	27.8	22.2
10/05/2017	09:16 a. m.	27.8	29.3	29.7	28.2	22.2
10/05/2017	09:31 a. m.	27.9	29.6	30	28.4	21.9
10/05/2017	09:46 a. m.	27.8	29.5	29.9	28.3	21.4
10/05/2017	10:01 a. m.	27.5	29.3	29.8	28	21.1
10/05/2017	10:16 a. m.	27.4	29.1	29.6	27.9	21.3
10/05/2017	10:31 a. m.	27	28.7	29.2	27.5	22.8
10/05/2017	10:46 a. m.	27.1	28.8	29.2	27.6	20.9
10/05/2017	11:01 a. m.	26.8	28.4	28.9	27.3	22.7
10/05/2017	11:16 a. m.	26.8	28.5	29	27.3	21.6
10/05/2017	11:31 a. m.	26.8	28.5	29	27.3	21
10/05/2017	11:46 a. m.	26.7	28.3	28.8	27.2	22.4
10/05/2017	12:01 p. m.	26.8	28.5	29	27.3	20.6
10/05/2017	12:16 p. m.	26.8	28.3	28.9	27.3	21.8
10/05/2017	12:31 p. m.	26.6	28.2	28.8	27.1	22.3
10/05/2017	12:46 p. m.	26.9	28.5	29	27.4	20.5
10/05/2017	01:01 p. m.	26.6	28.2	28.7	27.1	22.4
10/05/2017	01:16 p. m.	26.6	28.2	28.7	27	22.1
10/05/2017	01:31 p. m.	26.8	28.3	28.9	27.3	20.8
10/05/2017	01:46 p. m.	26.6	28.2	28.7	27.1	23.3
10/05/2017	02:01 p. m.	27	28.6	29.1	27.4	21
10/05/2017	02:16 p. m.	26.8	28.4	28.8	27.3	23.9
10/05/2017	02:31 p. m.	27.3	28.8	29.3	27.7	21.4
10/05/2017	02:46 p. m.	27.1	28.6	29.1	27.6	24
10/05/2017	03:01 p. m.	27.5	29	29.5	27.9	21.9

10/05/2017	03:16 p. m.	27.4	28.9	29.4	27.8	22.7
10/05/2017	03:31 p. m.	27.3	28.9	29.4	27.7	21.9
10/05/2017	03:46 p. m.	27.3	28.8	29.5	27.8	21.4
10/05/2017	04:01 p. m.	27	28.6	29.1	27.5	22.4
10/05/2017	04:16 p. m.	27.1	28.7	29.2	27.5	20.5
10/05/2017	04:31 p. m.	26.9	28.5	29	27.4	21.6
10/05/2017	04:46 p. m.	26.8	28.4	28.9	27.2	21.6
10/05/2017	05:01 p. m.	26.9	28.5	29	27.4	20.3
10/05/2017	05:16 p. m.	26.7	28.3	28.7	27.1	22.2
10/05/2017	05:31 p. m.	26.6	28.3	28.7	27.1	21.8
10/05/2017	05:46 p. m.	26.7	28.3	28.8	27.2	21.2
10/05/2017	06:01 p. m.	26.5	28.1	28.6	27	22.2
10/05/2017	06:16 p. m.	26.7	28.2	28.7	27.1	21
10/05/2017	06:31 p. m.	26.6	28.2	28.7	27.1	22.1
10/05/2017	06:46 p. m.	26.7	28.4	28.8	27.2	20.8
10/05/2017	07:01 p. m.	26.7	28.3	28.8	27.2	21.4
10/05/2017	07:16 p. m.	26.7	28.3	28.8	27.1	22.3

### Corrida a 30 volts

Datos de los canales del TermoPar SR630						
Fecha y Hora de inicio de las mediciones		canal 1	canal 2	canal 3	canal 4	canal 5
		12/05/2017 07:48:06 a.m.				
12/05/2017	08:03 a. m.	26.7	26.6	26.5	26.6	27.4
12/05/2017	08:18 a. m.	28.3	29.7	30.2	28.6	24.8
12/05/2017	08:33 a. m.	29.6	31.4	32	30	23.8
12/05/2017	08:48 a. m.	30	32.1	32.7	30.5	22.5
12/05/2017	09:03 a. m.	30	32.3	32.9	30.6	22.2
12/05/2017	09:18 a. m.	29.8	32.2	32.8	30.5	21.6
12/05/2017	09:33 a. m.	29.4	31.9	32.6	30.1	21.5
12/05/2017	09:48 a. m.	29.2	31.7	32.3	30	21.2
12/05/2017	10:03 a. m.	28.8	31.3	32	29.6	21
12/05/2017	10:18 a. m.	28.6	31	31.7	29.4	21.1
12/05/2017	10:33 a. m.	28.2	30.7	31.4	29	21
12/05/2017	10:48 a. m.	28.1	30.6	31.3	28.9	20.4
12/05/2017	11:03 a. m.	28.1	30.5	31.2	28.8	21.3
12/05/2017	11:18 a. m.	27.9	30.3	31	28.7	21.8
12/05/2017	11:33 a. m.	27.9	30.3	31	28.7	21.2
12/05/2017	11:48 a. m.	27.9	30.3	31	28.7	21.3
12/05/2017	12:03 p. m.	27.9	30.3	31	28.6	20.3

12/05/2017	12:18 p. m.	27.6	30	30.8	28.4	21.8
12/05/2017	12:33 p. m.	27.7	30.2	30.8	28.5	20.8
12/05/2017	12:48 p. m.	27.5	29.9	30.6	28.3	22.5
12/05/2017	01:03 p. m.	27.7	30.1	30.8	28.5	20.8
12/05/2017	01:18 p. m.	27.6	29.9	30.6	28.3	22.4
12/05/2017	01:33 p. m.	27.8	30.2	30.9	28.5	21.1
12/05/2017	01:48 p. m.	27.6	30	30.6	28.3	22.6
12/05/2017	02:03 p. m.	27.7	30.1	30.8	28.5	20.4
12/05/2017	02:18 p. m.	27.7	30	30.7	28.5	22
12/05/2017	02:33 p. m.	27.7	30	30.7	28.4	22.3
12/05/2017	02:48 p. m.	28	30.3	31	28.6	20.6
12/05/2017	03:03 p. m.	27.8	30.1	30.8	28.5	22.4
12/05/2017	03:18 p. m.	28	30.4	31	28.7	20.2
12/05/2017	03:33 p. m.	28	30.2	31	28.7	21.5
12/05/2017	03:48 p. m.	27.9	30.3	30.9	28.6	22.4
12/05/2017	04:03 p. m.	28.1	30.4	31.1	28.9	21.2
12/05/2017	04:18 p. m.	28	30.3	31.1	28.8	23.2
12/05/2017	04:33 p. m.	28.4	30.7	31.4	29.1	21.4
12/05/2017	04:48 p. m.	28.2	30.5	31.2	29	22.9
12/05/2017	05:03 p. m.	28.3	30.7	31.3	29	21.6
12/05/2017	05:18 p. m.	28.3	30.7	31.3	29	21.3
12/05/2017	05:33 p. m.	28.1	30.5	31.2	28.8	22.5
12/05/2017	05:48 p. m.	28.2	30.6	31.3	28.9	21.3
12/05/2017	06:03 p. m.	28.1	30.5	31.1	29	22.2
12/05/2017	06:18 p. m.	28.3	30.7	31.4	29	21.2
12/05/2017	06:33 p. m.	28	30.6	31.2	29	22
12/05/2017	06:48 p. m.	28.1	30.5	31.2	28.9	20.7
12/05/2017	07:03 p. m.	28	30.4	31.1	28.7	21

## Corrida a 35 volts

Datos de los canales del TermoPar SR630						
Fecha y Hora de inicio de las mediciones		canal 1	canal 2	canal 3	canal 4	canal 5
		15/05/2017 08:20:40 a.m.				
15/05/2017	08:35 a. m.	29.1	29.7	30.1	29.1	25.5
15/05/2017	08:50 a. m.	30.4	32.8	33.5	31	24.7
15/05/2017	09:05 a. m.	31.6	34.3	35.2	32.3	24.5
15/05/2017	09:20 a. m.	32.1	35.1	36	33	24
15/05/2017	09:35 a. m.	32.3	35.5	36.3	33.3	23.9
15/05/2017	09:50 a. m.	32.3	35.5	36.4	33.3	23.1

15/05/2017	10:05 a. m.	32.1	35.4	36.4	33.2	23.1
15/05/2017	10:20 a. m.	32	35.4	36.3	33.1	23.2
15/05/2017	10:35 a. m.	31.8	35.2	36	32.9	22.3
15/05/2017	10:50 a. m.	31.6	34.9	35.8	32.6	22.2
15/05/2017	11:05 a. m.	31.2	34.5	35.5	32.2	22
15/05/2017	11:20 a. m.	31	34.3	35.2	32	21.8
15/05/2017	11:35 a. m.	30.7	34	35	31.8	21.4
15/05/2017	11:50 a. m.	30.5	33.8	34.7	31.6	21.3
15/05/2017	12:05 p. m.	30.2	33.6	34.4	31.3	21.3
15/05/2017	12:20 p. m.	30	33.3	34.2	31.1	21.1
15/05/2017	12:35 p. m.	29.8	33.1	34.1	30.9	20.6
15/05/2017	12:50 p. m.	29.7	33	34	30.8	20.6
15/05/2017	01:05 p. m.	29.5	32.8	33.8	30.6	20.5
15/05/2017	01:20 p. m.	29.3	32.6	33.5	30.3	20.5
15/05/2017	01:35 p. m.	29.2	32.4	33.3	30.3	21.4
15/05/2017	01:50 p. m.	29.4	32.6	33.5	30.4	20.7
15/05/2017	02:05 p. m.	29.1	32.3	33.2	30.1	22.2
15/05/2017	02:20 p. m.	29.3	32.5	33.4	30.4	20.9
15/05/2017	02:35 p. m.	29.3	32.5	33.5	30.4	20.1
15/05/2017	02:50 p. m.	29.3	32.4	33.4	30.3	21.4
15/05/2017	03:05 p. m.	29.4	32.6	33.5	30.4	20.5
15/05/2017	03:20 p. m.	29.2	32.3	33.3	30.3	23
15/05/2017	03:35 p. m.	29.3	32.5	33.5	30.4	20.4
15/05/2017	03:50 p. m.	29.2	32.4	33.3	30.2	21.4
15/05/2017	04:05 p. m.	29.3	32.4	33.4	30.3	20.9
15/05/2017	04:20 p. m.	29.2	32.5	33.4	30.3	20
15/05/2017	04:35 p. m.	29	32.4	33.2	30	19.7
15/05/2017	04:50 p. m.	28.9	32.1	33.1	30	20.3
15/05/2017	05:05 p. m.	29	32.2	33.1	30	19.7
15/05/2017	05:20 p. m.	28.6	31.9	32.8	29.8	21.9
15/05/2017	05:35 p. m.	28.8	32	32.9	29.9	20
15/05/2017	05:50 p. m.	28.8	32	32.9	29.8	19.8
15/05/2017	06:05 p. m.	28.7	31.9	32.8	29.8	20.8
15/05/2017	06:20 p. m.	28.8	32	33	29.9	20
15/05/2017	06:35 p. m.	28.6	31.8	32.8	29.7	21.5

## Calor específico

Ensayo 1, mortero cemento-polvo de piedra 1:3

Datos de los canales del TermoPar SR630		
Fecha	Hora inicio	Termopar 1
27/11/2017	03:00 p. m.	24.8
27/11/2017	03:15 p. m.	24.8
27/11/2017	03:30 p. m.	28.1
27/11/2017	03:45 p. m.	31.2
27/11/2017	04:00 p. m.	31.4
27/11/2017	04:15 p. m.	31.4
27/11/2017	04:30 p. m.	31.4
27/11/2017	04:45 p. m.	31.4
27/11/2017	05:00 p. m.	31.3
27/11/2017	05:15 p. m.	31.3
27/11/2017	05:30 p. m.	31.1