



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

**“CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS
DE MUROS DE MAMPOSTERÍA DE LA REGIÓN DE AGUASCALIENTES
CON TÉCNICA CONSTRUCTIVA MAYA DE MORTERO DE CAL CON
RESINA DEL ÁRBOL DE CHUKUM (*Havardia Albicans*)”**

PRESENTA:

Ing. Elves Cabrera Contreras

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

TUTOR:

Dr. Miguel Ángel Soto Zamora

COMITÉ TUTORAL:

**Dr. Francisco Mercado Díaz de León
Dra. Lorena Vargas Rodríguez**

Aguascalientes, Ags. 27 de noviembre de 2025

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CARTA DE VOTO APROBATORIO

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T E

Por medio del presente como **DIRECTOR** designado del estudiante **ELVES CABRERA CONTRERAS** con ID 538543 quien realizó *La tesis* titulada: **CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MUROS DE MAMPOSTERÍA DE LA REGIÓN DE AGUASCALIENTES CON TÉCNICA CONSTRUCTIVA MAYA DE MORTERO DE CAL CON RESINA DEL ÁRBOL DE CHUKUM. (HAVARDIA ALBICANS)**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en la fracción IX del Artículo 43 del Reglamento General de Posgrados, doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permite emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 25 de noviembre de 2025.



Dr. Miguel Ángel Soto Zamora
Director de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado

CARTA DE VOTO APROBATORIO

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T E

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **ELVES CABRERA CONTRERAS** con ID 538543 quien realizó *La tesis* titulada: **CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MUROS DE MAMPOSTERÍA DE LA REGIÓN DE AGUASCALIENTES CON TÉCNICA CONSTRUCTIVA MAYA DE MORTERO DE CAL CON RESINA DEL ÁRBOL DE CHUKUM. (HAVARDIA ALBICANS)**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en la fracción IX del Artículo 43 del Reglamento General de Posgrados, doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permite emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *él* pueda continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
“Se Lumen Proferre”
Aguascalientes, Ags., a 25 de noviembre de 2025.

Dr. Francisco Mercado Díaz de León
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T E

Por medio del presente como **ASESORA** designado del estudiante **ELVES CABRERA CONTRERAS** con ID 538543 quien realizó *La tesis* titulada: **CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MUROS DE MAMPOSTERÍA DE LA REGIÓN DE AGUASCALIENTES CON TÉCNICA CONSTRUCTIVA MAYA DE MORTERO DE CAL CON RESINA DEL ÁRBOL DE CHUKUM. (HAVARDIA ALBICANS)**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en la fracción IX del Artículo 43 del Reglamento General de Posgrados, doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *él* pueda continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“Se Lumen Proferre”
Aguascalientes, Ags., a 25 de noviembre de 2025.


Dra. Lorena Vargas Rodríguez
Asesora de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Dept. Gestión Integral.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 02
Emisión: 13/08/25

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Fecha de dictaminación (dd/mm/aaaa): 25/11/2025

NOMBRE: Elves Cabrera Contreras ID 538543

PROGRAMA: MAESTRÍA EN INGENIERIA CIVIL LGAC (del posgrado): ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCION

MODALIDAD DEL PROYECTO DE GRADO: Tesis (X) *Tesis por artículos científicos **Tesis por Patente Trabajo Práctico ()

Caracterización de las Propiedades físicas y mecánicas de muros de mampostería de la región de Aguascalientes con técnica constructiva Maya de mortero de cal con resina del árbol de Chukum. (Havardia Albicans)

TÍTULO: Se caracterizó la aplicabilidad de un aditivo orgánico para la mejora del comportamiento de los morteros para mampostería que se utilizan en la construcción de vivienda de interés social y construcción en general.

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): SI, NO, NA (No Aplica)

<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>	
SI	El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI	La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI	Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI	Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI	Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI	El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI	Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
NO	Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI	Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)

<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>	
SI	Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Posgrados
SI	Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc.)
SI	Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial
NA	Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario (En caso de que corresponda)
SI	Coincide con el título y objetivo registrado
SI	Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI	Tiene el CVU de la SECHIPI actualizado
NA	Tiene el o los artículos aceptados o publicados y cumple con los requisitos institucionales (en caso de que proceda)

<i>*En caso de Tesis por artículos científicos publicados (completar solo si la tesis fue por artículos)</i>	
NA	Aceptación o Publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto según el nivel del programa
NA	El (la) estudiante es el primer autor(a)
NA	El (la) autor(a) de correspondencia es el Director (a) del Núcleo Académico
NA	En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
NA	Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados

<i>**En caso de Tesis por Patente</i>	
NA	Cuenta con la evidencia de solicitud de patente en el Departamento de Investigación (anexarla al presente formato)

Con base en estos criterios, se autoriza continuar con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Sí X

No _____

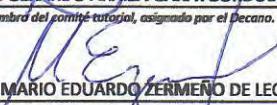
Elaboró:

*NOMBRE Y FIRMA DEL(LA) CONSEJERO(A) SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCION:

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NA de la LGAC correspondiente distinto al director o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano.

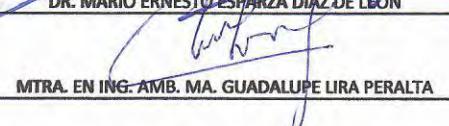
NOMBRE Y FIRMA DEL COORDINADOR DE POSGRADO:

FIRMAS

DR. GERARDO ARAIZA GARAYGORDOBIL

DR. MARIO EDUARDO ZERMENO DE LEON

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:


DR. MARIO ERNESTO ESPARZA DIAZ DE LEON

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado
 En cumplimiento con el Art. 24 fracción V del Reglamento General de Posgrado, que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: Proponer criterios y mecanismos de selección, permanencia, egreso y titulación de estudiantes para asegurar la eficiencia terminal y la titulación y el Art. 28 fracción IX, atender, asesorar y dar el seguimiento del estudiantado desde su ingreso hasta su titulación.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación.

En primer lugar, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, por proporcionarme los recursos académicos.

De manera especial, a al Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción así al Consejo Académico de la Maestría en Ingeniería Civil,

Agradezco al Dr. Miguel Ángel Soto Zamora quien con su orientación, exigencia académica y consejos oportunos contribuyeron de manera significativa a la culminación de este proyecto.

Al Dr. Francisco Mercado Díaz de León y a la Dra. Lorena Vargas Rodríguez que, de forma directa o indirecta, brindaron su tiempo, conocimientos y apoyo para la elaboración de esta tesis. A cada uno de ellos, mi más profundo agradecimiento.

De manera especial, expreso mi gratitud hacia mi familia, por su apoyo constante, comprensión y confianza depositada en mí durante cada etapa de mi preparación. Su respaldo ha sido un pilar fundamental para la culminación de esta meta.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ACRÓNIMOS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT.....	8
I. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. PRÓLOGO	10
1.2. OBJETIVO GENERAL	10
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.4. ALCANCES	11
1.5. JUSTIFICACIÓN	11
1.6. HIPÓTESIS.....	14
II. ESTADO DEL ARTE	15
2.1. Los morteros de cal ayer y hoy	16
2.2. El efecto de aditivos orgánico en los morteros de cal.....	18
2.3. El mortero en los muros	21
III. MARCO TEÓRICO.....	26
3.1. El mortero maya de cal.....	27
3.2. El mortero moderno	28
3.3. Dosificación de los morteros	29
3.4. El chukum.....	30
3.5. Historia del uso de chukum	31
3.6. Mejoramiento de las propiedades físicas de los morteros con chukum.....	32
IV. METODOLOGÍA	35
4.1. METODOLOGÍA	36
4.2. Granulometría del agregado fino	36
4.3. Absorción de inicial y total de agua en tabiques	38
4.4. Peso Volumétrico Seco suelto y Peso Volumétrico Seco Compacto	39
4.5. Tamaño de la muestra y Diseño de Mezcla	41
4.6. Fluidez	42

4.7.	Resistencia a la compresión en morteros.....	43
4.8.	Resistencia a la compresión de tabiques.....	43
4.9.	Adherencia por esfuerzo cortante.....	44
4.10.	Resistencia a la compresión diagonal en muretes.....	45
4.11.	Resistencia a la compresión en pilas	46
4.12.	Absorción por presión parcial.....	47
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
5.1.	Granulometría del agregado fino	50
5.2.	Absorción de inicial y total de agua en tabiques	50
5.3.	Peso Volumétrico Seco suelto y Peso Volumétrico Seco Compacto	51
5.4.	Resistencia a la compresión en morteros.....	52
5.5.	Resistencia a la compresión de tabiques.....	53
5.6.	Adherencia por esfuerzo cortante.....	54
5.7.	Resistencia a la compresión diagonal en muretes.....	55
5.8.	Resistencia a la compresión en pilas	56
5.9.	Absorción por presión parcial.....	57
VI.	CONCLUSIONES	58
6.1.	Conclusión general.....	59
6.2.	Conclusiones específicas.....	59
6.3.	Nichos de investigación	60
	BIBLIOGRAFÍA.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Construcciones encima de fallas geológicas	12
Ilustración 2 Los 10 PRONACES de SECIHTI.....	12
Ilustración 3 Acabado en muro con aplanado de mortero con Chukum	13
Ilustración 4 Proceso de carbonatación	16
Ilustración 5 Mortero de cal en el sitio arqueológico Maya de Copán, Honduras	17
Ilustración 6 Variación de masa a lo largo de la prueba de congelación-descongelación.....	18
Ilustración 7 Influencia en la adición de materia orgánica en el volumen total de poros	20
Ilustración 8 Resina pura de Chukum.....	21
Ilustración 9 Restauración de la zona maya de Tulúm.....	22
Ilustración 10 Muro de tabique.....	23
Ilustración 11 Fallas en muros.....	23
Ilustración 12 Acabado de chukum	24
Ilustración 13 Relieve de estuco de cal en el templo de los Mascarones, Kohunlich, Quintana Roo 27	
Ilustración 14 Roca caliza Tzal	28
Ilustración 15 Proporcionamientos para la fabricación de 1m ³ de mortero cal-arena.....	30
Ilustración 16 Árbol de Abardia Albicans	31
Ilustración 17 Restauración en Chichén Itzá de estructuras prehispánicas.....	32
Ilustración 18 Proceso de maceración de la corteza del árbol de chukum.....	33
Ilustración 19 Tamiz ASTM	37
Ilustración 20 Tamaño de las partículas del agregado grueso	37
Ilustración 21 Registro de la masa inicial de los tabiques.....	38
Ilustración 22 (Arriba) diagrama de la colocación de las piezas (Abajo) Absorción inicial de agua de las piezas de tabique rojo.....	38
Ilustración 23 Pesaje de espécimen sumergido	39
Ilustración 24 Pesaje de la masa del recipiente con la arena suelta.....	40
Ilustración 25 Compactación inducida a la tercera capa del ensaye de peso volumétrico seco compacto.....	40
Ilustración 26 Diagrama de medición de la mesa de fluidez.....	42
Ilustración 27 Falla del cubo de mortero de cal	43
Ilustración 28 Aplicación de carga en el tabique	43
Ilustración 29 Espécimen de ensaye de adherencia por esfuerzo cortante	44

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Ilustración 30 (Izquierda) Muestra posicionada en la prensa, (Derecha) Muestra con falla por falta de adherencia	44
Ilustración 31 Colocación de los cabezales en las esquinas del murete	45
Ilustración 32 Falla del murete de mampostería	45
Ilustración 33 Obtención de la resistencia a compresión diagonal	46
Ilustración 34 Pilas de mampostería de 6 filas.....	46
Ilustración 35 Falla de la pila a compresión	47
Ilustración 36 Proceso de prueba con los tubos de Karsten sobre la superficie del mortero	48
Ilustración 37 Curva de granulometría de la arena utilizada	50
Ilustración 38 Coeficiente de capilaridad C_b en $g/(cm^2 min^{0.5})$	51
Ilustración 39 Resistencia a la compresión de cubos de mortero de cal a una edad de 4 meses de endurecimiento.....	52
Ilustración 40 Densidad de cubos de mortero de cal.....	53
Ilustración 41 Resistencia a la compresión de tabiques rojo cocido	53
Ilustración 42 Desprendimiento total entre el tabique y el mortero	54
Ilustración 43 Resistencia a la compresión diagonal de muretes de mampostería.....	55
Ilustración 44 Resistencia a la compresión de pilas	56
Ilustración 45 Resistencia a la compresión de pilas	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tabla de mortero de cemento blanco con polvo de piedra caliza triturada	17
Tabla 2 Clasificación de los principales compuestos presentes en la resina de chukum y sus efectos en morteros	34
Tabla 3 Tamaño de las muestras a elaborar	41
Tabla 4 Proporcionamientos 1:5 de mortero cal-arena con la resina necesaria para su grado de disolución	42
Tabla 5 Revenimiento permisible para los morteros en función de la absorción de la pieza	42
Tabla 6 Factores correctivos por esbeltez de las pilas	47
Tabla 7 Peso volumétrico seco suelto y compacto de la arena	51

ACRÓNIMOS

Ca(OH) ₂	hidróxido de calcio
CaCO ₃	carbonato de calcio
CO ₂	dióxido de carbono
CO	óxido de calcio
kg/cm ²	unidad de presión en sistema métrico decimal
m°C/W	unidad de resistencia térmica de un material
PA	unidad de presión en sistema internacional (Pascal)
SR	sistema con resina
ST	sistema testigo
W/m°C	unidad de conductividad térmica de un material

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

RESUMEN

Desde la época prehispánica la civilización maya adicionaba la resina de árboles endémicos de la península de Yucatán para mejorar las características de los morteros a base de cal. Este análisis experimental tiene como objetivo el evaluar el efecto de la adición de la resina del árbol de chukum y como este está siendo impulsado en la actualidad para su uso en la industria de la construcción. El objetivo del estudio consiste en fabricar y ensayar especímenes de morteros de cal adicionados con la resina y observar las características de resistencia a la compresión y adherencia por esfuerzos cortantes. Lo anterior con el fin de contrastar el comportamiento mecánico de un mortero de cal con la adición de la resina orgánica, contra el de una segunda muestra de las mismas proporciones y materiales de la mezcla de mortero sin resina. El estudio comprende el proceso constructivo de mortero de cal con resina de chukum utilizado en la antigüedad y su posible aplicación en las construcciones modernas desde un enfoque mecánico y de resistencia.

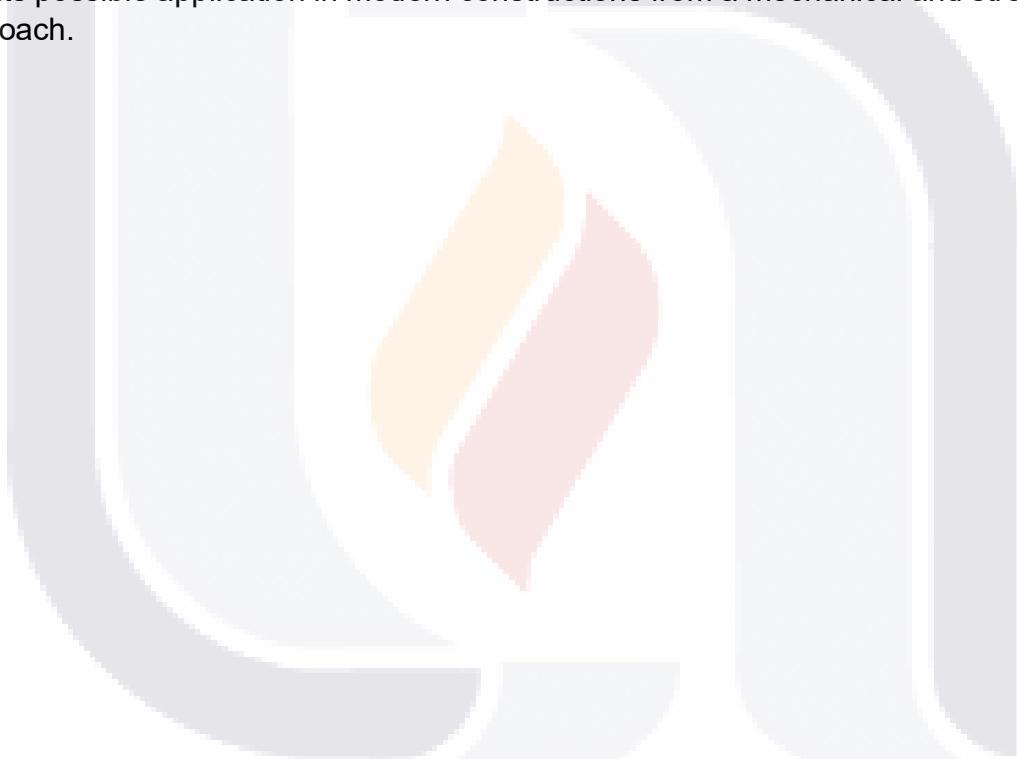


TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS 7

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

ABSTRACT

Since pre-Hispanic times, Mayan civilization has added resin from endemic trees of the Yucatán peninsula to improve the characteristics of lime-based mortars. This experimental analysis aims to evaluate the effect of the addition of the chukum tree resin and how this is being driven today for its use in the construction industry. The objective of the study is to manufacture and test specimens of lime mortars added with resin and to observe the characteristics of compression resistance and adhesion by cutting efforts. The above in order to contrast the mechanical behavior of a lime mortar with the addition of organic resin, against that of a second sample of the same proportions and materials of the mortar mix without resin. The study includes the construction process of lime mortar with chukum resin used in antiquity and its possible application in modern constructions from a mechanical and strength approach.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



I. INTRODUCCIÓN

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

1.1. PRÓLOGO

Los morteros en la construcción de mamposterías vernáculas han desempeñado un papel importante a lo largo de la historia ya que actúa como un elemento cohesionante que les da estabilidad y durabilidad a las edificaciones tradicionales. Antes del desarrollo de los cementos modernos, el ser humano recurrió a los recursos disponibles en su entorno, esto generaba la elaboración de morteros a base de cal, tierra, arena y, en muchos casos, con aditivos orgánico que modificaban las propiedades para la adaptación climática, constructiva y cultural de la región.

Los aditivos como mucílagos vegetales, sabias y resinas, fibras naturales que son de origen vegetal no solo mejoraban la trabajabilidad de la mezcla, si no también su plasticidad o adherencia del mortero, también prolongaba la vida útil y por ende les confieren un rendimiento superior frente a los agentes ambientales. Su utilización ha sido documentada en civilizaciones como las mesoamericanas, egipcias, romanas y culturas mediterráneas y asiáticas, esto evidencia un profundo conocimiento empírico acerca de los materiales y la capacidad de optimización de los procesos constructivos con recursos locales.

Bajo este contexto el proyecto de alinea a los objetivos de los Programas Nacionales Estratégicos de Vivienda de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación el cual impulsa investigaciones que se orientan en el fortalecimiento de la vivienda adecuada, producción social de hábitat y el uso de soluciones constructivas que son sostenibles y culturalmente pertinentes. Este trabajo al estudiar morteros tradicionales y la incorporación de aditivo orgánico aporta conocimiento que inciden en estrategias contemporáneas de mejoramiento y conservación de viviendas en especial donde las técnicas vernáculas siguen siendo parte esencial del entorno.

En el estudio de construcciones vernáculas, mas precisamente en las mamposterías se busca el comprender la composición y comportamiento de los morteros ya que resulta esencial para la valoración de la tecnología constructiva ancestral para preservar el patrimonio arquitectónico y buscar una orientación a las prácticas contemporáneas de construcción y restauración. La recuperación de las técnicas constructivas junto a un análisis científico de los componentes abre una vía para soluciones sostenibles que respeta el entorno como la identidad cultural de los territorios.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de un mortero de cal adicionado con resina orgánica del árbol de Chukum y su implementación dentro del sistema constructivo de muro de tabique rojo recocido junteado y aplanado con mortero de cal para analizar el comportamiento físico y estructural del sistema constructivo

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A. Determinar por medio de la investigación documental la condición actual del estado del arte
- B. Determinar las características físicas de los materiales para la elaboración de mezclas de mortero de cal en proporción 1:5, así como una mezcla adicionando un 10% y 15% de grado de disolución de resina de chukum
- C. Determinar las características físicas del mortero en estado fresco y endurecido
- D. Determinar las propiedades físicas y mecánicas del sistema constructivo de muro de tabique recocido junteado con mortero de cal
- E. Analizar los resultados obtenidos mediante un análisis de comparativa de medias estadísticas de las características del material, del sistema y como envolvente

1.4. ALCANCES

La investigación tiene como alcance una descripción de las características físico-mecánicas de los agregados pétreos y morteros de cal en cada uno de los sistemas constructivos ST y SR. Estos alcances estarán limitados bajo a la normatividad mexicana en materia de agregados, cal, morteros y procesos constructivos de muros de mampostería, así como seguir en tiempo y forma con el cronograma del proyecto de investigación. En general se delimitará los alcances bajo los siguientes aspectos:

- Se utilizará arena de la localidad caracterizado en laboratorio y cal apagada para la elaboración de las mezclas de mortero.
- La resina a utilizar en la mezcla será de chukum comercial en su presentación líquida.
- Las piezas de tabique rojo a utilizar se conseguirán en la ciudad de Aguascalientes.

1.5. JUSTIFICACIÓN

En el estado de Aguascalientes se presentan problemas estructurales originados por la subsidencia del suelo, en edificaciones es fácil apreciar las deformaciones y fallas en muros dado que estos son elementos muy susceptibles a deformaciones. Como se muestra en la ilustración 1 se observa como los asentamientos por las fallas geológicas generan las fracturas en los muros de las viviendas alrededor de las zonas de afectación.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



Ilustración 1 Construcciones encima de fallas geológicas

Nota: tomado de <https://www.elsoldelcentro.com.mx/local/aguascalientes-agrietado-7124907.html>

Esta investigación se encuentra dentro de los objetivos del PRONACE de Vivienda de la SECIHTI como muestra la ilustración 2 el cual impulsa la generación de conocimiento orientado a mejorar la calidad de la vivienda y el promover soluciones constructivas sostenibles que sean pertinentes culturalmente para su aplicación. Con este enfoque el estudio de morteros enriquecidos con resina de chukum adquiere relevancia estratégica al buscar el recuperar un saber constructivo ancestral de la península de Yucatán y es evaluado desde una perspectiva científica.



Ilustración 2 Los 10 PRONACES de SECIHTI

Nota: tomado de <https://secihti.mx/que-son-los-pronaces/>

En la península de Yucatán se han realizado diferentes restauraciones a edificaciones patrimoniales a base de morteros de cal adicionados con resinas orgánicas de árboles endémicos como son el Ramón (*Brosimum alicastrum*), el

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Habín (*Piscidia piscipula*) y el Kabal Pixoy (*Guazuma ulmifolia*). Este proceso se llevó a cabo mediante la maceración de las cortezas de los árboles y utilizado el agua macerada para el apagado de la cal viva, adicionado agua de maceración a la mezcla con sascab, roca calcárea deleznable descrita como caliza descompuesta. (Lorenzo Mora & Carrascosa Moliner, 2014)

El acabado que presentan las restauraciones como ejemplo de la ilustración 3 ha generado en los últimos un interés a la sociedad, tanto así, que es utilizado en acabados de exterior y recubrimientos de piscinas por su baja permeabilidad y colores muy estéticos por la característica de los materiales pétreos de la península de Yucatán. Los áridos de la zona tienden a ser de color blanquecino que al ser mezclado con las resinas orgánicas adquieren tonalidades de un amarillo cremoso muy estético, el cual, ya no requiere de un acabado final de pintura.



Ilustración 3 Acabado en muro con aplano de mortero con Chukum

Nota: tomado de <https://pastadechukum.com/chukum-el-legado-yucateco-al-diseno-y-la-arquitectura/>

El chukum ha sido utilizado históricamente en la península de Yucatán para conferir impermeabilidad, durabilidad y estabilidad a los recubrimientos en las construcciones vernáculas. Gracias a su incorporación en morteros son una alternativa que combinan materiales locales, bajo impacto ambiental y desempeño comprobado históricamente, se alinean a la necesidad de desarrollar tecnologías apropiadas para la vivienda en contexto rural, patrimonial y de producción social del habitat, así, el proyecto contribuye al PRONACE al recuperar y buscar una validación a los procesos constructivos que busca una alternativa de reducción de costos al disminuir la dependencia de insumos industriales y también el fortalecer la identidad cultural de las regiones.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

El estudio de este trabajo comprende en evaluar dos sistemas constructivos de muros de tabique rojo recocido, junteados con mortero de cal. La diferencia de los sistemas radica en el sistema testigo (ST) y el sistema con resina (SR) de chukum con un grado de disolución en agua de mezclado en un 10% y 15%.

El trabajo se lleva a cabo en tres etapas donde se evalúa en la primera etapa el comportamiento del mortero de cal como material, estudiando su resistencia a la compresión y módulo de elasticidad de cubos de mortero de cal, y la adherencia por esfuerzo cortante entre el mortero de cal y las piezas de tabique. La segunda etapa comprende el estudiar el comportamiento estructural del sistema constructivo mediante los ensayos de resistencia a la compresión diagonal y módulo de cortante en muretes, como también el ensayo de compresión simple y módulo de elasticidad de pilas. Por último, la tercera etapa busca estudiar las propiedades físicas del sistema aplicado al sistema constructivo como son su permeabilidad y absorción de agua, su resistencia y conductividad térmica, y su decoloración por exposición solar.

Este trabajo busca proporcionar una alternativa constructiva para la ciudad de Aguascalientes con una aplicación estructural y estética para las viviendas de la ciudad, a su vez, ser utilizado como un procedimiento de restauración arquitectónica para la zona. En consecuencia, esta investigación no solo busca un valor académico sino también un impacto práctico y social al aportar una alternativa técnica fundamentada que puede incidir en políticas de vivienda, en estrategias de conservación del patrimonio y programas de construcción. Su pertinencia se encuentra en fortalecer la resiliencia de los sistemas constructivos vernáculos y así ofrecer opciones que contribuyan a una vivienda digna, sostenible y culturalmente significativa.

1.6. HIPÓTESIS

¿La implementación de la técnica maya de mortero de cal con adición de resina orgánica del árbol de Chukum mejora las propiedades físicas y mecánica del sistema constructivo de muros de mampostería de tabique recocido?



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

2.1. Los morteros de cal ayer y hoy

Se sabe que desde la antigüedad los morteros de cal se han utilizado en la construcción, con evidencia en su uso por los egipcios, los romanos e indios antiguos. Las antiguas civilizaciones descubrieron que la cal producía un material flexible que se endurecía con el tiempo cuando la piedra caliza se quemaba y se combinaba con agua. Los romanos usaban la cal mezclada con arcilla cocida o ceniza volcánica, que al agregarle agua esta se endurecía considerablemente, convirtiéndola en un componente de construcción. (Smith, 2023)

El proceso de carbonatación es la reacción del dióxido de carbono (CO_2) entre ciertos materiales dando como resultado la formación de carbonatos. En el contexto para la construcción, la carbonatación es la reacción química entre el dióxido de carbono de la atmósfera y el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) presente en las mezclas de mortero de cal, dando lugar a la formación de carbonato de calcio (CaCO_3). El proceso es importante ya que contribuye al endurecimiento y la durabilidad de los materiales a base de cal. (León-Martínez et al., 2021)

Como se muestra en la ilustración 4 se describe el proceso de la carbonatación en una fase repetitiva, donde en la industria de la construcción principalmente se trabaja directamente con la en forma de pasta para trabajar o desde el apagado de la cal viva, que es el proceso en el que el óxido de calcio es sumergido en agua para iniciar su proceso de hidratación.



Existen diferentes tipos de aditivos a las mezclas de cal, siendo estos de origen inorgánico u orgánico, en este punto se enfoca a los orgánicos que dependen mucho de los materiales disponibles en las zonas siendo el ejemplo de frutos producidos en las localidades, obtención de resinas de árboles endémicos o

productos obtenidos de origen animal por parte de las granjas industriales o de explotación animal.

La resistencia mecánica de los morteros mayas se mejora mediante interacciones fisicoquímicas, los sustratos de yeso con cal con aditivos orgánicos mejoran la resistencia mecánica, siendo estos aminoácidos que controlan el crecimiento de cristales de carbonato de calcio. (Magaloni et al., 1995)



Ilustración 5 Mortero de cal en el sitio arqueológico Maya de Copán, Honduras

Nota: tomado de <https://www.milenio.com/internacional/cientificos-develan-secreto-constructores-mayas-estudian-morteros>

El mortero elaborado con cemento blanco y con resina chukum mostró mejor resistencia que el mortero tradicional, teniendo en estado fresco una mayor fluidez que el mortero tradicional. Muestras de mortero de chukum analizadas para resistencia a la compresión a los 28 días es mayor que el mortero tradicional. (Melken et al., 2019)

Como se muestra en la tabla 1, la mejor sustitución de agua por resina de chukum se encuentra en el 20%, esta información es el punto de partida en la toma de decisión de la sustitución a trabajar.

Tabla 1 Tabla de mortero de cemento blanco con polvo de piedra caliza triturada

Muestras con edad de 28 días	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Resistencia al esfuerzo cortante (kg/cm ²)
Testigo	288.21	9.84
5% chukum	295.23	10.85
10% chukum	323.26	11.49
20% chukum	387.55	14.08

Nota: transscrito de Melken et al., 2019

La resina de chukum tiene una conductividad térmica de 0.623 W/m °C, aplicado como un mortero la resistencia térmica total para los sistemas de pared es 2.274 m² °C/W y en losas de azotea la resistencia térmica total para sistemas de techo con madera y calcreto varía, a pesar de ser variante el mortero con chukum es un aislante térmico superior para techos. (Garcia Noverola et al., 2022)

2.2. El efecto de aditivos orgánico en los morteros de cal

Como antes mencionado, la adición de compuestos orgánicos en las mezclas de mortero de cal ha sido realizado desde la antigüedad, en este apartado se muestra diferentes adiciones orgánicas de origen animal realizadas en estudios.

La adición de sangre animal residual reduce eficazmente la absorción capilar de agua en los morteros basados en la caliza, lo cual es crucial para mejorar su durabilidad y resistencia a la entrada de humedad. La inclusión de residuos de sangre animal mejora significativamente la resistencia a la congelación-descongelación de los morteros basados en la caliza, lo que indica una mayor durabilidad en condiciones ambientales desafiantes (Dinç-Şengönül et al., 2023)

Adicionar colágeno de pescado en las lechadas mejora las propiedades mecánicas debido a una mayor tasa de carbonatación, potenciando la resistencia general, no afecta la densidad húmeda y la capacidad de retención de agua, pero afecta positivamente la fluidez, especialmente cuando se combina con composiciones de relleno específicas. También afecta el proceso de carbonatación, lo que lleva a velocidades de carbonatación más rápidas, que juegan un papel crucial en el mantenimiento de la resistencia a la compresión en el estado endurecido. (Padovnik & Bokan-Bosiljkov, 2023)

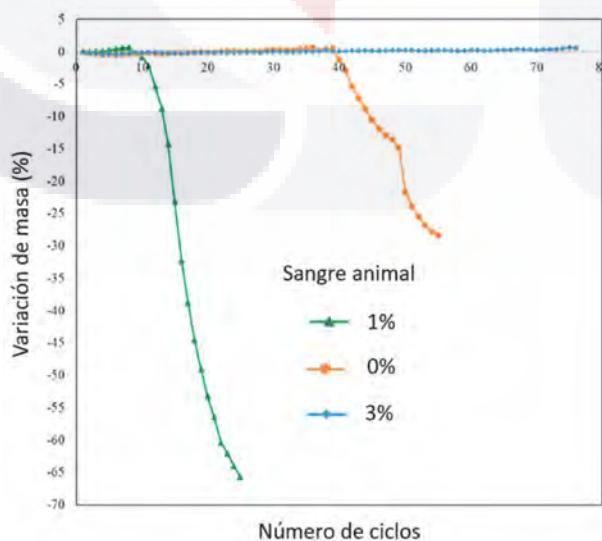


Ilustración 6 Variación de masa a lo largo de la prueba de congelación-descongelación
Nota: transcrito de Dinç-S, engönül et al., 2023

Cómo se muestra en la ilustración 6, la influencia porcentual de sangre animal en las mezclas reduce significativamente la variación de la masa en los ciclos de congelación y descongelación. Para los morteros de aditivos orgánicos de origen vegetal mejora las fases de hidratación y carbonatación de los morteros de cal, esta característica es influida por el alto contenido de carbohidratos, grasas y proteínas influyen en la formación de poros en la matriz del mortero. Existen diversas adiciones orgánicas a las mezclas de mortero, y cada una influye de manera particular.

Una mezcla de mortero de cal preparado con agregado arcilloso de caolinita y un 4% de concentración de grosella zante (*Vitis vinifera*) a la mezcla mostró una resistencia de 3.9 N/mm² al día 90. La adición orgánica mejoró las fases de hidratación y carbonatación generando una mayor formación de calcita y una menor ingesta de agua. (Jayasingh & Baby, 2022)

La adición orgánica de uva roja fermentada influyó en la carbonatación, superando a las muestras de referencia y no fermentadas, con un 6% de adición orgánica con 3 días de fermentación incrementó la resistencia mecánica en 49%. La adición orgánica fermentada aceleró la carbonatación, mejorando significativamente la resistencia. (Jayasingh & Selvaraj, 2022)

La adición de azúcar de palma y kadukkai mejora la resistencia del mortero y reduce el tamaño de los poros, también mejoran la adhesión entre las partículas de cal en el mortero. La adición de azúcar de palma aumenta la densidad aparente y reduce la porosidad total del mortero. El polímero orgánico en la matriz de cal mejora la fuerza de unión entre las partículas de cal generando nuevos compuestos en el mortero modificado. (Thirumalini et al., 2018)

El mortero de cal con bioaditivos de azúcar de palmera y myrobalan negro muestra propiedades mejoradas de resistencia y durabilidad. Las pruebas de carbonatación revelan diferentes niveles de carbonatación en las muestras. El análisis fitoquímico identifica alcaloides, terpenoides, fenoles, flavonoides, taninos y saponinas. (Manoharan & Umarani, 2022)

Los aditivos de azúcar de palma y nuez de gallina mejoran la durabilidad y el rendimiento de los morteros de cal. La trabajabilidad mejoró con una relación de agua a cal mayor al 0.50, pero más allá de 0.65 resultó en sangrado. Los morteros muestran una resistencia a los ácidos superior. (James & Sivasankarapillai, 2022)

La adición de naranjo dulce mejora la trabajabilidad, las propiedades mecánicas y la durabilidad del mortero de cal. El extracto orgánico mejora la resistencia del mortero de cal al transformar el hidróxido de calcio dentro de la matriz. (George & Jayasingh, 2021)

El aditivo orgánico de fruto de la higuera al 4% mejora la tasa de carbonatación y la resistencia mecánica. Los polisacáridos en los aditivos orgánicos juegan un papel

central en el desempeño del mortero generando una velocidad de carbonatación acelerada debido a la adición orgánica y molienda del agregado. Las muestras con aditivos orgánicos muestran un tono de color más claro, lo que indica carbonatación. (Jayasingh et al., 2022)

Los aditivos orgánicos de nopal y marigumpuli en la matriz de los morteros de cal mejoran la resistencia a la compresión y reducen la porosidad. Estos aditivos orgánicos reducen la afinidad por el agua y aumentan la naturaleza hidrofóbica del mortero, generando una opción de mortero de cal con propiedades mejoradas por aditivos naturales para la restauración de edificios históricos. (Ravi et al., 2018)

Como se muestra en la ilustración 7, la diferencia de aplicar una adición orgánica vegetal a las mezclas de mortero de cal reduce el volumen total de los poros.

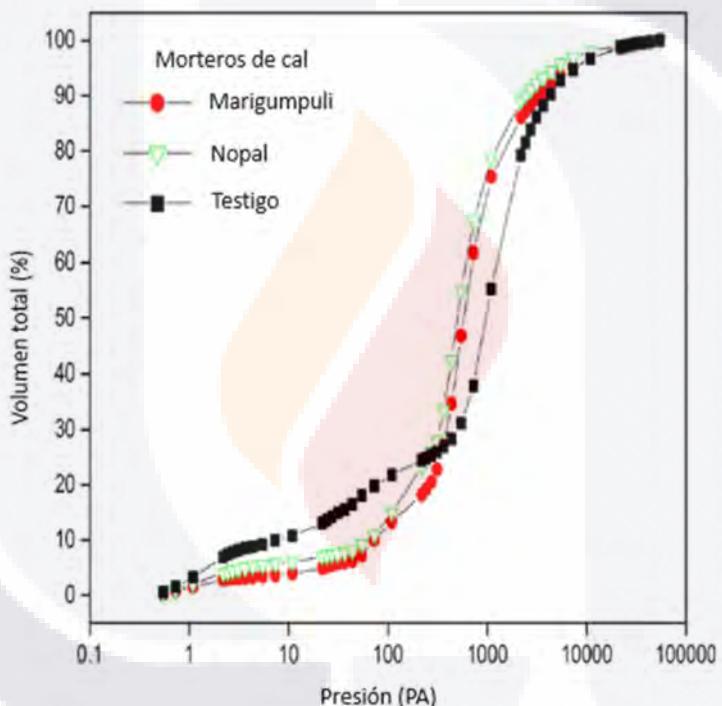


Ilustración 7 Influencia en la adición de materia orgánica en el volumen total de poros
Fuente: transcrito de Ravi et al., 2018

Existen procesos en que se aprovecha la resina de árboles endémicos como es la maceración, que consiste en la extracción de un líquido de un sólido mediante la sumersión del sólido en agua. Este es el caso de la extracción de resina de cortezas de árboles de la península de Yucatán.

Se ha estudiado que el uso de agua fermentada orgánicamente en morteros de cal mejora la trabajabilidad y el rendimiento mecánico, generando una carbonatación forzada y la generación de nuevas fases minerales en la carbonatación, lo que modifica la estructura porosa y mejora la resistencia y durabilidad. La composición

de la materia orgánica en proporciones de carbohidratos, grasas y proteínas influyen en la estructura final del poro y las propiedades mecánicas de los morteros de cal. Los aditivos orgánicos ricos en carbohidratos promueven microestructuras uniformes y resistencias mejoradas, mientras que los orgánicos ricos en grasas no mejoran el rendimiento del mortero. (Raneri et al., 2023)



Ilustración 8 Resina pura de Chukum

Fuente: <https://pastadechukum.com/dos-tipos-de-corteza-de-chukum/>

En la ilustración 8 se muestra la resina pura del árbol de chukum. La resina es de tonalidad morado oscuro, obtenido de la corteza del árbol de Chukum, además de agua, el extracto acuso contiene alrededor de un 0.8% de compuestos sólidos totales procedentes de la planta entre los que se encuentran saponinas, polifenoles, taninos, carbohidratos y minerales. Principalmente se usa en superficies reduciendo la formación de hongos y protege las superficies de la humedad, y produce una apariencia de tonalidad color hueso a partir de sus tintes. (REKUM, 2021)

2.3. El mortero en los muros

Son muy importante las características físicas y mecánicas de las pastas de cal y los morteros para la restauración. Para las actividades de restauración es muy importante una mayor porosidad en pastas y morteros de cal ya que en comparación con el cemento este genera una superficie con menor porosidad. (Navarro-Mendoza et al., 2023)

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



Ilustración 9 Restauración de la zona maya de Tulúm

Fuente: <https://inah.gob.mx/boletines/el-promeza-ayuda-a-integrar-base-precisa-sobre-la-conservacion-de-murales-y-bienes-decorativos-de-tulum>

Como se muestra en la ilustración 9 gracias a la compatibilidad de la cal con los materiales de edificios antiguos que están construidos con piedra, ladrillo y otros tipos de morteros a base de cal. La cal permite una mejor adherencia y compatibilidad con estos materiales, respetando la integridad estructural y estética original del edificio.

Los grados de mortero influyen en el comportamiento estructural de la mampostería de bloques de concreto: Los morteros de grado inferior fallan por trituración de mortero y división de bloques, mientras que los de grado superior fallan principalmente por división por tracción en los bloques. Los tipos de lecho de mortero afectan el comportamiento estructural: La capa completa es más efectiva para bloques sólidos, mientras que la capa frontal es más eficiente para bloques huecos. El análisis del comportamiento de deformación revela diferencias en la deformación del mortero y las características de deformación basadas en la resistencia del mortero y los tipos de lecho. (Zahra et al., 2021)

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



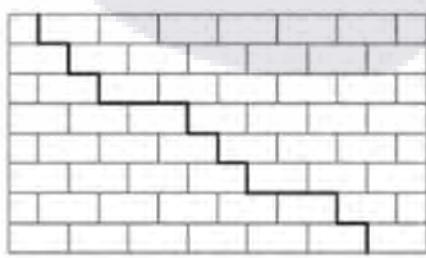
Ilustración 10 Muro de tabique

Fuente: <https://cementostorices.com/blog/construccion/tabique/>

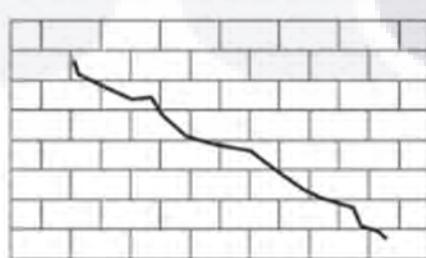
En la ilustración 10 se muestra el muro de tabique que es el sistema de construcción común en la ciudad de Aguascalientes, el comportamiento constructivo consta de un lecho de capa completa para piezas de tabique rojo. Existen otro tipo de aditivos a las mezclas de origen inorgánico que mejoran las características mecánicas de los morteros.

Las fibras de basalto mejoran la resistencia de morteros de cal, pero una dosis excesiva lo debilita, el estudio se enfoca en comportamientos mecánicos de mortero y la resistencia al cizallamiento de las interfaces de mampostería. (Tang et al., 2023)

Al utilizar un sistema constructivo de ceniza volante, cal y yeso, las paredes de mampostería de ladrillo muestran una mayor resistencia a la flexión con precompresión, la resistencia a la flexión paralela a las juntas de la cama es el doble que la perpendicular. Los desplazamientos laterales son mayores para doblar perpendicularmente a las juntas de la cama. La tensión de flexión por agrietamiento se puede predecir de cerca mediante el análisis elástico lineal. (Gourav & Venkatarama Reddy, 2018)



Falla por cortante



Falla por tension diagonal

Ilustración 11 Fallas en muros

Fuente: Elaboración propia

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

En la ilustración 11 muestra las fallas existentes en muros por efecto de cortante, la primera es mediante el desprendimiento del mortero de pega con los tabiques, este fenómeno es el de cortante por adherencia, la segunda falla por tensión diagonal surge al tener dos puntos de cargas que se comportan de manera que una diagonal se encuentra en compresión mientras que la segunda a tensión, la parte más frágil del sistema se encuentra en la diagonal en tensión donde falla el muro.

Los muros de mampostería de cal presentan una menor huella de carbono a comparación con otros materiales de construcción, la cal como aglutinante mejora la calidad del aire al absorber dióxido de carbono, reduciendo así las emisiones de carbono. A su vez, el estudio muestra que el mortero de cal con bioaditivos tiene una resistencia mejorada al sistema convencional y resalta que un espesor de 10 mm aumenta la resistencia de la pared más que un espesor de 15 mm. (Manoharan et al., 2023)



Ilustración 12 Acabado de chukum

Fuente: <https://www.tallermexicanodearquitectura.com/#CASA-DECO/8>

Cómo se muestra en la ilustración 12, en la ciudad de Mérida, Yucatán, se hace uso del acabado de chukum para el aplanado directo para piscinas y muros, jugando mucho con la estética regional de la piedra caliza, generando espacios limpios y llamativos a la vista por los juegos de colores que permite la característica de los agregados de la región combinado con los pigmentos naturales de la resina de chukum.

La implementación de cal en un sistema constructivo de muros contribuye a la resistencia general de estas, tiene una alta resistencia a la compresión y soporta fuerzas externas, también, tiene una propiedad autocurativa reparando grietas e imperfecciones a través del tiempo. Parte de la naturaleza de la cal es que permite

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

que la humedad se evapore evitando la humedad y acumulación de moho que pueden debilitar la estructura y con sus propiedades antibacterianas y antifúngicas naturales evitan el crecimiento de microorganismos mejorando aún más la durabilidad de los muros. (Ali et al., 2016)

La hidrofobicidad es la propiedad de los materiales o sustancias que repelen o resisten al agua, es una medida que como un material puede resistir a la penetración o absorción de agua. Los morteros de cal con alta hidrofobicidad son menos susceptibles al deterioro por congelación-descongelación experimentando menor pérdida de peso y manteniendo sus propiedades hidrofóbicas por períodos más largos. Se puede evaluar la hidrofobicidad midiendo parámetros de coeficiente de saturación y porosidad total, estas mediciones indican un nivel de repelencia de agua y su efectividad. (Fortes Revilla & Blanco Varela, 2001)





TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

3.1. El mortero maya de cal

La cal es uno de los aglutinantes mas utilizados en la historia de la construcción ya que ha desempeñado un rol importante en el desarrollo de los morteros actuales, revoques y enjarres desde la antigüedad. Tiene origen desde las civilizaciones mesoamericanas, egipcia, griega y romana, quienes descubrieron que la cal es un material capaz de dar cohesión, trabajabilidad y durabilidad a estructuras.

El material de construcción mas abundante en la península de Yucatán donde se desarrolló la civilización maya fue la piedra caliza que con su manipulación permitió elaborar materiales cementantes a base de cal la cual fue la base de los estucos y morteros de la región. EL desarrollo tecnológico de la ingeniería maya en el procedimiento y selección de los agregados logró el desarrollo de materiales densos y resistentes que aún se conservan a pesar del intemperismo. (Cejudo Collera, 2020)



Ilustración 13 Relieve de estuco de cal en el templo de los Mascarones, Kohunlich, Quintana Roo

Fuente: <https://www.wikiwand.com/es/articles/Kohunlich>

Además, la cal desempeñó un papel simbólico y ritual dentro de la cultura maya, la blancura era asociada con la pureza, renovación y orden cósmico que explica ampliamente su uso en edificaciones ceremoniales y espacios públicos como en el Templo de los Mascarones en Kohunlich, antigua ciudad maya. Este dominio tecnológico y cultural gracias a la cal convirtió la arquitectura maya en una de las mas reconocidas del continente americano y el estudio actual ofrece la perspectiva tecnológica sobre sostenibilidad, adaptación climática y el aprovechamiento de los recursos locales.

El origen de la cal maya viene a partir del *Tzal* que es una piedra caliza suave y muy porosa y cristalina que se encuentra en capas superficiales en las regiones de las Tierras Bajas, al igual que otro tipo de cal viva mayormente distribuida por la península de Yucatán llamada *sascab tunich* un tipo de arena calcárea fina, estas eran quemadas en caleras tradicionales de alrededor de los 2.5 m² que se alimentaba el fuego con hojas secas de palma de *guano* donde el fuego ardía bajo la forma de la calera de cono invertido dentro de una estructura cubica. (Schreiner, 2000)



Ilustración 14 Roca caliza Tzal

Nota: tomado de https://blumart.mx/products/piedra-caliza-blanca-1-kilo-50221?srsltid=AfmBOopL7Qw0w9tlHU_iBuNHsVB-6JfeGYJvTmaYaLy85_mVVQplQxiJ

La cal maya se empleó en morteros, estucos y aplazados de gran calidad donde se usaba para unir mampostería pétreas, recubrir templos, palacios y plataformas ceremoniales, así como el crear superficies pulidas que eran base para complejos murales. Gracias a esa trabajabilidad, capacidad de endurecimiento y resistencia a la intemperie es que muchas edificaciones con mas de mil años de antigüedad conservan gran parte de sus recubrimientos originales.

3.2. El mortero moderno

El mortero moderno es la mezcla de cemento portland, arena y agua, a la que se le agregan aditivos químicos para mejorar la trabajabilidad, adherencia, tiempo de fraguado o la resistencia del mortero, este es el mas utilizado en la construcción en tiempos modernos por la rapidez del endurecimiento y alta resistencia mecánica.

En el momento del descubrimiento del Clinker se da una alta difusión de este producto que confería mejores resultados que lo que se consideraba cemento de ese tiempo, es a partir de este momento cuando se da una alta variedad de aglomerantes derivados del Portland. Los morteros tradicionales han pasado a un segundo plano siendo sustituida la cal por morteros de cemento, y se tiene que su uso y conocimientos empíricos de la mano de obra se han estado perdiendo a lo

largo del tiempo generando cada vez menos mano de obra especializada necesaria para intervenir en el patrimonio histórico. (Cazalla Vázquez, 2002)

La función de un mortero para la albañilería es servir como material de unión de las piezas con la que se puede construir una fachada, pared, muro, etc., de tal forma que el conjunto forme una unidad estructural independiente. Para ello al mortero debe ser adecuada con las propiedades de resistencia a la compresión cuando sea un muro portante, de adherencia para unir las piezas y evitar agrietamientos por unión débil, impermeabilidad para cerramientos exteriores y durabilidad al medio ambiente. (Bustillo Revuelta, 2008)

En el ámbito técnico, el mortero moderno es un material estandarizado donde las propiedades están normadas y estandarizadas industrialmente lo que asegura comportamientos mecánicos y de durabilidad predecible. Su desempeño está definido por la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, retención de agua y adherencia establecidos por normas internacionales como la ASTM, así como las NMX-C en el contexto mexicano. Estas regulaciones permiten una integración en sistemas constructivos contemporáneos basados en procesos industrializados y producción en serie, no obstante, su comportamiento rígido y de baja permeabilidad contrasta con la flexibilidad y permeabilidad de los morteros de cal, lo que genera interés en comprender no solo las ventajas operativas si no también sus limitaciones en donde es importante la compatibilidad del material.

3.3. Dosificación de los morteros

La dosificación que está destinada al pegado de piezas responden a un criterio de resistencia, adherencia y trabajabilidad que garantizan un desempeño estructural y constructivo, de manera general, estos morteros se conforman por una mezcla de aglomerante ya sea de cal o cemento, agregados finos y agua en una proporción controlada que permite obtener una pasta plástica, homogénea y con la capacidad de transmitir esfuerzos entre las unidades a unir.

Tradicionalmente el mortero se elabora con cal y arena para obtener una mezcla dócil precisamente para poder llenar huecos. Los morteros elaborados con cales puras tienen alta trabajabilidad, sin embargo, el desarrollo de la resistencia es muy lenta ya que no fraguan si no que endurecen por un lento proceso de carbonatación por el contacto del dióxido de carbono del aire. (C. S. C., 1959)

Para morteros de cal, las dosificaciones más comunes que se emplean en la construcción son relaciones entre 1:2 y 1:3 en volumen, esto dependiendo del tipo de la cal utilizada, la granulometría de la arena y las condiciones de trabajo. Para proporciones de 1:5 para muros no estructurales se busca una compatibilidad mecánica con piezas de baja o media resistencia como son los tabiques artesanales o piezas aligeradas, ya que las piezas no están destinadas a la transmisión de

cargas significativas, la función principal radica en el asiento, nivelación y cohesión entre las piezas.

Proporcionamientos para fabricación de 1 m ³					
Mortero Calhidra - Arena					
PROPORCIÓN Volumen	CALHIDRA ton	ARENA m ³	AGUA m ³	MEZCLA RESULTANTE m ³	VOLUMEN RESULTANTE Bollos - 19 lts
1:2	0.39900	0.98400	0.30600	1	52.63
1:3	0.24700	1.02700	0.28100	1	52.63
1:4	0.19200	1.09100	0.26800	1	52.63
1:5	0.16400	1.15500	0.26500	1	52.63
1:6	0.14400	1.20900	0.26200	1	52.63
1:7	0.12300	1.25100	0.26200	1	52.63
1:8	0.13300	1.28400	0.26000	1	52.63
1:9	0.09900	1.31000	0.25600	1	52.63
1:10	0.08750	1.31000	0.25300	1	52.63

Ilustración 15 Proporcionamientos para la fabricación de 1m³ de mortero cal-arena
Fuente: Prisma Costs <https://app.prismacosts.mx/proportions/mixtures>

Dado que la dosificación es una relación volumétrica entre la cal y la arena como lo muestra la ilustración 15, esta no abarca una forma integral de los agregados en función de la dosificación y la resistencia, adherencia y permeabilidad de la mezcla de mortero a comparación del proceso del cálculo del mortero con cemento.

3.4. El chukum

El chukum es un árbol endémico de la península de Yucatán que se caracteriza por una corteza espinosa y resina rica en taninos que le dan un tono rojo como el vino, de este existen tres variedades de árboles y cada corteza da un tono característico. (Ruiz Esparza, 2021)

Su uso remonta desde la época prehispánica cuando la civilización maya aprovecharon su corteza para obtener una resina rica en taninos, esta se convirtió en la clave para elaborar morteros y recubrimientos con propiedades impermeabilizantes. Gracias a las propiedades químicas se proporcionaba resistencia al agua, alta durabilidad y un tono característico a los estucos.



Ilustración 16 Árbol de *Abardia Albicans*
Fuente: <https://pastadechukum.com/la-planta-del-chukum/>

La composición química de la resina es un extracto acuoso que contiene alrededor de un 0.8% de compuestos sólidos de los que se encuentran saponinas, polifenoles, taninos, carbohidratos y minerales, de una tonalidad morado oscura intensa al rojo vino muy espumoso. (Rekum Recubrimientos naturales, 2018)

3.5. Historia del uso de chukum

La arquitectura histórica y tradicional que ha llegado hasta ahora es la clara evidencia del desempeño de la sociedad al adaptarse a su entorno por sus diversas necesidades individuales y colectivas. El uso de morteros de cal con chukum en Yucatán eran utilizados desde los años sesenta del siglo XX, y su uso del extracto fue utilizado por los mayas en sus pinturas y murales como parte de otros materiales. (Pacheco Lira, 2021)

A finales del siglo XX y principios del XXI, existió un auge en el interés de los materiales de origen natural, las técnicas vernáculas y la arquitectura sostenible lo que impulsó la revaloración del chukum, que lo posicionó como un acabado tradicional de la región yucateca.

Los maestros artesanos originarios de los pueblos mayas juegan un rol fundamental en la conservación de la técnica tradicional de Yucatán en el uso del chukum como aditivo de morteros. Estos maestros van modificando los procesos como respuesta a la necesidad de adaptación a las cambiantes necesidades socioeconómicas en las que trabajan con conocimientos de generaciones anteriores. (Martínez Barreiro & Guerrero, 2020)

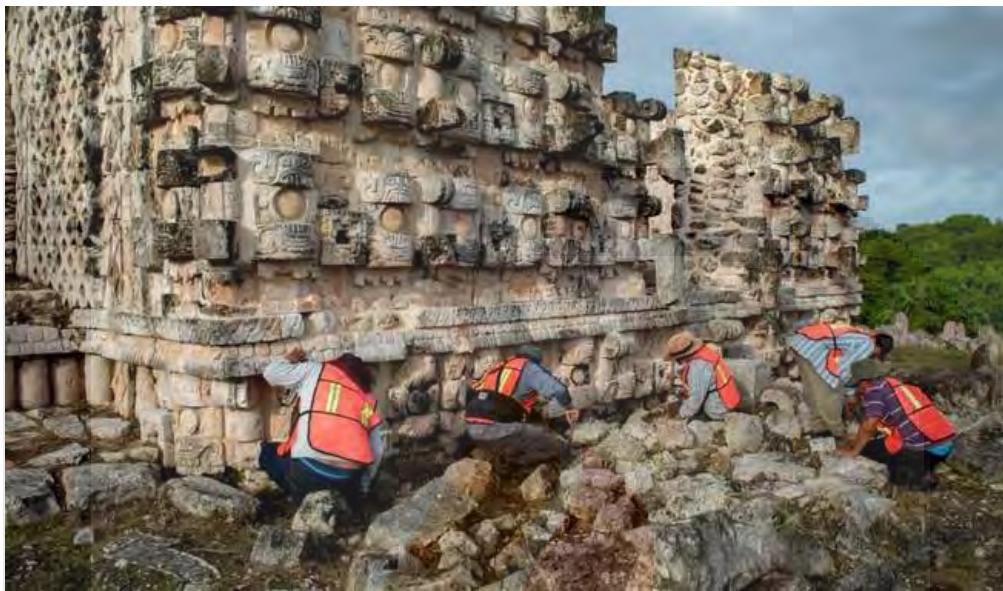


Ilustración 17 Restauración en Chichén Itzá de estructuras prehispánicas
Fuente: <https://www.gob.mx/cultura/prensa/patrimonio-arqueologico-de-yucatan-es-conservado-y-restaurado-mediante-el-promeza>

En las últimas décadas la utilización de chukum experimentó un resurgimiento dentro de la práctica constructiva contemporánea de la península de Yucatán, aunque su empleo es de origen prehispánico, esta reintroducción moderna comenzó a finales del siglo XX donde arquitectos locales, restauradores y artesanos retomaron la técnica tradicional para atender proyectos de restauración como en la ilustración trasladándose a la arquitectura residencial y turística para consolidar una identidad regional. Actualmente es utilizado como acabado decorativo, recubrimiento impermeable y capa protectora en muros y superficies por su textura pulida, coloración y comportamiento favorable en climas cálidos y húmedos.

3.6. Mejoramiento de las propiedades físicas de los morteros con chukum

El procedimiento de manufactura prehispánica para la obtención de los aditivos vegetales consiste en la maceración de la corteza fresca del árbol durante un periodo de remojo de 72 horas en agua fría para extraer los compuestos solubles ricos en taninos y saponinas. (Lorenzo Mora & Carracosa Moliner, 2017)



Ilustración 18 Proceso de maceración de la corteza del árbol de chukum
Fuente: <https://pastadechukum.com/dos-tipos-de-corteza-de-chukum/>

Los morteros con la incorporación de chukum son de acabados superficiales más homogéneos y compactos, con una capa brillante que disminuye con el tiempo de manera gradual, lo que es un indicio de una mayor plasticidad. Muestra a su vez agrietamientos casi nulos en su superficie lo que propicia la permeabilidad de la superficie. (Pacheco Lira & Narváez Hernández, Evaluación del comportamiento físico de morteros base cal con aditivos orgánicos, 2025)

La combinación de productos de metabolitos de la resina obtenida de la corteza de chukum desempeñan un papel fundamental en las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los morteros con cal. En gran medida esta composición explica la impermeabilidad, adherencia y durabilidad de los acabados mayas.

Todas las células vegetales realizan los procesos de metabolismo para la vida celular y en la planta en general, estos son procesos que contribuyen al metabolismo primario donde se desarrolla los procesos bioquímicos donde los carbohidratos y minerales desarrollan su ruta metabólica para el desarrollo de la vida de la planta. (Valares Masa, 2011)

Los carbohidratos en extracto vegetales suelen ser azúcares simples y polisacáridos que actúan como modificadores reológicos que regulan la fluididad de la mezcla y mejora la trabajabilidad del mortero, a su vez los minerales como el calcio, potasio, magnesio y hierro contribuyen a la estabilidad a largo plazo ya que algunos minerales forman compuestos insolubles que refuerzan la matriz mineral de la mezcla.

Los productos del metabolismo secundario de las plantas tienen funciones ecológicas específicas como atrayentes o repelentes, pigmentación o protección. Las saponinas dan propiedades detergentes similares al jabón, los polifenoles

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

actúan como estabilizantes orgánicos y los taninos son toxinas debido a su capacidad de unión a las proteínas actuando como repelentes alimenticios. (Ávalos García & Pérez Urria Carril, 2009)

El caso de las saponinas tiene la propiedad de ser tensioactivos y espumantes que causan la reducción de la tensión superficial de agua que permite una mayor dispersión uniforme de las partículas de cal y agregados aumentando la trabajabilidad, los polifenoles como antioxidantes y quelantes interactúan con minerales, proteínas y iones metálicos donde estabilizan químicamente la pasta durante el fraguado evitando reacciones tempranas además de ser un antimicrobiano natural. Los taninos como astringentes intervienen en la formación de los enlaces orgánico-mineral que refuerzan la matriz modificando la porosidad a demás de ser antifúngico y antibacteriana.

Tabla 2 Clasificación de los principales compuestos presentes en la resina de chukum y sus efectos en morteros

Compuesto	Metabolito	Efecto en morteros
Saponinas	Secundarios	Tensioactivos, mayor trabajabilidad
Polifenoles	Secundarios	Estabilidad, retención de humedad
Taninos	Secundarios	Astringencia, cambios en fraguado
Carbohidratos	Primarios	Retención de agua, viscosidad
Minerales	primarios	Resistencia al biodeterioro

Nota: Transcrito de Ávalos García & Pérez Urria Carril y Valares Masa



IV. METODOLOGÍA

4.1. METODOLOGÍA

Este proyecto de investigación tendrá un enfoque cuantitativo y se busca realizar una comparativa entre dos sistemas constructivos de muro de tabique con dos morteros a base de cal y agregado fino originario, Aguascalientes, México. Para lograr el cumplimiento de la investigación se ejecutará de la siguiente manera:

- A. Una estructuración íntegra del estado del arte con las investigaciones referentes al tema de morteros de cal con aditivos orgánicos y sus propiedades mejoradas con los comportamientos mecánicos, así como los comportamientos físicos y mecánicos de los muros.
- B. La definición del marco teórico a partir de los conocimientos generados en artículos científicos lo más relevantes y actualizados en materia de los morteros de cal con aditivos orgánicos.
- C. Se realizará la toma de muestra con agregados finos a base de arena de río de la región de Aguascalientes y resina del árbol de chukum de la región de la península de Yucatán.
- D. El diseño y elaboración de probetas que permitan realizar la pruebas al mortero de manera eficiente dependiendo cada tipo de experimento.
- E. Los ensayos descritos en este capítulo a cuerdo a los procedimientos dictados por las normas mexicanas aplicables a tabiques, morteros y muretes, utilizando los recursos disponibles en el laboratorio de mecánica de suelos de la UAA. Dichas pruebas se realizarán a mezclas de morteros elaborados con diferentes grados de disolución de resina de chukum en el agua de la mezcla del 0%, 10% y 15% en una mezcla en proporción 1:5 a fin de observar las las características de la implementación de la resina de chukum.
- F. El análisis de los resultados obtenidos de la experimentación para realizar la comparativa de medias de dichos resultados para llevar a cabo las inferencias acerca de las propiedades físicas y mecánicas de los morteros ensayados. Además, se determinará si alguno es viable para la industria de la construcción en la región de Aguascalientes dentro de la normatividad.

4.2. Granulometría del agregado fino

Este análisis se realiza para determinar la distribución de tamaños de las partículas del agregado fino mediante un tamizado en seco. Este procedimiento inicia con la obtención de una muestra representativa previamente cuarteada y se toma una porción de 500 gr, esta se seca en horno a una temperatura de $110\pm5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas hasta obtener una masa constante, y posterior a eso se deja enfriar a temperatura ambiente.

Ya preparada la muestra, se procede al tamizado usando una serie de tamices normalizados, como la ilustración 19, con la No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50,

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

No. 100, No. 200 y el fondo. Estos se colocan en orden descendente de abertura y la muestra es vertida completamente en el tamiz superior. Este conjunto es sometido a un tamizado manual durante un periodo de 10 min, asegurando movimientos uniformes que permitan la separación adecuada de los tamaños.



Ilustración 19 Tamiz ASTM

Finalizado el tamizado manual, se registra la masa retenida en cada tamiz como muestra la ilustración 20, verificando que la suma de las masas retenidas y del fondo sea igual o menor a la masa inicial, considerando un error no mayor al 2%. Ya con estos valores se calcula el porcentaje que pasa lo que permite graficar la curva granulométrica del agregado fino.



Ilustración 20 Tamaño de las partículas del agregado grueso

Esta información es utilizada para evaluar si el material cumple con los límites máximos y mínimos de materiales granulares de origen natural no triturado establecidos, así como para determinar su módulo de finura.

4.3. Absorción de inicial y total de agua en tabiques

El procedimiento para la absorción inicial como dice la norma NMX-C-037-ONNCCE-2013, este inicia con el registro de la masa seca de cada pieza, la cual se considera como masa inicial como muestra la ilustración 21.



Ilustración 21 Registro de la masa inicial de los tabiques

Posteriormente cada unidad se coloca en un recipiente con agua, como la ilustración 22, de modo que la cara lisa de la pieza quede sumergida $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ por debajo de la superficie del agua. A partir del momento que la pieza entra en contacto con el agua inicia un tiempo de inmersión de $10 \text{ min} \pm 20 \text{ seg}$.

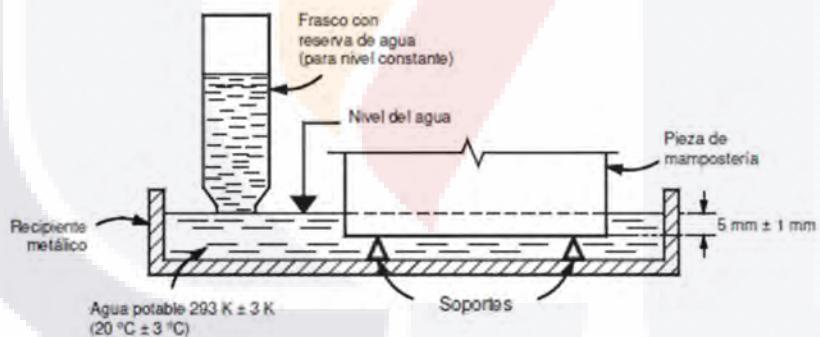


Ilustración 22 (Arriba) diagrama de la colocación de las piezas (Abajo) Absorción inicial de agua de las piezas de tabique rojo

Fuente: transrito de NMX-C-037-ONNCCE-2013

Transcurrido ya el periodo, se procede a retirar la pieza y se procede a un secado superficial de la cara de contacto evitando eliminar el agua absorbida internamente e inmediatamente se registra la masa húmeda, asegurando que el proceso completo de secado superficial y pesado no supere los 2 min para dar validez al ensayo y así evitar variaciones por evaporación o pérdida de humedad.

Para determinar la absorción total, se debe seleccionar tres especímenes previamente secados y pesados, para que su masa corresponda a una condición seca constante. Las muestras son introducidas en un recipiente con agua a una temperatura entre los 17°C y 23°C, donde estas permanecerán sumergidas durante 24 h. Transcurrido el periodo las piezas se secan de manera superficial evitando remover el agua absorbida. Inmediatamente se registra la masa saturada superficialmente seca.

Posterior a eso, cada espécimen es pesado de manera sumergida, como muestra la ilustración 23, donde se asegura que la pieza esté suspendida dentro del recipiente sin tocar las paredes ni el fondo.

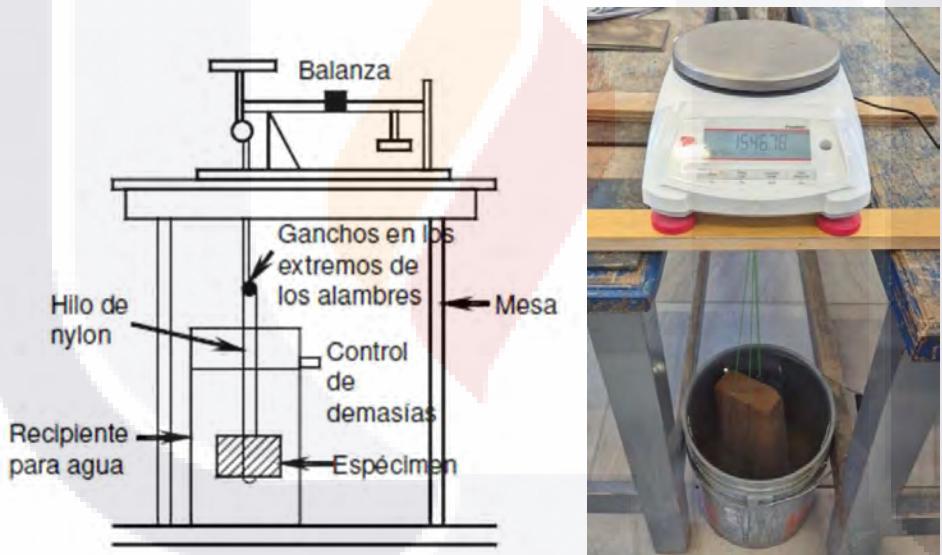


Ilustración 23 Pesaje de espécimen sumergido
Fuente: transrito de NMX-C-037-ONNCCE-2013

4.4. Peso Volumétrico Seco suelto y Peso Volumétrico Seco Compacto

Para obtener el peso volumétrico seco suelto se utiliza un recipiente de volumen conocido el cual debe de estar limpio y completamente seco, La arena se vierte desde una altura máxima de 5 cm sobre la boca del recipiente evitando algún tipo de compactación o vibraciones durante el llenado. La arena se deja caer de manera

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

natural hasta que se llene el recipiente completamente y el exceso se retira pasando una regla por la superficie sin ejercer presión en el material. Como se muestra en la ilustración 24 se procese a registrar la masa del recipiente lleno y se le resta la masa del recipiente vacío para así obtener la masa de la arena en condición suelta, y el peso volumétrico seco suelto de calcula dividiendo esta masa entre el volumen del recipiente.



Ilustración 24 Pesaje de la masa del recipiente con la arena suelta

Para el peso volumétrico seco compacto, con el mismo recipiente se llena en tres capas aproximadamente iguales, con la ayuda de una varilla metálica de punta de bala se aplican 25 golpes uniformes a cada capa para inducir una compactación controlada. Ya con la última capa se nivela la superficie eliminando el exceso con una regla, y se repite el pesaje para el cálculo.



Ilustración 25 Compactación inducida a la tercera capa del ensaye de peso volumétrico seco compacto

4.5. Tamaño de la muestra y Diseño de Mezcla

La tabla 3 muestra el tamaño de la muestra donde se estudiará su variable y la normativa donde se está guiando la prueba a desarrollar, todo para tener un control en procedimiento controlado del estudio de las variables para el proyecto.

Además del número de especímenes por ensayo, se justifica el tamaño de la muestra permite obtener resultados estadísticamente representativos para así reducir la variabilidad inherente de los materiales. Para cada prueba se seleccionó el número mínimo de unidades conforme a lo establecido en la norma correspondiente.

Tabla 3 Tamaño de las muestras a elaborar

Prueba	Variable	Normatividad	Muestra	No. De muestras
Absorción total y la absorción inicial de agua en ladrillos	Absorción total en 24 h Coeficiente de absorción inicial	NMX-C-037-ONNCCE-2013	Tabique rojo	8 8
Granulometría del agregado fino	Tamaño de las partículas Módulo de finura	NMX-C-329-ONNCCE-2016	Arena	5 muestras de 0.5 kg
Masa volumétrica del agregado fino	Peso volumétrico seco suelto Peso volumétrico seco compacto	NMX-C-073-ONNCCE-2004	Arena	5 5
Mortero para uso estructural	Fluidez de la mezcla	NMX-C-486-ONNCCE-2014	Mezcla fresca de mortero	1 muestra por mezcla
Resistencia a la compresión	Resistencia a la compresión	NMX-C-061-ONNCCE-2015 NMX-C-036-ONNCCE-2013	Cubos 5x5x5 Tabiques	45 12
Adherencia por esfuerzo cortante	Adherencia por esfuerzo cortante	NMX-C-082-ONNCCE-2013	Tabique-mortero	15
Resistencia a la compresión diagonal de muretes y resistencia a la compresión en pilas de mampostería	Resistencia a la tensión diagonal Resistencia a la compresión	NMX-C-464-ONNCCE-2010	Murete de 70x70 Pila de 6 filas de ladrillo	12 12
Permeabilidad del sistema	Absorción por presión parcial	EN 16302:2013	Tabique con recubrimiento	18

Nota: Elaboración propia

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Para el diseño de mezcla se utilizó el proporcionamiento de 1:5 de Prisma Costo para la elaboración de 1m³ de mezcla, la cual se le calculó la resina necesaria para obtener el porcentaje de disolución correspondiente a las muestras de 10% y 15% indicados en la tabla 4.

Tabla 4 Proporcionamientos 1:5 de mortero cal-arena con la resina necesaria para su grado de disolución

Proporción Disolución	Mezcla m ³	Cal hidra ton	Arena m ³	Agua m ³	Resina m ³
1:5 00%					0.000
1:5 10%	1.0	0.164	1.155	0.265	0.029
1:5 15%					0.047

Nota: Transcrito de Prisma Cost

4.6. Fluidez

Acorde a la norma mexicana NMX-C486-ONNCCE-2014 el mortero para uso estructural debe cumplir con un revenimiento en función de la absorción de agua de las piezas de tabiques, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Revenimiento permisible para los morteros en función de la absorción de la pieza

Absorción de la pieza, %	Revenimiento para mortero de pega, mm	Revenimiento para mortero de relleno, mm
Menor a 10	160	150
10 a 15	160	175
15 a 23	160	200

Nota: transcrito de NMX-C-486-ONNCCE-2014

El revenimiento de las mezclas de mortero se determina mediante el ensayo de fluidez, consiste en la obtención del crecimiento del diámetro, en porcentaje, a partir de un diámetro inicial de un cono truncado y el diámetro final del mortero después de ser sometido a una serie de 25 caídas por medio mecánicos como se muestra en la ilustración 26.

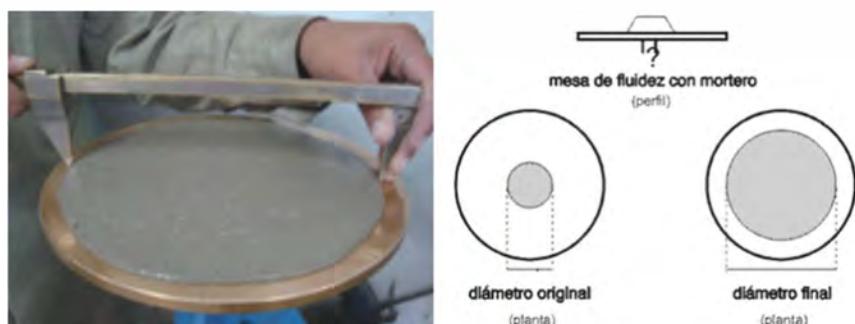


Ilustración 26 Diagrama de medición de la mesa de fluidez

Fuente: transcrito de NMX-C-061-ONNCCE-2014

4.7. Resistencia a la compresión en morteros

La resistencia a la compresión del mortero endurecido se determina con probetas cúbicas de 50 mm de arista, elaboradas con los lineamientos de la normatividad NMX-C-061-ONNCCE. Son moldeadas en tres capas con compactación uniforme para reducir los vacíos y son desmoldadas a las 24 h para dejarlas endurecer por un mínimo de 4 meses hasta la fecha de su ensayo.

EL procedimiento se establece en que las cargas son aplicadas de manera continua y sin impactos en una velocidad de carga constante hasta el fallo de la probeta mostrada en la ilustración 27, registrando la carga de la prensa y así obtener la resistencia.



Ilustración 27 Falla del cubo de mortero de cal

4.8. Resistencia a la compresión de tabiques

La resistencia a la compresión para las piezas de tabiques es determinada por la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013 utilizando especímenes completos colocados entre placas metálicas planas. La pieza es sometida a una carga axial como la ilustración 28 muestra aplicada de manera constante hasta la falla, registrando la carga máxima soportada.



Ilustración 28 Aplicación de carga en el tabique

4.9. Adherencia por esfuerzo cortante

Como menciona la norma NMX-C-082-ONNCCE la determinación de la adherencia por esfuerzo cortante entre el mortero y las piezas de mampostería se realiza mediante el procedimiento de fabricación de especímenes y el ensayo de las mismas.

Para la fabricación de cada espécimen, como muestra la ilustración 29, se usan tres piezas de tabiques completas provenientes del mismo lote. La construcción se realiza uniendo con mortero la superficie de apoyo que corresponden a las juntas horizontales con una capa de $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ de espesor, con un desfase entre la pieza central con las laterales de 10 mm.



Ilustración 29 Espécimen de ensaye de adherencia por esfuerzo cortante

El procedimiento de ensayo consiste en colocar la probeta en la máquina de ensayo de modo que las placas de apoyo han contacto en cada superficie de las piezas del espécimen, apoyadas en la superficie cabeceada y placa inferior con el bloque de carga.



Ilustración 30 (Izquierda) Muestra posicionada en la prensa, (Derecha) Muestra con falla por falta de adherencia

4.10. Resistencia a la compresión diagonal en muretes

Cada probeta elaborada de murete de 60x60 cm se debe colocar por cada esquina del murete los cabezales de distribución de carga como en la ilustración 31, alineándose el eje diagonal de la probeta con el centro de la rotula del bloque de carga. El émbolo de la prensa debe bajar lentamente hasta que se asienta en el cabezal superior.



Ilustración 31 Colocación de los cabezales en las esquinas del murete

La aplicación de la carga debe ser con una velocidad constante y continua, evitando el producir impactos o pérdidas de carga. Para los muretes esta velocidad debe de estar entre 1.0 kg/cm²/min y los 2.0 kg/cm²/min. La carga es aplicada hasta alcanzar la falla y se registra, al igual tipo y apariencia de la falla de la mampostería como está la ilustración 32.



Ilustración 32 Falla del murete de mampostería

La resistencia a la compresión diagonal de la muestra se obtiene al dividir la carga máxima registrada entre el área bruta de la diagonal del murete, es decir la longitud diagonal a compresión por el espesor del murete como se muestra la ilustración 33.

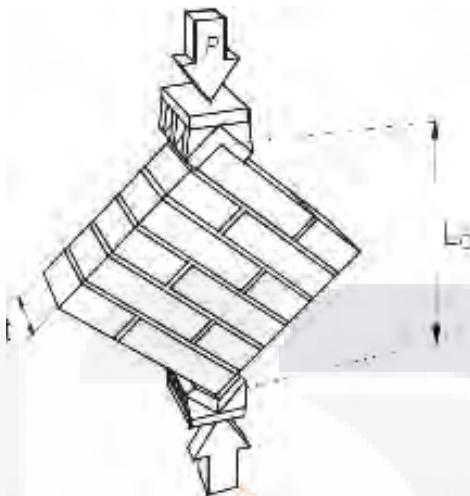


Ilustración 33 Obtención de la resistencia a compresión diagonal
Fuente: NMX-C-464-ONNCCE-2010

4.11. Resistencia a la compresión en pilas

Cada probeta elaborada con 6 filas de tabique se debe de colocar



Ilustración 34 Pilas de mampostería de 6 filas

La aplicación de la carga debe ser con una velocidad constante y continua, evitando el producir impactos o pérdidas de carga. Para los muretes esta velocidad debe de estar entre 15 kg/cm²/min y los 30 kg/cm²/min. La carga es aplicada hasta alcanzar la falla y se registra, al igual tipo y apariencia de la falla de la pila como está la ilustración 35.



Ilustración 35 Falla de la pila a compresión

La resistencia a la compresión de la pila se calcula dividiendo la carga máxima del ensayo entre el área bruta de carga de la pila, este resultado se multiplica por un factor correctivo por esbeltez indicado en la tabla

Tabla 6 Factores correctivos por esbeltez de las pilas

Relación de esbeltez de la pila	Factor correctivo
2	0.75
3	0.90
4	1.00
5	1.05
6	1.06

Nota: transcrita de NMX-C-464-ONNCCE-2010

La relación de esbeltez para las pilas es calculada como el cociente de la altura entre la menor dimensión de la sección transversal tal que debe encontrarse entre 2 y 6. Si la relación queda fuera de los límites, se desecha la probeta.

4.12. Absorción por presión parcial

El ensayo con tubos Karsten consiste en la medición de la absorción de agua bajo baja presión en superficies porosas de mampostería para evaluar la permeabilidad y comportamiento higroscópico en el estado de servicio.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Se preparan muestras de mortero sobre piezas de tabiques rojos con un espesor de 1 cm para cada tipo de mezcla y se deja que obtengan su dureza necesaria y el procedimiento inicia con la limpieza superficial asegurando no exista polvo o partículas sueltas.

Posterior a eso, se fijan herméticamente los tubos Karsten al paramento mediante una capa de masilla o plastilina inerte asegurando que no existan fugas laterales durante la prueba, como se muestra en la ilustración 35. Ya asegurado el tubo, se llena hasta la marca inicial con agua y se registra el nivel de partida.



Ilustración 36 Proceso de prueba con los tubos de Karsten sobre la superficie del mortero

El agua en el tubo ejerce presión hidrostática muy baja en la superficie forzando el ingreso en el sustrato de manera similar a l efecto de la lluvia o humedad incidental. La lectura del descenso del nivel del agua se realiza en intervalos regulares anotando el volumen absorbido en cada lectura de tiempo. Y la prueba continúa hasta completar el tiempo establecido o hasta una lectura del volumen sin variación en el tiempo. El resultado obtenido se expresa como el volumen de agua absorbido por unidad de tiempo



V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Granulometría del agregado fino

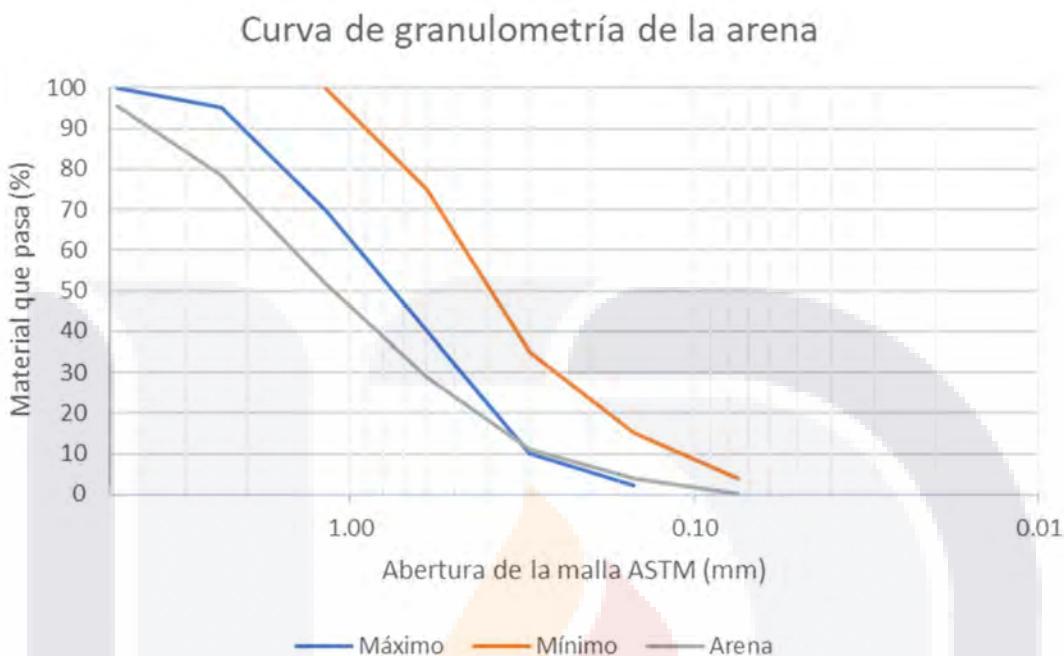


Ilustración 37 Curva de granulometría de la arena utilizada
Fuente: elaboración propia

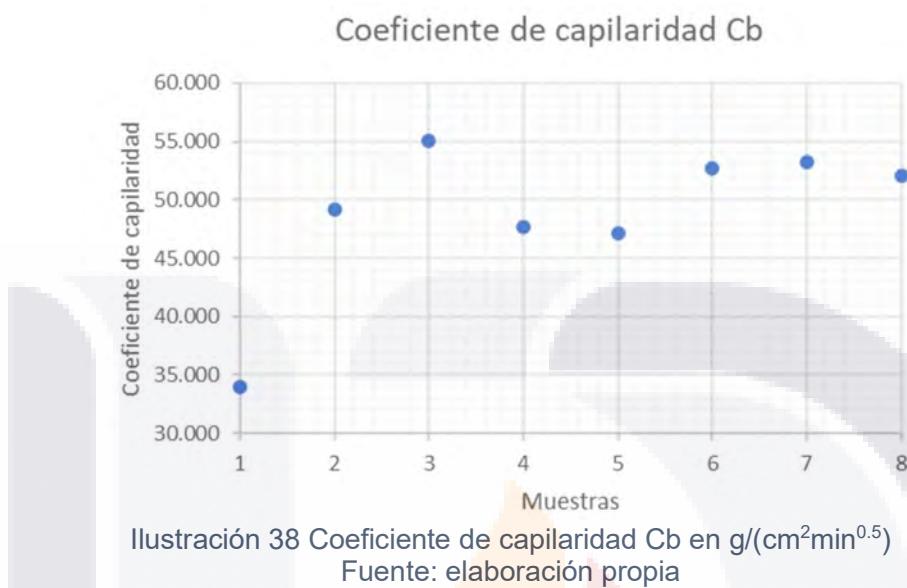
La curva de granulometría en la ilustración 37 del agregado fino se mantiene por arriba del límite máximo para agregados de origen natural, pero con distribución continua, y un módulo de finura de 2.69, es decir que la arena es relativamente gruesa. El porcentaje de material que pasa la malla No. 200 es de 0.20% que se encuentra dentro de los límites.

Esta implicación de ser un material relativamente grueso implica que en la mezcla requerirá de menos agua para alcanzar la trabajabilidad deseada al tener menor área de contacto con la cal para la mezcla. En conjunto la arena presenta una granulometría adecuada para su uso en mortero no estructural.

5.2. Absorción de inicial y total de agua en tabiques

El lote de tabique evaluado presentó un coeficiente de absorción promedio de 48.867 g/(cm²min^{0.5}) expresado en la ilustración 38, con una absorción total del 23.71% quedando por arriba del rango permitido por la NMX-C-036-ONNCCE-2013 para unidades estructurales ($\leq 20\%$). Esta absorción indica una porosidad abierta en las piezas. Viéndolo desde el punto de vista constructivo, este valor sugiere que las piezas ejercerán succión sobre el mortero. La característica del material indica

que el tabique es compatible con morteros de cal mientras se controle la humedad previa a la colocación para evitar las variaciones en la succión inicial de las piezas sobre la pasta de mortero.



5.3. Peso Volumétrico Seco suelto y Peso Volumétrico Seco Compacto

Los valores de peso volumétrico como se muestra en la tabla 7, la arena de río obtenida en laboratorio fue de 1235.96 kg/m^3 para un peso volumétrico seco suelto y de 1541.85 kg/m^3 para un peso volumétrico seco compacto. El valor de peso suelto de la arena de río es relativamente baja, pero al ser una arena de río esta presenta granos generalmente más redondeados que genera ausencia de fracciones intermedias dejando mayor volumen de vacíos en esa condición suelta

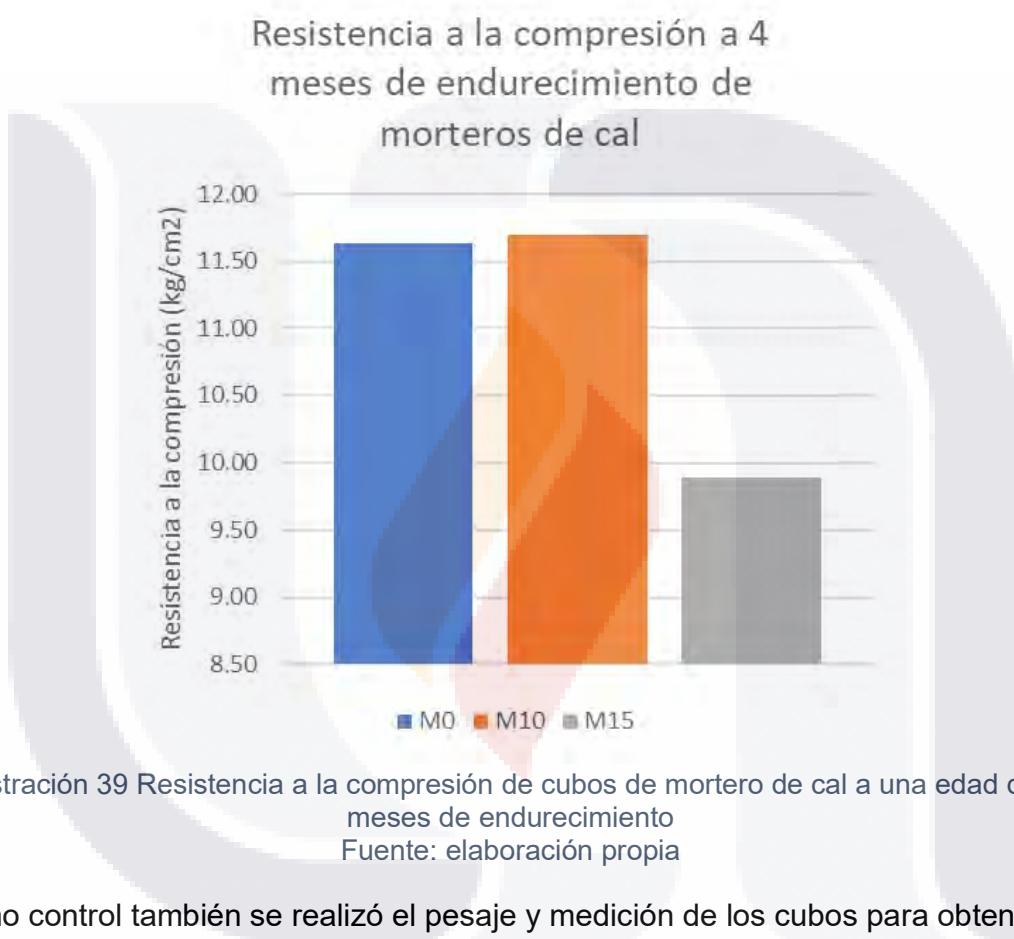
Tabla 7 Peso volumétrico seco suelto y compacto de la arena

	Muestra	Peso kg	Peso volumétrico kg/m^3	Promedio kg/m^3
Suelta	S1	6.856	1249.46	1235.96
	S2	6.853	1247.16	
	S3	6.864	1255.60	
	S4	6.816	1218.78	
	S5	6.803	1208.81	
Compacta	C1	7.247	1549.36	1541.85
	C2	7.235	1540.16	
	C3	7.237	1541.69	
	C4	7.238	1542.46	
	C5	7.229	1535.56	

Fuente: elaboración propia

5.4. Resistencia a la compresión en morteros

La mayor resistencia a la compresión obtenida en laboratorio, mostrada en la ilustración 30, para las muestras de morteros de cal con disoluciones fue la de 10% con una resistencia de 11.70 kg/cm², esta resistencia es suficiente para pegado de piezas de tabiques no estructurales. Presenta una resistencia poco mayor al de 0% esta siendo de 11.64 kg/cm².



Como control también se realizó el pesaje y medición de los cubos para obtener su densidad, mostrado en la ilustración 40, en esta la implementación de la resina modificó la densidad donde la mayor densidad registrada se encontró con los morteros con un 15% de disolución con 1752.06 kg/cm³, seguido del mortero con un 10% de disolución con 1735.87 kg/cm³ y el mortero con 0% de 1699.63 kg/cm³.

El motero de 10% infiere que la densidad moderada contribuye a una trabajabilidad adecuada y un endurecimiento lento típico de los morteros de cal, pero muy limitante al desempeño estructural, por lo tanto, este mortero resulta apropiado para aplicaciones de mamposterías no estructurales y acabados de revestimiento donde se garantiza la adherencia sin comprometer la integridad de los elementos livianos.

Densidad de morteros de cal

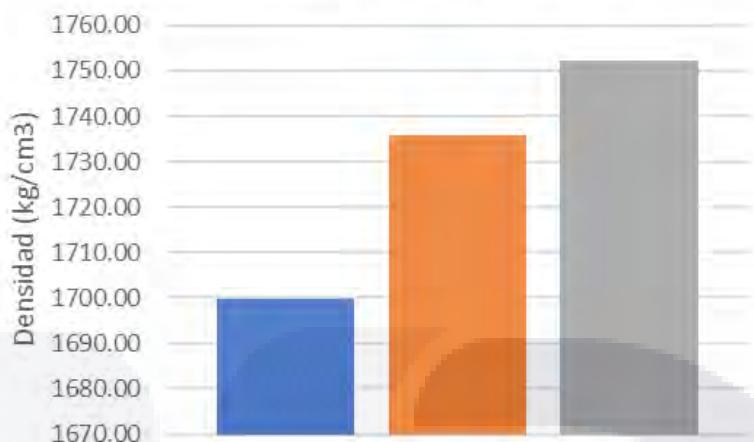


Ilustración 40 Densidad de cubos de mortero de cal

Fuente: elaboración propia

5.5. Resistencia a la compresión de tabiques

La resistencia registrada en el lote de piezas de tabique cocido obtuvo un promedio de 29.17 kg/cm² donde para ser piezas artesanales indican que son ladrillos de buena calidad estructural. Cabe mencionar que las piezas artesanales tienen resistencias típicas de 10 a 30 kg/cm² donde depende mucho de la cocción y tipo de arcilla. Estas piezas en promedio tienen una densidad de 1487.26 kg/cm³ lo que es una baja densidad relativa en comparativa a las piezas industriales. Esta densidad indica porosidad interna que explica la razón de un valor alto de absorción de agua de la pieza.

Resistencia a la compresión simple de tabiques

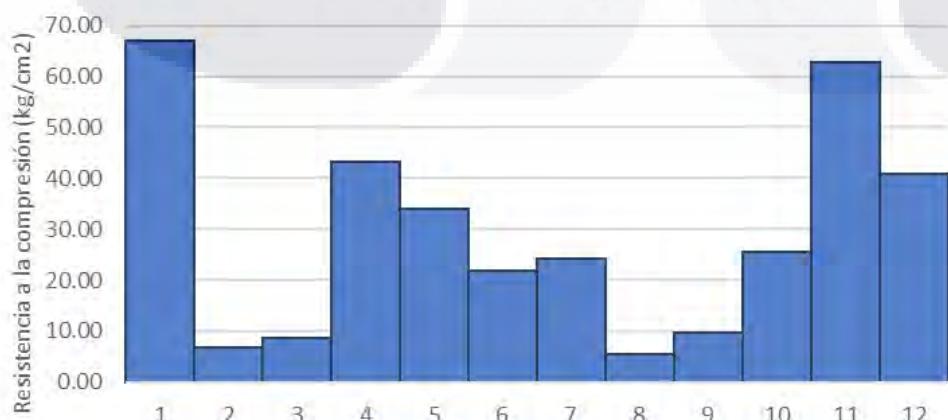


Ilustración 41 Resistencia a la compresión de tabiques rojo cocido

Fuente: elaboración propia

5.6. Adherencia por esfuerzo cortante

Al momento de realizar el ensayo por esfuerzo cortante, con el simple echo de poner las piezas en vertical desprendían las piezas de mampostería con un corte limpio donde en su totalidad el mortero se despegada de la superficie del tabique como está en la ilustración 42.



Ilustración 42 Desprendimiento total entre el tabique y el mortero

Aunque se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de los morteros, la resistencia por esfuerzo cortante fue nula, esto indica que carece de adherencia suficiente para trasmitir esfuerzos entre los ladrillos. Esto evidencia que, aunque los morteros puedan soportar su propia compresión estos no contribuyen

estructuralmente al conjunto donde se limita la cohesión y la integridad del muro ante esfuerzos laterales.

Se concluye que la resistencia del mortero es insuficiente en adherencia y se recomienda mejorar la composición.

5.7. Resistencia a la compresión diagonal en muretes

A partir de los ensayos de compresión diagonal se concluye que los morteros presentan resistencia limitada al esfuerzo cortante con valores de 0.74 kg/cm², 1.18 kg/cm² y 0.93 kg/cm² para los morteros con 0%, 10% y 15% de disolución respectivamente en la ilustración 43. Esto indica que los morteros permiten cierto pegado, pero no desarrollan adherencia suficiente para contribuir a la cohesión estructural del muro, donde funcionan principalmente como relleno. La diferencia entre los morteros sugiere que la composición del 10% de resina disuelta en el agua es la más eficaz.

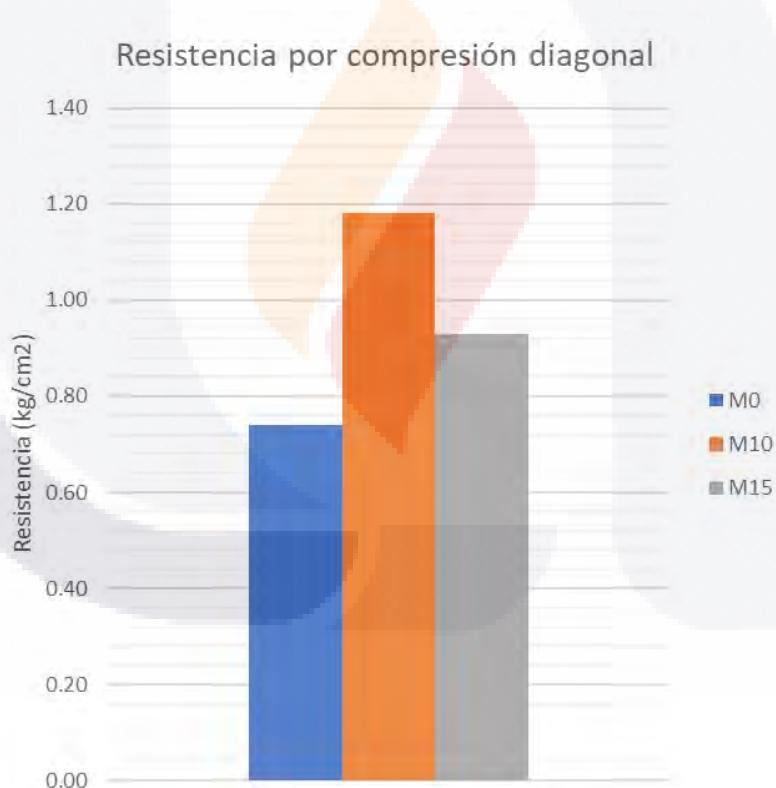
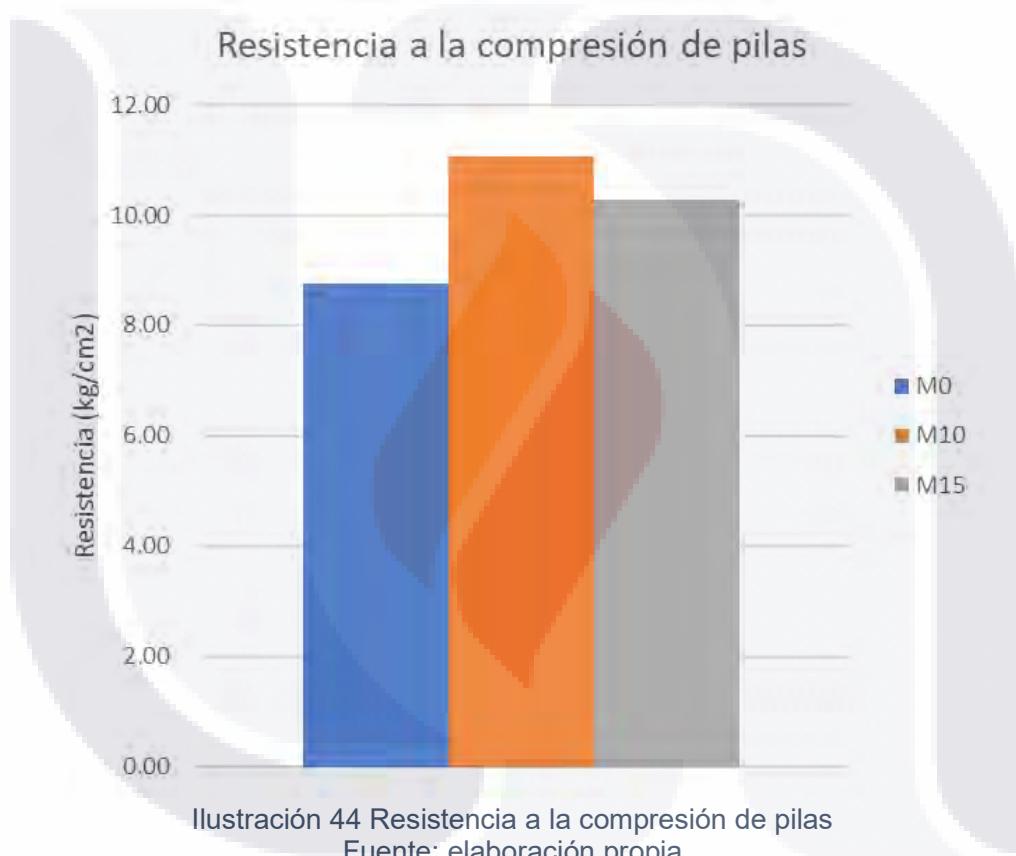


Ilustración 43 Resistencia a la compresión diagonal de muretes de mampostería
Fuente: elaboración propia

5.8. Resistencia a la compresión en pilas

Las pilas conformadas con seis filas de tabiques cocidos artesanales y mortero ensayadas a compresión, presentan resistencias de 8.75 kg/cm^2 , 11.07 kg/cm^2 y 10.27 kg/cm^2 para los morteros con 0%, 10% y 15% de disolución respectivamente, en la ilustración 44. Estos valores evidencian que, aunque los tabiques presentan una resistencia elevada, el conjunto tabique-mortero se encuentra limitado por la resistencia del mortero utilizado al ser el elemento más débil de la pila. En este sentido el mortero la resistencia del mortero determina directamente la resistencia global del sistema.



Si se considera que la adherencia observada, los resultados sugieren que el mortero permite cierto pegado de los tabiques, pero su limitada adherencia puede influir en la deformación y distribución de cargas en el muro. Por consecuencia, para garantizar un adecuado comportamiento estructural y una efectiva transferencia de esfuerzos es necesario implementar morteros con mayor resistencia y adherencia para asegurar una correcta aplicación durante la construcción

5.9. Absorción por presión parcial

Los resultados obtenidos con la ayuda de los tubos de Karsten se muestran en la ilustración 45 que la menor absorción de agua con un valor de $0.002658 \text{ ml/min}\cdot\text{cm}^2$ fue del mortero con el 15% de disolución de resina, indicando una notable reducción en la permeabilidad. Mientras que el mortero con 0% y 10% apenas presentaron diferencia, esta diferencia marcada sugiere que únicamente a partir de contenidos altos de resina de chukum se genera una modificación efectiva en la microestructura del mortero, disminuyendo la interconectividad de los poros, influyendo en la entrada de agua.

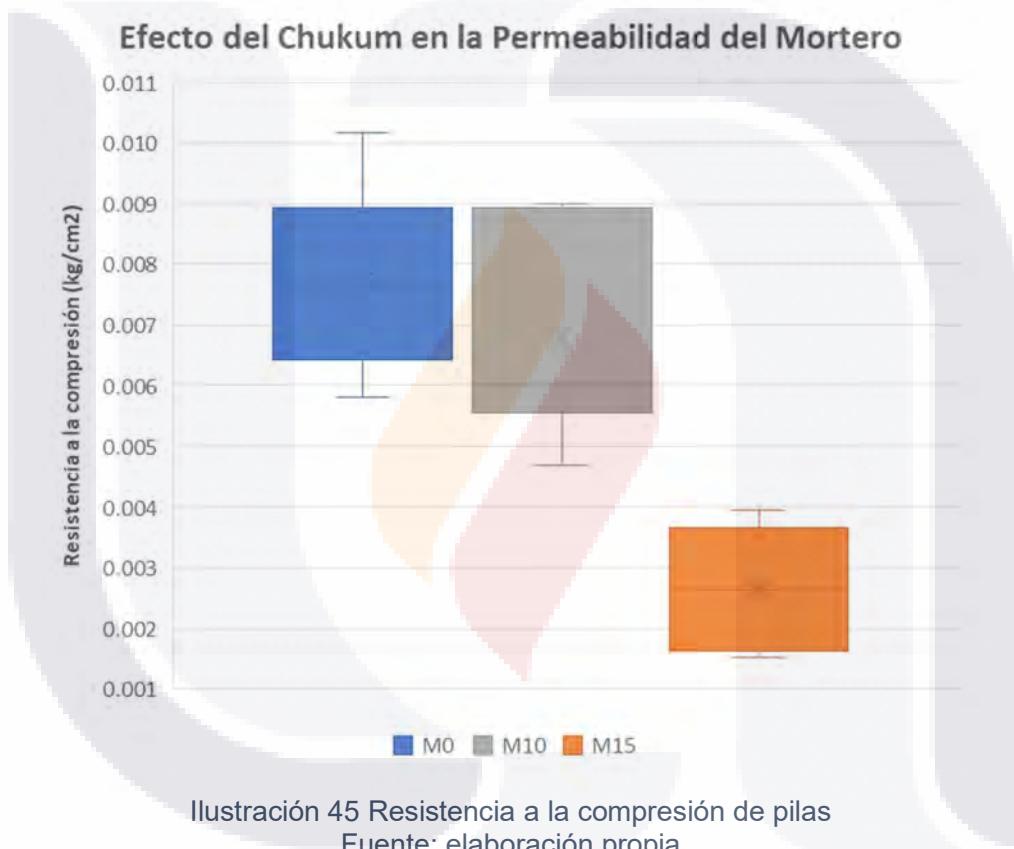


Ilustración 45 Resistencia a la compresión de pilas
Fuente: elaboración propia

En términos comparativos, la resina de chukum no mejora la impermeabilidad en proporciones bajas, sin embargo, al estar disuelto por lo menos en un 15% la resina si logra un efecto claro de sellado disminuyendo drásticamente la absorción y aumentando el potencial del mortero para aplicaciones donde la resistencia a la humedad es crítica. Esto indica que la eficiencia de la resina está ligado a la proporción de la mezcla y que se manifiesta de manera contundente en dosis elevadas.



VI. CONCLUSIONES

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

6.1. Conclusión general

Con base a los resultados obtenidos, la implementación del mortero de cal con adiciones de disueltas de resina de chukum no mejora de manera integral las propiedades físicas y mecánicas del sistema constructivo de muros de tabique recocido.

Si bien se observó que una mezcla con un 15% de resina presentó reducciones significativas en la absorción, indica que mejora ante el comportamiento de permeabilidad, esta no indica de forma consistente en el desempeño mecánico de compresión.

Aunque las resistencias registradas para los morteros modificados de 10% y 15% son ligeramente superiores a la mezcla sin resina, por lo que la resina no aporta de manera sustancial a la capacidad portante.

Su aplicación podría ser beneficiosa en contexto donde la durabilidad frente a la humedad sea prioritaria, pero desde la perspectiva estructural es deficiente

6.2. Conclusiones específicas

- A. La revisión documental de esta investigación permitió identificar el estado actual del conocimiento respecto al uso de morteros de cal y la implementación de aditivos orgánicos tradicionales en la cultura como la resina de chukum. La cual permitió identificar tendencias y aplicaciones contemporáneas donde con base a fundamentos históricos y criterios normativos permitió estructurar un marco conceptual necesario para la interpretación de los resultados experimentales
- B. El análisis físico de los materiales permitió establecer sus propiedades básicas de granulometría, densidades, finura necesaria para fabricar mezclas en proporción 1:5 con mezclas del 0%, 10% y 15% de grado de disolución de la resina en el agua de la mezcla. Esta caracterización confirmó la idoneidad de los insumos y se permitió comprender como la ausencia y presencia de resina influye en los parámetros físicos iniciales.
- C. La prueba en estado fresco de fluidez marcó un parámetro de control de la mezcla para ser optimo para el pegado de piezas y en estado endurecido como la resistencia a la compresión y densidad permitió pautar el desempeño de cada formulación. La comparativa entre los morteros de 0%, 10% y 15% mostró variaciones que son derivados de la aplicación de la disolución de la resina y si efecto en respuesta mecánica y permeabilidad.
- D. El ensayo sobre pilas y muretes, y las pruebas complementarias permitieron evaluar la resistencia mecánica de los sistemas en conjunto y el comportamiento

frente a la humedad. Los resultados obtenidos reflejan la interacción entre el tabique recocido y los diferentes morteros, permitiendo así identificar el efecto real de las mezclas en la capacidad portante y la durabilidad del sistema constructivo.

- E. El análisis estadístico permitió contrastar de manera objetiva las diferencias entre las formulaciones propuestas. Los resultados reflejan que, aunque cada mezcla presentó ventajas particulares en ciertos parámetros, la mezcla de 10% de resina disuelta evidenció un comportamiento equilibrado y favorable cuando es considerado en conjunto las propiedades de material, del sistema constructivo y de envolvente. La comparación estadística indicó que alcanzó la mayor resistencia en las pilas de mampostería y mantuvo valores adecuados en el estado fresco y endurecido, la cual refleja una respuesta mecánica más eficiente sin comprometer la trabajabilidad. En consecuencia, el análisis comparativo respalda que el mortero constituye la alternativa más consistente en términos de desempeño integral en relación global del sistema constructivo evaluado.

6.3. Nichos de investigación

Existen líneas de investigación que fácilmente se desprenden de los resultados obtenidos, en primer lugar, se identifica la necesidad de optimizar los porcentajes de resina de chukum disuelto en agua de la mezcla, explorando proporciones intermedias y superiores que permitan la determinación del contenido óptimo capaz de mejorar el desempeño mecánico.

Asimismo, es relevante profundizar el análisis microestructural del material que estos cambios observados en las absorción y resistencia sugieren modificaciones internas en las paredes de las cavidades porosas que deben estudiarse mediante técnicas como microscopía electrónica, porosimetría o análisis de carbonatación.

De igual manera resulta pertinente evaluar el comportamiento del mortero frente a ciclos de intemperismo como humedad-sequía, exposición solar o variaciones térmicas con el fin de comprender la durabilidad a largo plazo en condiciones de servicio.

También se identifica un nicho entorno al estudio de la interacción química entre la resina y la cal, dado que no se ha determinado como influye la resina en el proceso de endurecimiento o formación de compuestos secundarios.

Finalmente se sugiere abordar una evaluación económica y ambiental del uso de la resina de chukum considerando los costos, disponibilidad fuera de la península de Yucatán, huella ecológica de traslado, de modo que su aplicación pueda justificarse íntegramente fuera de su entorno local desde una perspectiva técnica y sostenible.

BIBLIOGRAFÍA

- Ali, M. F., Moussa, A., & Abdelhafez, M. (2016). Alternative Lime Based Grouts Used in Re-pointing of Deteriorated Ancient Mortars and their Structural Effects on Composite Unreinforced Masonry Walls of Mekaad Radwan, Ottoman Cairo, Egypt (Case Study). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 225, 410–420. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.06.087>
- Ávalos García, A., & Pérez Urria Carril, E. (2009). Metabolismo secundario en plantas. *Reduca (Biología). Serie Fisiología Vegetal*, 119-145.
- Bustillo Revuelta, M. (2008). Los morteros en la construcción. *Tierra y Tecnología*, 31-38.
- C. S. C. (1959). Morteros para juntas. *Building Research Station Digest*, 17-22.
- Cazalla Vázquez, O. (21 de Enero de 2002). Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico. *Tesis Doctoral*. Universidad de Granada, España.
- Cejudo Collera, M. (2020). Materiales y sistemas constructivos de la arquitectura maya. 209-218.
- Dinç-Şengönül, B., Yüzer, N., Boylu, S., Erdil, K., & Gündedede, Y. A. (2023). Utilization of waste animal blood as an additive in hydraulic lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 400, 132909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132909>
- Dinç-Şengönül, B., Yüzer, N., Boylu, S., Erdil, K., & Gündedede, Y. A. (2023). Utilization of waste animal blood as an additive in hydraulic lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 400, 132909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132909>
- Dinç-Şengönül, B., Yüzer, N., Boylu, S., Erdil, K., & Gündedede, Y. A. (2023). Utilization of waste animal blood as an additive in hydraulic lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 400, 132909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132909>
- Fortes Revilla, C., & Blanco Varela, M. T. (2001). Influencia de tratamientos de hidrofugación en las propiedades de morteros de cal y cal y puzolana. *Materiales de Construcción*, 51(262), 39–52. <https://doi.org/10.3989/mc.2001.v51.i262.370>
- García Noverola, L. M., Moralez Hernández, L. A., & Bojorquez, I. (2022). Caracterización de las propiedades de transmisión térmica de un mortero a base de chukum originario de la zona maya en México. https://drive.google.com/file/d/1LMXeLG8jRGX6ql61WIVB_6vDiQcAkEtj/view?usp=sharing

George, B., & Jayasingh, S. (2021). Experimental Investigation on the Influence of Organic Extract from Citrus Sinensis as an Additive in Lime Mortar Preparation. En I. B. Valente, A. Ventura Gouveia, & S. S. Dias (Eds.), *Proceedings of the 3rd RILEM Spring Convention and Conference (RSCC 2020)* (Vol. 33, pp. 369–378). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76551-4_33

Gourav, K., & Venkatarama Reddy, B. V. (2018). Out-of-plane flexure behaviour of fly ash-lime-gypsum brick masonry walls. *Engineering Structures*, 173, 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.114>

James, C., & Sivasankarapillai, G. (2022). Assessment of Natural Additives Modified Lime Mortars for Repair of Historic Structures with Strength, Durability and Microstructural Parameters. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. <https://doi.org/10.3311/PPci.21135>

Jayasingh, S., & Baby, J. (2022). Influence of organic addition on strength and durability of lime mortar prepared with clay aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 64, 1006–1013. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.088>

Jayasingh, S., & Selvaraj, T. (2022). Influence of organic additive on carbonation of air lime mortar – changes in mechanical and mineralogical characteristics. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(5), 1776–1791. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1731716>

Jayasingh, S., Selvaraj, T., & Raneri, S. (2022). Evaluating the Impact of Organic Addition and Aggregate Gradation on Air Lime Mortar: New Compatible Green Material for Heritage Application. *International Journal of Architectural Heritage*, 16(5), 681–691. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1836287>

León-Martínez, F. M., Cano-Barrita, P. F. D. J., Castellanos, F., Luna-Vicente, K. B., Ramírez-Arellanes, S., & Gómez-Yáñez, C. (2021). Carbonation of high-calcium lime mortars containing cactus mucilage as additive: A spectroscopic approach. *Journal of Materials Science*, 56(5), 3778–3789. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05514-5>

Lorenzo Mora, F., & Carrascosa Moliner, B. (2014). ESTUDIO DE MORTEROS TRADICIONALES DE CAL EN ÁREA MAYA. COMPORTAMIENTO DE DISTINTOS ÁRIDOS FREnte A ENSAYOS FÍSICO-QUÍMICOS. *Ingeniería del agua*, 18(1), ix. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293>

Lorenzo Mora, F., & Carrascosa Moliner, B. (2017). CONTROL IN SITU DE LA PERMEABILIDAD DE AGUA EN MORTEROS DE CAL CON ADITIVOS ORGÁNICOS, EMPLEADOS EN LA REINTEGRACIÓN DE ESTUCOS MAYAS. ARCHÉ. PUBLICACIÓN DEL INSTITUTO UNIVERSITARIO DE RESTAURACIÓN DEL PATRIMONIO DE LA UPV, 11-18.

Martínez Barreiro, M. M., & Guerrero, L. F. (2020). Uso tradicional de morteros con chucum en la península de Yucatán, México. *Journal of Traditional Building, Architecture and Urbanism*, 498-508.

Magaloni, D., Pancella, R., Fruh, Y., CaÑetas, J., & CastaÑo, V. (1995). Studies on The Mayan Mortars Technique. *MRS Proceedings*, 352, 483. <https://doi.org/10.1557/PROC-352-483>

Manoharan, A., & Umarani, C. (2022). Properties of Air Lime Mortar with Bio-Additives. *Sustainability*, 14(14), 8355. <https://doi.org/10.3390/su14148355>

Manoharan, A., Umarani, C., & Renuka, S. M. (2023). Revamp of masonry structures using bio-additive infused air lime mortar as an applicator. *Materials Research Express*, 10(6), 065101. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acdecc>

Melken, A. G. O., Poot, C. B. R., Pinzón, J. A. G., & Canto, N. M. N. (2019). *MORTERO ARQUITECTÓNICO A BASE DE RESINA DEL ÁRBOL DE CHUKUM*. <https://drive.google.com/file/d/1vyOQPBIWuGj04iVhSjSGBURD0Pi49onc/view?usp=sharing>

Navarro-Mendoza, E. G., Alonso-Guzman, E. M., Sanchez-Calvillo, A., Bedolla-Arroyo, J. A., Becerra-Santacruz, H., Navarro-Ezquerra, A., Gonzalez-Sanchez, B., & Martinez-Molina, W. (2023). Physical and Mechanical Characterization of Lime Pastes and Mortars for Use in Restoration. *Heritage*, 6(3), 2582–2600. <https://doi.org/10.3390/heritage6030136>

Pacheco Lira, P. G. (2021). Teoría y práctica del diseño. En I. Carrillo Chávez, L. M. Hernández Nieto, M. Guerrero Salinas, & E. Mancilla Gonzalez. San Luis Potosí: Dirección Fomento Editorial y Publicaciones.

Pacheco Lira, P. G., & Narváez Hernández, L. (2025). Evaluación del comportamiento físico de morteros base cal con aditivos orgánicos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinaria*, 7118-7141.

Padovnik, A., & Bokan-Bosiljkov, V. (2023). The Influence of Animal Glue as an Additive on the Properties of Lime Architectural Grouts. *Sustainability*, 15(17), 12903. <https://doi.org/10.3390/su151712903>

Raneri, S., Mancini, L., Lanzafame, G., Kao, A. P., Giannoukos, K., Malladi, R. C., Kumar, M. S., Palleschi, V., & Selvaraj, T. (2023). From ancient lime mortar recipes to organic laboratory replicas: Interpreting forced carbonation through 3D microstructural architecture. *Journal of Building Engineering*, 78, 107754. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107754>

Ravi, R., Rajesh, M., & Thirumalini, S. (2018). Mechanical and physical properties of natural additive dispersed lime. *Journal of Building Engineering*, 15, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.10.009>

Rekum Recubrimientos naturales. (2018). Ficha Técnica Agua de Chukum. Mérida, Yucatán, México.

Ruiz Esparza, J. (31 de Octubre de 2021). *Chukum Chichén*. Obtenido de Chichén pasta de Chukum: <https://pastadechukum.com/chukum-el-legado-yucateco-al-diseno-y-la-arquitectura/>

Schreiner, T. (2000). Fabricación de cal en mesoamérica: implicaciones para los mayas del preclásico en Nakbe, Petén. (J. Laporte, A. Suasnávar, & B. Arroyo, Edits.) *XIV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, 356-368.

Smith, B. (2023). *Lime mortars and their use through history*. <https://drive.google.com/file/d/14UdFgk3QDeFJ1BeZ1G49WrqyzOZ-i7YC/view?usp=sharing>

Tang, Z., Zhang, H., Pan, Y., Ke, L., Xiang, Z., & Lai, Z. (2023). Experimental study on mechanical properties of basalt Fiber-Clay lime mortar and application in brick masonry. *Construction and Building Materials*, 398, 132479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132479>

Thirumalini, S., Ravi, R., & Rajesh, M. (2018). Experimental investigation on physical and mechanical properties of lime mortar: Effect of organic addition. *Journal of Cultural Heritage*, 31, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.10.009>

Valares Masa, C. (Mayo de 2011). Variación del metabolismo secundario en plantas debida al genotipo y al ambiente. Extremadura, España: Tesis Doctoral.

Zahra, T., Thamboo, J., & Asad, M. (2021). Compressive strength and deformation characteristics of concrete block masonry made with different mortars, blocks and mortar beddings types. *Journal of Building Engineering*, 38, 102213. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102213>