



MATERIALES ARCILLOSOS

COMO ALTERNATIVA SUSTENTABLE EN CONSTRUCCIÓN
PROPUESTA DE ADITIVO PARA BLOQUES

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
DOCTOR EN DISEÑO

MODALIDAD
TESIS

Presenta

Mtro. Esteban de Jesús Jiménez García

Director de Tesis

Dr. Juan Carlos Arteaga Arcos

Tutores Adjuntos

Dr. Miguel Mayorga Rojas

Dr. Silverio Hernández Moreno

Dr. David Joaquín Delgado Hernández

Dra. Silvia Lenyra Meirelles Campos Titotto

Toluca, Estado de México

Junio 2020

MATERIALES ARCILLOSOS

COMO UNA ALTERNATVA SUSTENTABLE EN CONSTRUCCIÓN

PROPUESTA DE ADITIVO PARA BLOQUES

Presenta

Mtro. Esteban de Jesús Jiménez García

Director de Tesis

Dr. Juan Carlos Arteaga Arcos

Tutores Adjuntos

Dr. Miguel Mayorga Rojas

Dr. Silverio Hernández Moreno

Dr. David Joaquín Delgado Hernández

Dra. Silvia Lenyra Meirelles Campos Titotto

Toluca, Estado de México; junio 2020



Contenido

Índice de figuras	I
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Problemática ambiental en la construcción.....	4
1.3 Alternativas de solución	10
1.4 Objetivos	19
1.5 Objetivos Particulares	19
1.6 Hipótesis.....	19
1.7 Investigaciones relacionadas.....	20
1.8 Metodología presente en el documento	23
Capítulo 2 Materiales arcillosos como elemento constructivo	29
2.1 Conceptos.....	29
2.2 Composición y estructura de la arcilla	31
2.3 Propiedades y Características de las arcillas	36
2.4 Elementos estabilizadores de tierra.....	38
2.5 Arquitectura de tierra en el mundo	40
2.6 Técnicas constructivas con arcilla y prototipos.....	42
Tapial	44
Bloque de Tierra Comprimida (BTC).....	45
Adobe	47
Cob	49
Bahareque	49
Llenado	51
Capítulo 3 Desarrollo de mezcla a base de arcilla y aditivos como propuesta en la elaboración de elementos constructivos.....	53

3.1 Compuestos y características.....	53
Arcilla.....	54
Polisacárido	56
Sacarosa	60
Tripolifosfato de Sodio	62
Alcohol Polivinílico	63
Ácido Acético.....	64
Pectina citrina lenta	65
Cemento Portland	66
3.2 Equipo para preparación de mezcla.....	68
Equipo para preparar aditivo y mezcla	68
3.3 Proceso de preparación de mezcla (100 g de arcilla).....	69
Cantidades.....	69
Proceso.....	70
3.4 Pruebas de laboratorio.....	71
Contracción lineal al secado.....	72
Contracción volumétrica al secado	73
Densidad.....	74
Prueba de compresión	75
Prueba Vicat	82
Prueba de pH.....	84
Prueba de absorción total	85
Prueba de absorción inicial (capilaridad)	86
3.5 Evaluación de Impacto Ambiental.....	87
Capítulo 4 Anexos	91
4.1 Propuestas de aplicación.....	91

4.2 Redes de trabajo	96
Conclusiones.....	97
Referencias	100

Índice de figuras

FIGURA 1-1 REPRESENTACIÓN DE CASAS INCAS CON CUBIERTA DE PAJA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA....	2
FIGURA 1-2 MURO DE ADOBE. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	3
FIGURA 1-3 CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA PRIMARIA, HISTÓRICO Y PROYECTADO DE 1950 A 2050. FUENTE: WORLD ENERGY 2017-2050: ANNUAL REPORT [15].	5
FIGURA 1-4 EMISIÓN MUNDIAL DE DIÓXIDO DE CARBONO EN MILLONES DE TONELADAS 1950 - 2100. FUENTE: WORLD ENERGY 2017-2050: ANNUAL REPORT [15].	6
FIGURA 1-5 ZONA URBANA DE SANTO ANDRÉ, SÃO PAULO, BRASIL. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	7
FIGURA 1-6 REPRESENTACIÓN DE UN HORNO PARA TABIQUE, UTILIZANDO MADERA COMO COMBUSTIBLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	9
FIGURA 1-7 FLORA MEXICANA, ZACAZONAPAN, ESTADO DE MÉXICO. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	10
FIGURA 1-8 REPRESENTACIÓN DE IGLÚ COMO EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN CON MATERIAL DE LA ZONA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	12
FIGURA 1-9 REPRESENTACIÓN DE CASA LACUSTRE COMO EJEMPLO DE ADAPTACIÓN AL ENTORNO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	12
FIGURA 1-10 REPRESENTACIÓN DE CONSTRUCCIÓN CON ELEMENTOS DE TIERRA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	13
FIGURA 1-11 INTERIOR DE UN HORNO PARA TABIQUES. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	27
FIGURA 2-1 GRANULOMETRÍA DE DISTINTOS MATERIALES. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	30
FIGURA 2-2 REPRESENTACIÓN DE TETRAEDROS DE SILICIO Y OXÍGENO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ...	31
FIGURA 2-3 REPRESENTACIÓN DE OCTAEDROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	32
FIGURA 2-4 REPRESENTACIÓN DE LÁMINA CON UNA CAPA DE TETRAEDROS Y UNA DE OCTAEDROS (BILAMINAR). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	33
FIGURA 2-5 REPRESENTACIÓN DE LÁMINA CON DOS CAPAS DE TETRAEDROS Y UNA DE OCTAEDROS EN MEDIO (TRILAMINAR). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	33
FIGURA 2-6 MURO DE ADOBE RECUBIERTO CON MORTERO. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	37
FIGURA 2-7 MURO DE ADOBE, BLOCK Y PIEDRA. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	39
FIGURA 2-8 REPRESENTACIÓN EN COLOR CAFÉ DE LAS ZONAS GEOGRÁFICAS CON CONSTRUCCIONES DE TIERRA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	41
FIGURA 2-9 MURO DE ADOBE. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	42
FIGURA 2-10 REPRESENTACIÓN DE MURO DE TAPIAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	44
FIGURA 2-11 MURO DE BTC. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	45
FIGURA 2-12 MURO DE BTC. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	46
FIGURA 2-13 MURO DE ADOBE. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	48

II

FIGURA 2-14 REPRESENTACIÓN DE MURO REALIZADO CON BAHAREQUE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	49
FIGURA 2-15 RAMAS DE "CHAPULIXTLE" UTILIZADAS EN LA CONSTRUCCIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE BAHAREQUE. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.....	50
FIGURA 2-16 REPRESENTACIÓN DE LLENADO DE COSTALES, BOTELLAS Y LLANTAS CON TIERRA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	51
FIGURA 2-17 EDIFICIO EDUCATIVO UBICADO EN LA CIUDAD DE MÉXICO. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	52
FIGURA 3-1 PRESENTACIÓN DE 4 DISTINTOS TIPOS DE ARCILLA, COMO PARTE DEL PROCESO COMPARATIVO. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	54
FIGURA 3-2 ARCILLA OM4. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	55
FIGURA 3-3 ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA GLUCOSA. FUENTE: HTTPS://WWW.LIFEDER.COM/EJEMPLOS-DE-MONOSACARIDOS/ . CONSULTADA EL 25/03/2019.	56
FIGURA 3-4 ESTRUCTURA DE LA AMILOSA. FUENTE: HTTP://WWW.EDUALIMENTARIA.COM/FRUTAS-HORTALIZAS-FRUTOS-SECOS-COMPOSICION-PROPIEDADES/PREGUNTAS-FRECUENTES/2-UNCATEGORISED/78-HIDRATOS-DE-CARBONO-CARBOHIDRATOS . CONSULTADA EL 25/03/2019.	57
FIGURA 3-5 ESTRUCTURA DE LA AMILOPECTINA. FUENTE: HTTP://WWW.EDUALIMENTARIA.COM/FRUTAS-HORTALIZAS-FRUTOS-SECOS-COMPOSICION-PROPIEDADES/PREGUNTAS-FRECUENTES/2-UNCATEGORISED/78-HIDRATOS-DE-CARBONO-CARBOHIDRATOS . CONSULTADA EL 25/03/2019.	57
FIGURA 3-6 GELATINIZACIÓN DEL ALMIDÓN. FUENTE: QUÍMICA DE LOS ALIMENTOS, SALVADOR BADUI. 2006.	58
FIGURA 3-7 ALMIDÓN UTILIZADO PARA LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.	59
FIGURA 3-8 UNIÓN DE GLUCOSA Y FRUCTOSA.	60
FIGURA 3-9 SACAROSA O "AZÚCAR DE MESA". FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	61
FIGURA 3-10 TRIPOLIFOSFATO DE SODIO UTILIZADO EN LAS PRUEBAS. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	62
FIGURA 3-11 MODELO DEL TRIPOLIFOSFATO DE SODIO.	62
FIGURA 3-12 ALCOHOL POLIVINÍLICO UTILIZADO EN LAS PRUEBAS. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	63
FIGURA 3-13 ESTRUCTURA DEL ÁCIDO ACÉTICO.	64
FIGURA 3-14 PECTINA UTILIZADA PARA PRUEBAS DE LABORATORIO. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	65
FIGURA 3-15 BULTO DE CEMENTO, 50 KG. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	66
FIGURA 3-16 CEMENTO UTILIZADO EN LAS PRUEBAS. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.....	67
FIGURA 3-17 MEZCLADORA KITCHENAID PROFESSIONAL 600. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.....	68
FIGURA 3-18 COLOCACIÓN DE LOS MATERIALES. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	69
FIGURA 3-19 CUBOS HECHOS PARA PRUEBAS MECÁNICAS. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	70
FIGURA 3-20 MUESTRAS DE ARCILLA CON ADITIVO. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	71
FIGURA 3-21 MEDIAS PARA MUESTRAS DE ARCILLA CON ADITIVO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	71
FIGURA 3-22 MOLDES PARA PRUEBAS DE CONTRACCIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	72

III

FIGURA 3-23 CUBO SOMETIDO A PRUEBA VOLUMÉTRICA AL SECADO. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	73
FIGURA 3-24 CUBO EN BALANZA DIGITAL. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	74
FIGURA 3-25 PRUEBA DE COMPRESIÓN. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	75
FIGURA 3-26 RESULTADOS DE ENSAYO 1 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	76
FIGURA 3-27 RESULTADOS DE ENSAYO 2 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	77
FIGURA 3-28 RESULTADOS DE ENSAYO 3 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	78
FIGURA 3-29 RESULTADOS DE ENSAYO 4 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79
FIGURA 3-30 RESULTADOS DE ENSAYO 5 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	80
FIGURA 3-31 ÁREA DE TRABAJO, SOFTWARE DE EQUIPO DE COMPRESIÓN. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	81
FIGURA 3-32 BOCETO DE DISEÑO APARATO TIPO VICAT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	82
FIGURA 3-33 RESULTADOS DE PRUEBA VICAT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	83
FIGURA 3-34 ENSAYO DE PRUEBA VICAT. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	83
FIGURA 3-35 GRADO DE PH OBTENIDO EN LA MEZCLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	84
FIGURA 3-36 ENSAYO DE ABSORCIÓN TOTAL. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	85
FIGURA 3-37 ENSAYO DE ABSORCIÓN INICIAL. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	86
FIGURA 3-38 CONSUMO ENERGÉTICO DEL TABIQUE ARTESANAL Y EL TABIQUE PROPUESTO EN EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN DURANTE LA ETAPA A1 Y A3.	90
FIGURA 3-39 PORCENTAJE DE CONSUMO ENERGÉTICO DEL MATERIAL PROPUESTO EN RELACIÓN CON EL TABIQUE ARTESANAL.	90
FIGURA 0-1 PROPUESTAS DE APLICACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	91
FIGURA 0-2 APLICACIÓN EN CREACIÓN DE BLOQUES CONSTRUCTIVOS, ELEMENTOS DIVISORIOS Y DECORATIVOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	92
FIGURA 0-3 REPRESENTACIÓN DE RECÁMARA CON BLOQUES DE ARCILLA EN PISO Y MUROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	93
FIGURA 0-4 REPRESENTACIÓN DE SALÓN CON BLOQUES DE ARCILLA COMO CELOSÍA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	93
FIGURA 0-5 REPRESENTACIÓN DE ACOMODO CON BLOQUES DE ARCILLA EN MAQUETA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	94
FIGURA 0-6 REPRESENTACIÓN DE DOMO GEODÉSICO FABRICADO CON ARCILLA EXTRUIDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	94
FIGURA 0-7 REPRESENTACIÓN DE VIVIENDA CON ARCILLA ESTRUCTURAL EN MURO 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	95
FIGURA 0-8 REPRESENTACIÓN DE VIVIENDA CON ARCILLA ESTRUCTURAL EN MURO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	95
FIGURA 0-9 REDES DE TRABAJO.	96

Índice de tablas

TABLA 1-1 ACTIVIDAD RADIOACTIVA DE ALGUNOS MATERIALES. FUENTE: ARQUITECTURA DE TIERRA. CARACTERIZACIÓN DE LOS TIPOS EDIFICATORIOS. YUSTE, BEATRIZ.	14
TABLA 1-2 ENERGÍA INCORPORADA DE ALGUNOS MATERIALES COMPARADOS CON LA TIERRA. FUENTE: CARACTERIZACIÓN DE LOS TIPOS EDIFICATORIOS. YUSTE, BEATRIZ.	15
TABLA 1-3 TABLA COMPARATIVA DE MATERIALES EN RELACIÓN A SUS EMISIONES DE CO ₂ . FUENTE: TABLA BASADA EN EL ARTÍCULO “CONSTRUCCIÓN CON TIERRA EN EL SIGLO XXI”.	16
TABLA 2-1 TABLA CON GRANULOMETRÍA BASADA EN LA NORMA ISO 14688-1:2018 [53].	30
TABLA 2-2 COMPOSICIÓN DE ARCILLAS. FUENTE: LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS. GARCÍA ROMERO, EMILIA; SUÁREZ BARRIOS, MERCEDES. MADRID. [54].	35
TABLA 2-3 NORMAS, CONSTRUCCIÓN CON TIERRA, VIGENTES POR PAÍS Y AÑO. FUENTE: THE EARTH BUILDING NORMATIVE DOCUMENTS IN THE WORLD. CID, J.; MAZARRÓN, F.R.; CAÑAS, I. 2011 [57]. .	43
TABLA 3-1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ARCILLA OM4. FUENTE: FICHA TÉCNICA PROPORCIONADA POR KOPRIMO S.A. DE C.V.	55
TABLA 3-2 TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LA ARCILLA OM4. FUENTE: FICHA TÉCNICA PROPORCIONADA POR KOPRIMO S.A. DE C.V.	55
TABLA 3-3 ANÁLISIS QUÍMICO DE LA ARCILLA OM4. FUENTE: FICHA TÉCNICA PROPORCIONADA POR KOPRIMO S.A. DE C.V.	55
TABLA 3-4 PROPIEDADES DE COCIMIENTO DE LA ARCILLA OM4. FUENTE: FICHA TÉCNICA PROPORCIONADA POR KOPRIMO S.A. DE C.V.	55
TABLA 3-5 CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS ALMIDONES USADOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. FUENTE: QUÍMICA DE LOS ALIMENTOS, SALVADOR BADUI. 2006.	58
TABLA 3-6 CANTIDADES PROPUESTAS EN EL PROYECTO. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	69
TABLA 3-7 PRUEBA VOLUMÉTRICA EN CUBOS. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	73
TABLA 3-8 PRUEBA VOLUMÉTRICA EN VIGAS. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	73
TABLA 3-9 PESO EN MUESTRAS DE ARCILLA CON ADITIVO. FUENTE: FOTO DEL AUTOR.	74
TABLA 3-10 COMPARATIVA DE DENSIDAD DE MATERIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74
TABLA 3-11 DATOS DE ENSAYO 1 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	76
TABLA 3-12 RESULTADOS DE ENSAYO 1 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	76
TABLA 3-13 DATOS DE ENSAYO 2 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	77
TABLA 3-14 RESULTADOS DE ENSAYO 2 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	77
TABLA 3-15 DATOS DE ENSAYO 3 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	78
TABLA 3-16 RESULTADOS DE ENSAYO 3 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	78
TABLA 3-17 DATOS DE ENSAYO 4 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79
TABLA 3-18 RESULTADOS DE ENSAYO 4 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79

TABLA 3-19 DATOS DE ENSAYO 5 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	80
TABLA 3-20 RESULTADOS DE ENSAYO 5 A COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	80
TABLA 3-21 RESUMEN DE GRÁFICAS, PRUEBAS DE COMPRESIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	81
TABLA 3-22 RESULTADOS DE PRUEBA VICAT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	83
TABLA 3-23 COMPARATIVA DE ARCILLAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, BASADA EN DIVERSAS PUBLICACIONES [91] [92] [93] [94].	88
TABLA 3-24 CATEGORÍAS DEL INDICADOR CUMULATIVE ENERGY DEMAND [95].	88
TABLA 3-25 COMPARATIVA EN EL CONSUMO ENERGÉTICO DE MATERIALES CONSIDERANDO ETAPA A1 Y A3 DE LO ESTABLECIDO EN LA NORMA ISO 14040, MEDIANTE EL INDICADOR CUMULATIVE EXERGY DEMAND [95].	89

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

La edificación es una necesidad básica para el ser humano. Esta puede ser entendida como cualquier construcción en la que se desarrollan actividades.

En términos generales es posible catalogar a las edificaciones en habitacionales, recreativas, deportivas, gubernamentales, educativas, administrativas, de salud, comerciales, de comunicaciones, religiosas, industriales, militares, urbanas, por mencionar algunas. La edificación comienza con el hombre, se hace presente en las primeras construcciones efímeras como chozas, tiendas y cuevas en el paleolítico inferior (50,000 a.C.) y también en los grandes rascacielos contemporáneos [1].

Los primeros materiales empleados en la construcción fueron: piedra, madera, hojas, fibras naturales, pieles, tierra y prácticamente todo aquello que la naturaleza brinda; estos otorgaban al

hombre lo necesario para cubrir sus necesidades nómadas de refugio, por lo cual, se utilizaban los materiales que se encuentran naturalmente en el entorno.

En el periodo neolítico (6,000 a.C.), el hombre dio un gran paso al descubrir la agricultura y la ganadería. Esto permitió que el hombre se volviera sedentario y, por lo tanto, la construcción cobró mayor importancia y se hizo semipermanente siendo el adobe, la madera y la piedra los materiales más utilizados [1].

Conforme avanzó el conocimiento y la tecnología se pudo echar mano de nuevos materiales, destacando los polímeros, metales, maderas tratadas, pinturas, entre otros. Actualmente los materiales pueden ser clasificados de acuerdo con su función y a su origen como se explica a continuación:

Materiales pétreos. Se refiere a las piedras naturales lucidas en diversas presentaciones como bloques, losetas o granos, entre los que se incluyen la arena, la grava, y el mármol.

Materiales Cerámicos y vidrios. Proviene de minerales no metálicos con electrones libres, estos se obtienen a partir de la cocción de barro; algunos de los ejemplos son las tejas, los ladrillos y los azulejos.

Materiales metálicos. Obtenidos a partir de minerales como el aluminio, el acero, o el hierro.

Maderas. Productos obtenidos de los árboles, entre los cuales destaca el roble o el pino, o bien, algunos de sus derivados como el triplay o los aglomerados.

Polímeros. Unión de monómeros, siendo el Policloruro de Vinilo (PVC) el material más destacado.

Materiales compuestos. Mezcla de distintos tipos de materiales con diferentes propiedades como el concreto o el asfalto

Materiales Aglutinantes. Productos pulverizados que al contacto con el agua sufren transformaciones químicas que producen su endurecimiento, como el cemento o el yeso. [2].

La tierra como material de construcción ha sido utilizada en todos los tiempos. Los primeros hombres la usaban como barreras protectoras en cuevas con el fin de cubrirse de condiciones climáticas o simplemente para protegerse de animales [3]. La disponibilidad de la tierra, siendo posible encontrarla en casi cualquier parte del mundo, facilitó su utilización en la edificación.

Culturas milenarias emplearon la tierra como solución en todo tipo de estructuras, mismas que aún es posible apreciar. Las evoluciones de las diversas técnicas quedan expuestas al paso de los años y a lo largo de todo el mundo. Sin embargo, durante los últimos años el uso de la tierra en construcción ha retomado fuerza en zonas urbanas, esto gracias a sus propiedades sustentables [4].



Figura 1-1 Representación de casas Incas con cubierta de paja. Fuente: elaboración propia.

La tierra cuenta con características mecánicas, térmicas y acústicas, que son propensas al mejoramiento mediante la intervención humana, por lo que su uso como material de construcción fue optimizado al agregar elementos como ramas o fibras vegetales. Posteriormente al tratar este material en hornos se obtuvo un elemento con mayor resistencia, misma que fue aprovechada como bloques constructivos o ladrillos, alrededor del 6,000 a.C. [5].

El hombre desarrolló propuestas de construcción con diferentes técnicas [6], la tierra apisonada fue una de ellas, la cual consiste en colocar una capa de tierra mojada preparada y compactarla, repitiendo el procedimiento hasta alcanzar la altura deseada. Esto permite aumentar la densidad y alcanzar resistencias desde 25 hasta 40 kg/cm². Otras técnicas incluyen la colocación de piedras entre los elementos de tierra [3]. Se ha incorporado el uso de aditivos como cemento, cal, asfalto o resinas epóxicas, así como la utilización de la llamada “tierra reforzada”, “adobe reforzado” o “adobe armado”, al cual se le adicionan elementos como varillas o bambú. Se ha estimado que entre el 30 % y el 50 % de la población mundial vive en construcciones hechas de tierra [7].

Figura 1-2 Muro de adobe. Fuente: foto del autor.

La arcilla es el componente más abundante en el suelo [8]. Está situada normalmente por debajo de la capa vegetal, aproximadamente a 30 cm. La arcilla puede encontrarse en diferentes tonalidades, habitualmente entre amarillos y rojos, y cumple la función de cementante. Las características principales de este componente son la adherencia, elasticidad y dureza. La arcilla puede ser clasificada por su tamaño, su textura y su estabilidad, estables-no expansivas e inestables-expansibles, lo cual se puede apreciar a simple vista en el agrietamiento del suelo o de una muestra, ya que los inestables ganan y pierden humedad con mucha facilidad [4].



1.2 Problemática ambiental en la construcción

Es bien sabido que cualquier actividad humana conlleva impactos ambientales, algunos de ellos más perjudiciales que otros.

Lamentablemente al observar, recorrer y hacer uso de los elementos construidos es posible apreciar no en todas las edificaciones se han considerado planeaciones en la vida útil de los edificios [9], si bien los criterios de sustentabilidad han recobrado fuerza [10] es necesario que se incorporen plenamente como parte intrínseca en el diseño; disminuyendo el uso de materiales con alta energía incorporada y de difícil reincorporación al ambiente.

Caraballo [11] cita lo siguiente “*el patrimonio cultural y el patrimonio natural están cada vez más amenazados de destrucción, no sólo por las causas tradicionales de deterioro, sino también por la evolución de la vida social y económica que las agrava con fenómenos de alteración o de destrucción aún más temibles*”.

La globalización comienza poniendo atención a lo que es de todos, y si se puede decir que algo es de todos, entonces se habla de la naturaleza; si algo se daña o falta, entonces se estará afectando el presente y comprometiendo un futuro inmediato. De esta manera se obtiene una nueva valoración, primero se protege y luego se gestiona [12].

El patrimonio natural es vital e irremplazable, el desgaste o pérdida de este bien común es una afectación global.

No obstante, los problemas ambientales son claros. Existe un alto consumo de energía de fuentes no limpias como la quema de carbón, gas natural y combustibles fósiles.

Deffis [13] explica que el consumo global de energía aumento desde la década de los 20 hasta mediados de los 70 seis veces. El consumo sigue creciendo de manera inimaginable.

La demanda mundial de energía aumentó un 2.3 % en 2018, lo cual representa su ritmo más rápido en la última década. El carbón representa un tercio de las emisiones totales de CO₂ en 2018 [14].

El World Energy 2017-2050: Annual Report [15] muestra el consumo mundial de energía primaria, histórico y proyectado de 1950 a 2050. Los datos muestran un aumento en todos los tipos de energía, como se muestra en la figura 1-3.

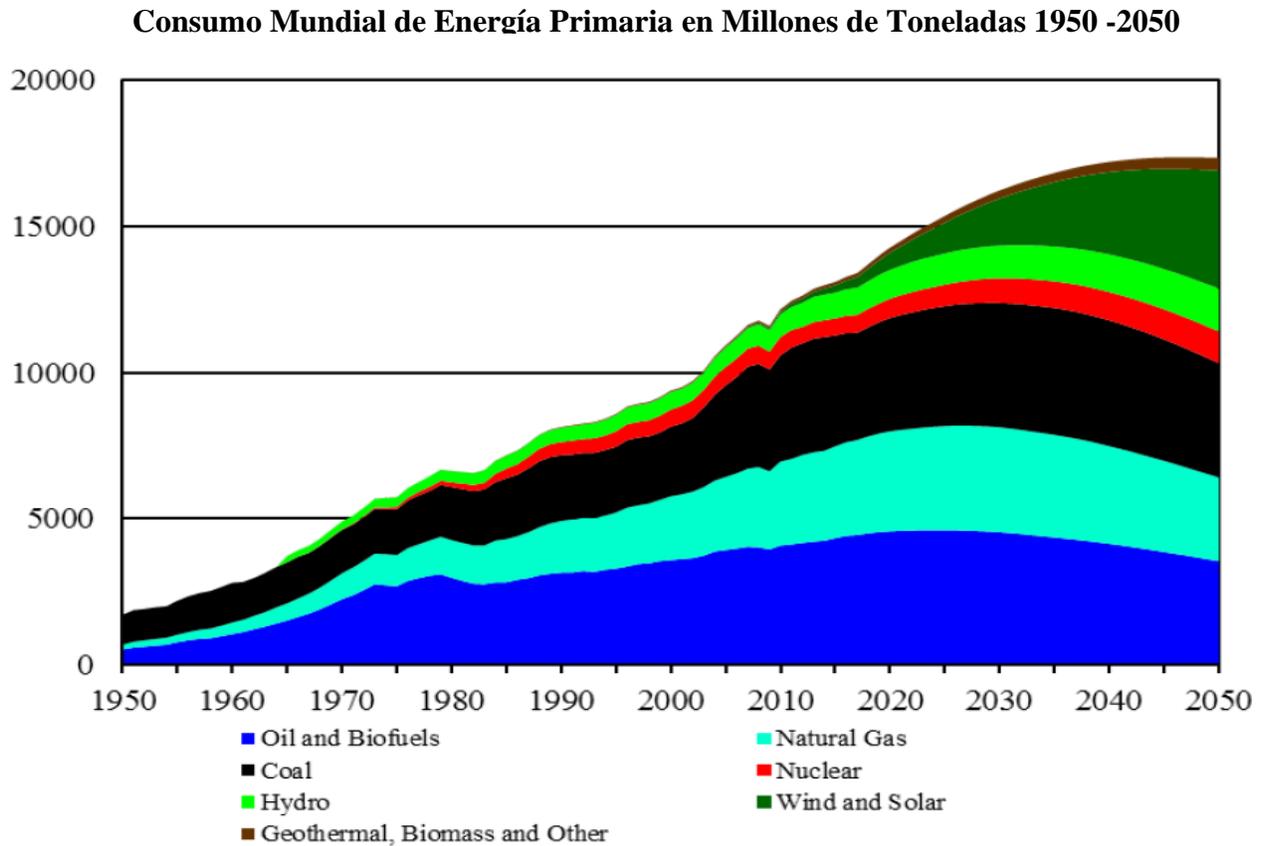


Figura 1-3 Consumo mundial de energía primaria, histórico y proyectado de 1950 a 2050.
 Fuente: World Energy 2017-2050: Annual Report [15].

El petróleo, el carbón y el gas natural muestran una proyección máxima en 2030, con una disminución en años posteriores. Esto resultado del aumento de otras fuentes de energía, como aquellas provenientes del sol y el viento.

Sin embargo, aunque las fuentes renovables representan un aumento, todavía no es suficiente para cubrir la demanda anual de energía.

Las emisiones mundiales de dióxido de carbono provenientes de combustibles fósiles quemados desde 1950 y con proyección a 2100 indican un pico de emisiones en 2030 sumando 37.1 mil millones de toneladas [15]. Esta información es relevante debido a la estrecha relación entre las emisiones de dióxido de carbono y el aumento de la temperatura en la superficie terrestre [15].

Lamentablemente los problemas naturales y ambientales son cada vez mayores. Actualmente se pueden mencionar los siguientes hechos de manera cotidiana, pero con grandes repercusiones, como las que se muestran a continuación.

- Desgaste de la capa de ozono
- Polución del aire
- Smog
- Acidificación
- Deforestación
- Cambio climático
- Agotamiento de recursos fósiles
- Contaminación de mares
- Agotamiento de reservas hídricas
- Mal tratamiento de los desechos
- Inadecuada producción energética
- Inadecuado uso de los recursos naturales
- Alteración del hábitat
- Pérdida de biodiversidad

Emisión Mundial de Dióxido de Carbono en Millones de Toneladas 1950 - 2100

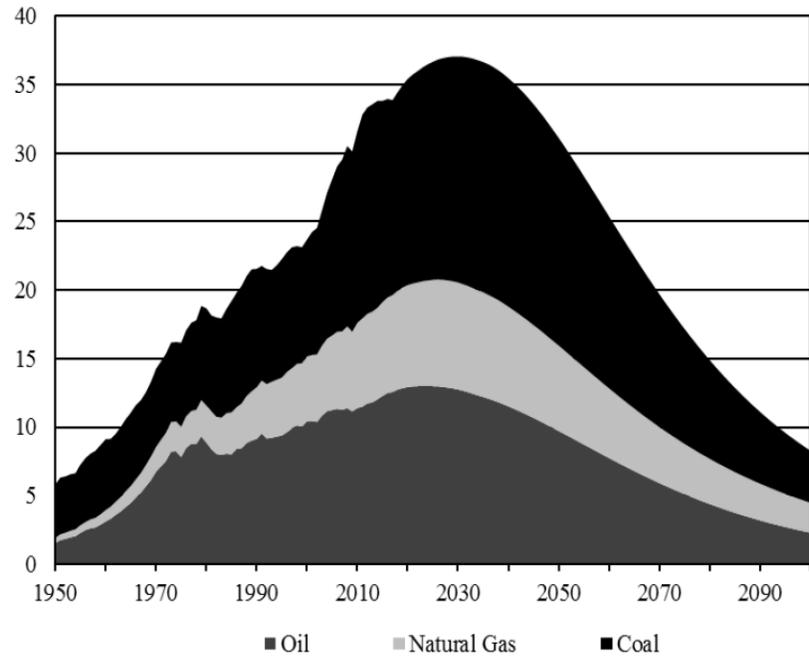


Figura 1-4 Emisión Mundial de Dióxido de Carbono en Millones de Toneladas 1950 - 2100. Fuente: World Energy 2017-2050: Annual Report [15].

La construcción es un sector que asume una parte significativa en el impacto ambiental. La construcción y la infraestructura consumen entre el 45% y el 60% de los materiales extraídos de la litosfera, y son el origen de la mitad de las emisiones de CO₂ vertidas a la atmósfera [16]. Es por esto por lo que toda persona involucrada en el proceso de edificación tiene que poner primordial atención en el tipo de material que emplea.



El sector global de la edificación está creciendo exponencialmente, se estima que, durante los próximos 40 años, se van a construir en el mundo 230 mil millones de metros cuadrados de nuevas infraestructuras

Figura 1-5 Zona urbana de Santo André, São Paulo, Brasil. Fuente: foto del autor.

Las emisiones de CO₂ relacionadas con los edificios han seguido aumentando en torno al 1% anual desde 2010 [17]. Como ejemplo, la cantidad de emisiones de CO₂ en la construcción representa el 47% de emisiones totales de CO₂ En Reino Unido [18].

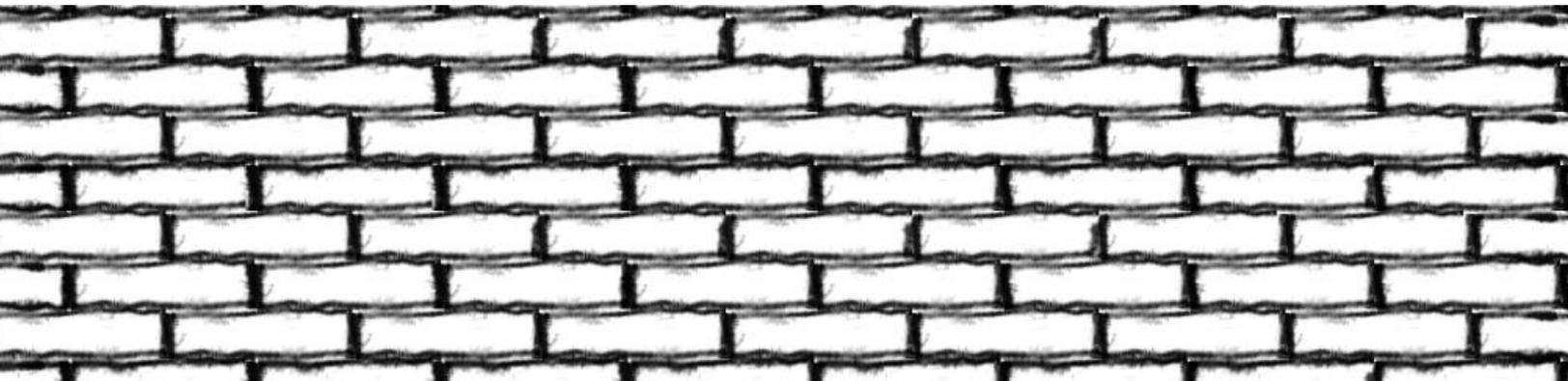
Con el aumento de las ciudades y de la población, la demanda en la producción de ladrillos también se ha incrementado [19]. Hoy en día el término ladrillo se emplea para describir cualquier unidad de construcción a base de arcilla, que regularmente ha pasado por un proceso de sinterizado o quema para su producción; su tamaño, versatilidad, peso y forma de uso facilitan muchos procesos constructivos.

Con el tiempo, se desarrollaron diferentes procesos para hacer ladrillos y así, contrarrestar algunas desventajas como la baja resistencia estructural y las características hidrófilas [7]; algunos de ellos incluyen elementos heterogéneos como fibras naturales, aditivos de cemento, o grasas para cubrir la superficie.

Los procesos más utilizados en la industria ladrillera incluyen arcilla quemada, ladrillos refractarios, arcilla con cal y ladrillos de concreto [20], todos estos con procesos no ecológicos.

El proceso tradicional de fabricación de ladrillos emite CO₂ y otros gases contaminantes a la atmósfera [21]. Los hornos de ladrillos son una de las industrias a pequeña escala que representan una importante fuente de contaminación. Los productores artesanales usan hornos para quemar ladrillos que consumen de 4 a 6 Mj/Kg de ladrillo cocido [22] generando fuertes emisiones de contaminantes al aire, principalmente CO₂. Sin embargo, la falta de conocimiento sobre la afectación durante estos procesos resulta en cierta apatía [19].

Para 1997 el consumo total de ladrillos y productos cerámicos en Europa Occidental era de aproximadamente 89 Mt por año [23].



Afectaciones al entorno que se reflejan en la salud humana también son producto de la afectación al ambiente [24]. Existe un registro de daños en la salud de personas que habitan cerca de hornos para ladrillos [19].

Cifras dadas en la Asamblea Mundial de la Salud en Ginebra revelan que el 25% de las enfermedades que afectan a los humanos son producto del ambiente, principalmente los daños en agua, tierra y aire. Esta contaminación resulta en 13 millones de muertes al año, donde 7 millones son asociadas a problemas respiratorios; además, 12% de las personas que viven en grandes ciudades habitan zonas que no cumplen las guías medioambientales de la Organización Mundial de la Salud (OMS) [25].

Adicional a lo anterior, la afectación de los edificios en la salud humana es notable, la OMS estima que el 30% de los edificios cumplen con las características del denominado “edificio enfermo”,

Lo cual hace referencia a una serie de patologías que afectan a más del 20% de las personas que habitan o trabajan en él. Entre los factores responsables se encuentran los agentes químicos como polvo, fibras, dióxido de carbono, ozono, compuestos orgánicos volátiles, por mencionar algunos, así como los agentes biológicos tales como bacterias, ácaros, hongos, esporas y toxinas; los agentes físicos como la iluminación, color, ruido, texturas, vibraciones, humedad relativa, ventilación y ambiente térmico. Finalmente, los principales síntomas se pueden agrupar en irritación de ojos, piel, nariz y garganta, sequedad de piel y mucosas, eritema cutáneo, fatiga mental, cansancio, somnolencia, infecciones en vías respiratorias, náuseas, entre otras.

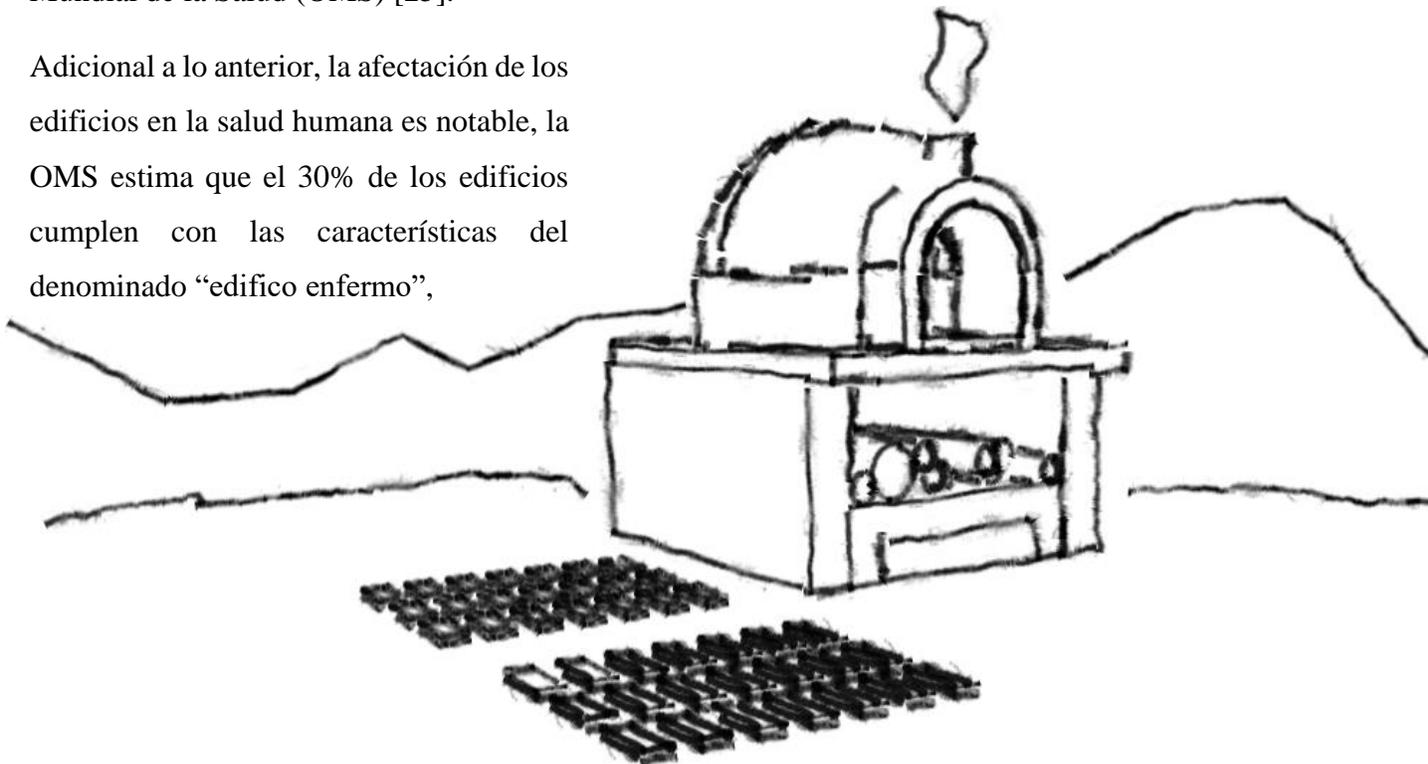


Figura 1-6 Representación de un Horno para Tabique, utilizando madera como combustible. Fuente: elaboración propia.

1.3 Alternativas de solución

México cuenta con un Patrimonio Natural, orografía, clima, flora, fauna, y otros factores hacen que sea un país icono en materia de patrimonio natural. Artistas como José María Velazco, Luis Nishizawa, Ignacio Barrios, Gerardo Murillo, Alfredo Zalce y Joaquín Clausell entre otros más, dan testimonio de esto a través de sus obras.

La UNESCO respalda a México como el país de América Latina con más reconocimientos de patrimonio mundial y el sexto a nivel mundial, solo por detrás de Italia, España, China, Francia y Alemania, ya que cuenta con 31 sitios inscritos en la Lista de Patrimonio Mundial, de los cuales, 6 bienes son naturales, 27 bienes son culturales y 1 mixto [26]. La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) resguarda más de 170 áreas naturales [27].

Sin embargo, el ser humano, con el fin de suplir necesidades básicas, ha cambiado su entorno; como profesionales de la construcción arquitectos e ingenieros tienen la oportunidad de disminuir el impacto que la industria de la construcción genera.

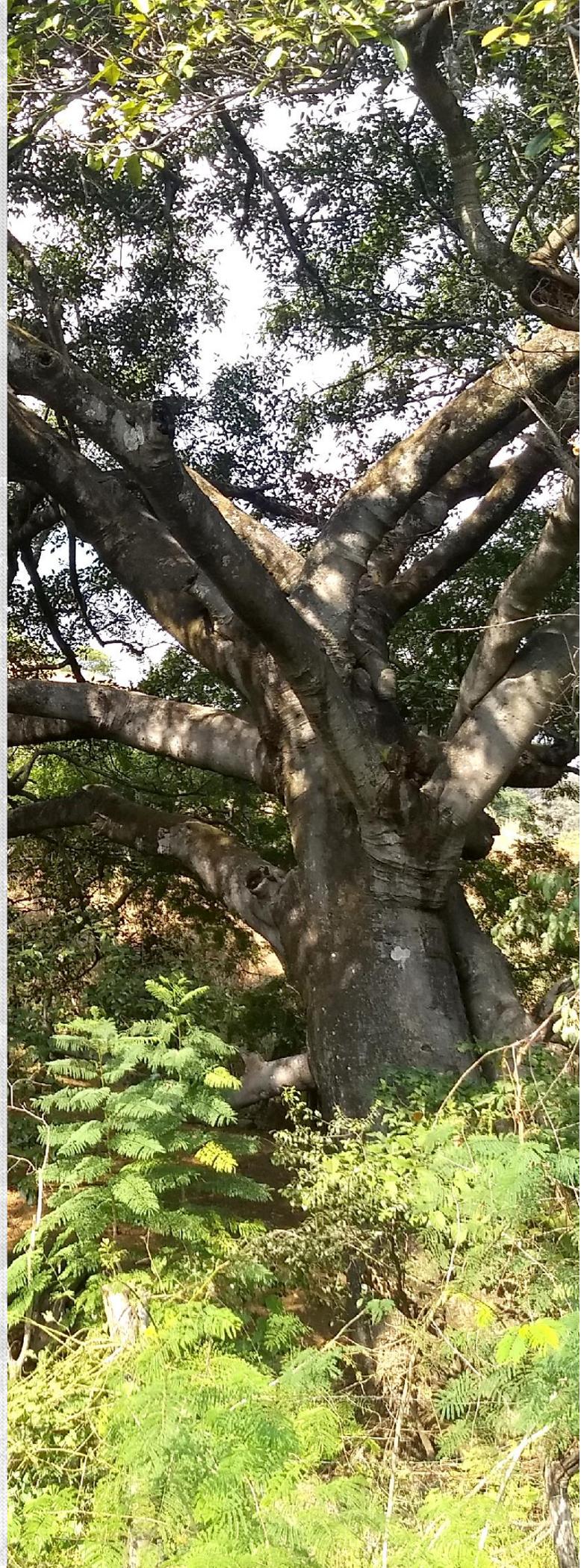


Figura 1-7 Flora mexicana, Zacazonapan, Estado de México. Fuente: foto del autor.

Hernández [28] en su artículo “Tecnologías actuales aplicadas al desarrollo urbano sustentable” hace un llamado para aprovechar el avance de la tecnología en beneficio de la sociedad y del mundo en el que vivimos.

El desarrollo de materiales es ampliamente complementado con tecnología que antes no existía, dando oportunidad a innovaciones sustentables que ganen terreno frente a los procesos tradicionales que aceleran el calentamiento global.

En la actualidad es totalmente posible regresar a los materiales básicos que, aunque para algunos pudieran parecer rudimentarios, anticuados o de baja calidad, ahora respaldados de innovaciones y avances tecnológicos logran seguir siendo una vía ecológica y sustentable para las demandas presentes, considerando todo el ciclo de vida, que se presenta desde la extracción de materias primas, su transformación, su almacenaje, su puesta en la obra, su aplicación, su uso y hasta su reciclaje.

La elección de los materiales de construcción depende de la disponibilidad, los conocimientos y experiencias locales relacionados a la construcción y la aceptación de la población [29].

La elección de los materiales es vital para generar un ambiente adecuado dentro y fuera de la construcción; cada material y acabado darán una sensación diferente y particular; estudios en muestras de 15 edificios clasificados de acuerdo a sus materiales y temporalidad han demostrado que el material tiene una fuerte influencia en la calidad de vida que se desarrolla dentro de una edificación [30], incluso el color que refleja causará diferentes efectos [31].

Las consideraciones de materiales abarcan sus características para interiores, así como las características idóneas para estar situados en el exterior de las edificaciones, ya que están expuestos a agentes desgastantes como la lluvia, viento y radiación.

En el aprovechamiento de los recursos, se apunta hacia la utilización de materiales obtenidos cerca o directamente en el lugar de trabajo. Contamos con ejemplos en el aprovechamiento de materiales en todo el mundo. Los esquimales, construyen iglús con bloques de hielo, en algunas regiones utilizan madera, o simplemente pieles de diversos animales. Al hacer uso de los materiales de la región entonces se puede mantener el equilibrio ecológico en la zona.

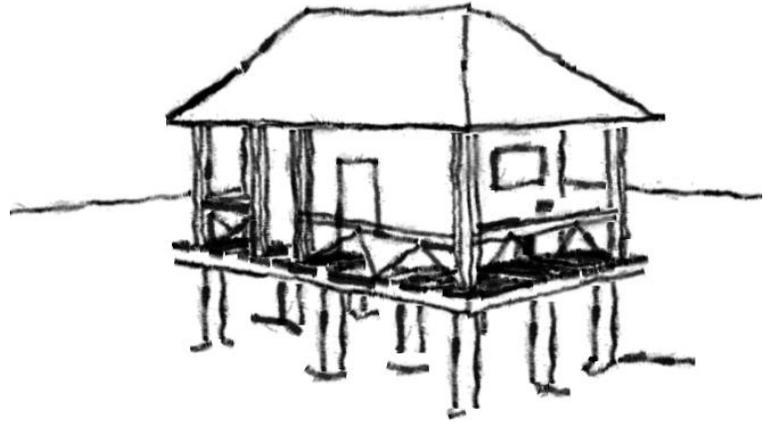


Figura 1-9 Representación de casa lacustre como ejemplo de adaptación al entorno. Fuente: elaboración propia.

En un mundo en plena crisis energética, con graves problemas medioambientales y de vivienda, se requieren nuevos modelos de desarrollo sostenible en todos los ámbitos [32].

La arcilla es un material utilizado en todos los tiempos, y casi en cualquier parte del mundo es posible acceder a ella.

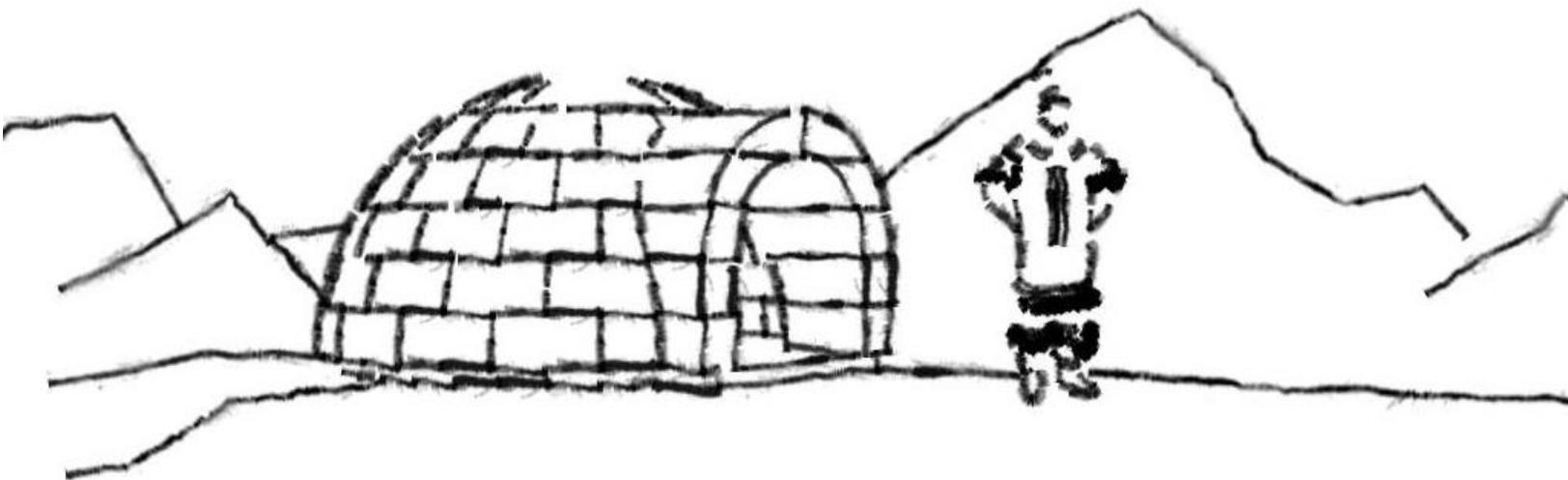


Figura 1-8 Representación de Iglú como ejemplo de construcción con material de la zona. Fuente: elaboración propia.

Ante el evidente impacto ambiental, instituciones académicas y de la industria de la construcción han vuelto la mirada a la construcción con arcilla. Se ha hecho evidente la necesidad de recuperar a la arcilla en los procesos constructivos, teniendo la ventaja de ser un material prácticamente ilimitado.

La larga historia de la construcción con tierra demuestra la resistencia y durabilidad de este material tradicional [33].

La tierra en general cumple con un bajo impacto en el ciclo de vida de los edificios considerando los siguientes puntos citados por Hernández [34].

- Pre-diseño y diseño del edificio
- Construcción del edificio
- Ocupación, operación y mantenimiento
- Fin de la vida útil, demolición rehúso, reciclamiento y desmantelamiento

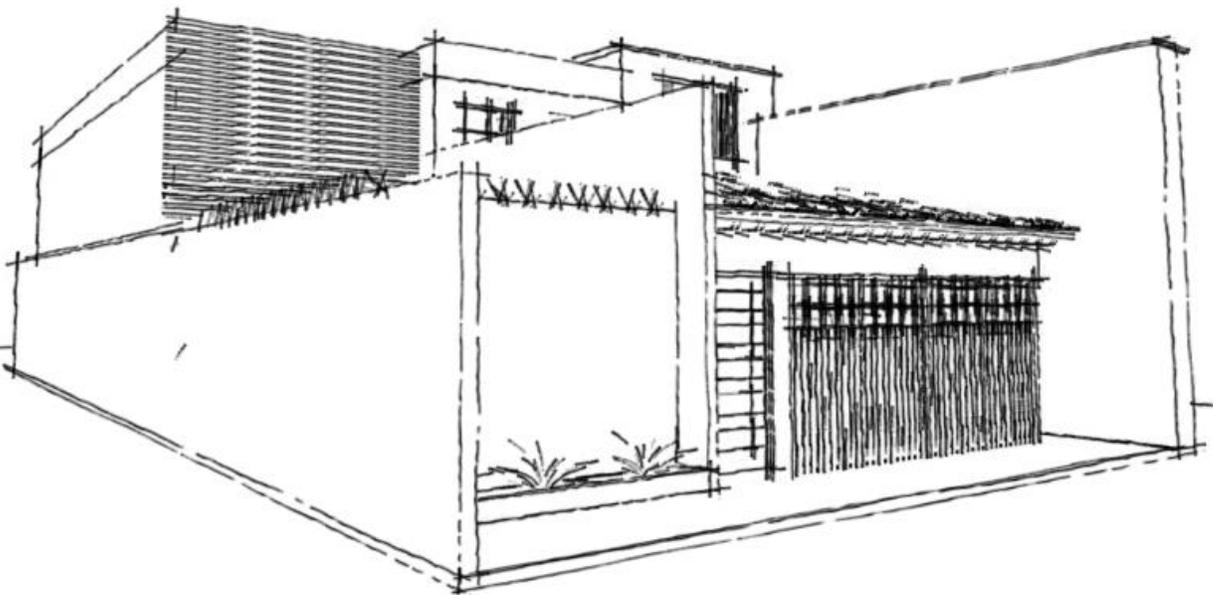


Figura 1-10 Representación de construcción con elementos de tierra. Fuente: elaboración propia.

Ventajas de la arcilla sin quemar como material de construcción.

Material fácil de adquirir, ya que se encuentra prácticamente en todo lugar, lo que lo convierte en una fuente de abastecimiento ilimitada.

Material noble, lo que permite que puedan utilizarse diversos procesos por su fácil manipulación.

Es posible utilizar la arcilla producto de las propias excavaciones. Esto reduce el costo de la obra por material y traslados, al mismo tiempo de disminuir los residuos

Si la construcción debiera ser destruida, no necesitaría de tratamientos costosos para poder ser reintegrada al entorno, si se utiliza tierra cruda se integra directamente, es posible reciclarla infinitamente.

Mejora el clima interior al ser un regulador natural por su carácter térmico

Material saludable, ya que resulta inofensivo para el ser humano y no supone riesgos para el ambiente.

Yuste [32] explica que una forma para medir la salubridad de la tierra es la radiación beta y gamma, teniendo la arcilla valores menores que la media de otros materiales como el concreto o el ladrillo cocido, pero, sobre todo, los rayos alfa emitidos por la radiación del gas radón y su decadencia de productos de corta vida. A continuación, se muestra que el ladrillo de arcilla descarga muy poco radón.

Material	m becquerel/kg
Yeso natural	25.2
Cemento	57.6
Arena	54.0
Ladrillo de arcilla	5.0
Ladrillo de arena y limos	13.3
Hormigón poroso	18.0

Tabla 1-1 Actividad Radioactiva de algunos materiales. Fuente: Arquitectura de Tierra. Caracterización de los tipos edificatorios. Yuste, Beatriz.

La baja conductividad térmica de dicho material permite que las construcciones conserven un clima ideal ya que presenta la acumulación de calor durante el día y la liberación de este durante la noche, lo anterior permite una temperatura constante al interior de la vivienda, ahorrando costos de climatización, ya que regula de forma natural al edificio.

Material no inflamable.

Permite el aprovechamiento de las texturas.

Posee un alto aislamiento acústico.

Requiere poco mantenimiento.

Normalmente no emite gases contaminantes.

Buena apariencia estética, se puede obtener el color deseado dependiendo del tipo de arcilla que se utilice.

Bajo costo energético. Los procesos de producción son sencillos, sin necesidad de cocciones que generan combustiones con un alto consumo energético. A diferencia de los ladrillos o el hormigón, la energía utilizada en la producción es muy baja. La producción de bloques de tierra comprimida requiere aproximadamente 1% de la energía necesaria para producir un ladrillo de construcción. Solo se necesita 1 litro de diésel para fabricar 145 bloques de tierra, lo que hace que se trate de un proceso de producción que ahorra energía y tiene unas emisiones de CO₂ mínimas [35]. La siguiente tabla muestra la energía incorporada de algunos materiales comparados con la tierra [32].

Materiales	kWh/m ³
Cemento (OPC)	2640
Ladrillo cocido macizo	1140
Ladrillo cocido perforado	590
Bloque de hormigón	600-800
Ladrillo de silicato de calcio	350
Arena natural/agregados	45
Tierra	5-10
Paja (baled)	4.5

Tabla 1-2 Energía incorporada de algunos materiales comparados con la tierra. Fuente: Caracterización de los tipos edificatorios. Yuste, Beatriz.

Las emisiones de CO₂ son muy bajas lo que permite que sea un diseño sustentable, de acuerdo con los análisis generales. Se adjunta una tabla comparativa de materiales en relación con sus emisiones de CO₂ [4].

Material	Densidad (Kg/m ³)	Emisiones por Kg (KgCO ₂ /Kg)	Emisiones por m ³ (KgCO ₂ /m ³)
Tapial sin estabilizar	2,200	0.004	9.7
Adobe	1,200	0.06	74
Hormigón en masa in situ	2,360	0.14	320
Hormigón prefabricado, 2% de acero	2,500	0.18	455
Pared de ladrillo macizo	1,600	0.19	301
Pared de ladrillo hueco	670	0.14	95

Tabla 1-3 Tabla comparativa de materiales en relación a sus emisiones de CO₂. Fuente: Tabla basada en el artículo "Construcción con tierra en el siglo XXI".



Es necesario mencionar los puntos débiles de la arcilla, situación que puede ser estabilizada por diversos métodos.

Material hidrofóbico, tiende a absorber la humedad atmosférica, lo que provoca que pierda resistencia a los diferentes esfuerzos.

Tiene baja resistencia a la compresión puesto que se considera que posee una resistencia de entre 3 y 5 kg/cm².

Baja resistencia a los esfuerzos de tracción.

Baja resistencia a esfuerzos cortantes.

Baja o nula elasticidad.

Vulnerabilidad ante actividades sísmicas e inundaciones.

Adicionalmente, sin importar el material o proceso constructivo, cada edificación es afectada por un deterioro de los materiales por agentes como:

Aire y contaminantes

Viento

Agentes biológicos y ecológicos

Temperatura

Radiación solar

Incompatibilidad de materiales [36].

Estas desventajas han sido contrarrestadas mediante la adición de elementos como arena, arcilla, gravas o fibras vegetales; teniendo consideraciones para que los elementos agregados no se deterioren por hongos, termitas, o bien, que sufran daños al estar expuestos a la intemperie.

Evitar el contacto entre el material de arcilla y el suelo impidiendo así la humedad por capilaridad; la construcción de muros anchos, la protección de los elementos con diferentes acabados (repellados), la disminución de juntas, aleros grandes, el uso de los aditivos, correcta protección contra el intemperismo, entre otros, son factores de ayuda a elementos construidos con tierra [3].

Adicionalmente a esto Minke [29] muestra las condiciones óptimas para cimentar una edificación de tierra cuando está cerca de pendientes, así como las formas y volúmenes más recomendados.

Las desventajas conocidas de la tierra como material de construcción también pueden ser disminuidas el uso de diversas técnicas constructivas y la aplicación de nuevas tecnologías.

Las bondades de la tierra, junto con otros materiales permiten el uso de la arcilla en construcción librando el proceso de quema en el material, el cual se usualmente se eleva a temperaturas por encima de los 900°C.

Librar este proceso de quema disminuye la emisión de CO₂ casi en su totalidad considerando todo el proceso en el ciclo de vida del material, esto se puede lograr mediante la incorporación de aditivos y procesos en donde se necesitará el aire como un catalizador natural.

Considerar un aditivo que mejore las características de la tierra y permita generar estructuras estables, contribuirá en la reducción del impacto ambiental.

De manera adicional se contempla el uso de ecotecias que efficientizan la construcción.

El uso de nuevas técnicas constructivas como la impresión 3D abren camino a nuevas posibilidades de diseño y constructivas y con nuevas formas brindadas por los diseños biomiméticos.

Un diseño biomimético disminuiría las causas más comunes de daño e inseguridad en las construcciones con arcilla, tales como inadecuado amarre de paredes,

vanos de puertas y ventanas no proporcionales a la construcción, alto y largo de paredes no proporcionales a la construcción, cubiertas muy pesadas o mal diseñadas

Los diseños biomiméticos también proporcionan estabilidad térmica a la construcción. Esto es muy valioso ya que se estima que casi la mitad del costo energético de una edificación en su vida útil tiene que ver con la climatización.

Sin duda debe haber un cambio de mentalidad en todos los implicados en la edificación.

Es necesario impulsar materiales y procesos constructivos que garanticen la conservación del medioambiente y la habitabilidad, pero es importante señalar que la arquitectura por sí sola no puede resolver los problemas ambientales en su totalidad, pero si puede favorecer el desarrollo.

1.4 Objetivos

El presente trabajo tiene por objetivo, diseñar una mezcla de Arcilla Caolinítica, Polisacáridos de Maíz, estabilizadores y otros compuestos para lograr una pasta aplicable en la elaboración de bloques constructivos, o incorporable a las nuevas tecnologías constructivas como la impresión 3D y 4D, misma que al no ser quemada y no incluir grandes cantidades de cemento, contará con un menor impacto ambiental en relación con otros procesos similares.

1.5 Objetivos Particulares

Determinación de los componentes que complementarán a la arcilla como material constructivo.

Comparación de las características mecánicas entre estructuras hechas con la mezcla propuesta y estructuras con otros materiales.

Comparación de las características de sustentabilidad entre la propuesta presentada en el documento y otros procesos similares.

Establecer una propuesta de modelo biomimético que permita su generación con arcilla.

De esta manera se pretende contribuir en la generación de un entorno más sustentable, ratificar la eficiencia de los materiales arcillosos como elementos de construcción e impulsar el uso de la arcilla en las nuevas tecnologías de impresión 3D y 4D.

1.6 Hipótesis

Con el diseño de una mezcla de Arcilla Caolinítica, Polisacáridos de Maíz, estabilizadores y otros compuestos, se obtendrá una pasta aplicable en la elaboración de bloques constructivos, o incorporable a las nuevas tecnologías constructivas como la impresión 3D y 4D, reduciendo el impacto ambiental en relación con otros procesos similares, gracias a la eliminación de procesos como la quema o el uso de grandes cantidades de cemento en su elaboración.

1.7 Investigaciones relacionadas

Ejes de análisis desarrollados:

Materiales arcillosos

Sustentabilidad

Objeto de estudio:

La arcilla como material constructivo

Variable Independiente:

Materiales arcillosos y aditivos

Variable Dependiente:

la sustentabilidad

La arcilla es un material sustentable bien reconocido [37], sin embargo, los procesos para su utilización en construcción siguen teniendo numerosas oportunidades, lo que permite el surgimiento de nuevos desarrollos y propuestas para reducir la contaminación ambiental.

Demir, [38] demostró que la utilización de residuos orgánicos puede ser útil para

obtener porosidades en piezas constructivas, esto da como resultado un aumento en la capacidad de aislamiento en los ladrillos. Los valores de resistencia a compresión demostraron ser similares a los ladrillos tradicionales; sin embargo, todavía está presente el proceso de quema.

Arellano [39] desarrolla un aditivo para mejorar la resistencia de la arcilla en la fabricación de materiales de construcción. Efectivamente se presenta un aumento en la resistencia del producto final, no obstante, aún requiere en algunos procedimientos 2 kg de cemento Portland tipo IV gris y 1.5 kg. de cal por cada 4 cubetas de arcilla para obtener ladrillos.

López [40] propone un aditivo estabilizador de suelos basado en una mezcla de azúcar que permite aumentar la resistencia mecánica en construcción de elementos como bloques. Se requiere de 2% a 7% de cemento.

Roux y Olivares [6] sugieren el uso de ladrillos de adobe reforzados y estabilizados con 6 % de Cemento Portland. El trabajo demuestra una mejora en el material durante las pruebas de flexión, utilizando 1 % de fibras de coco.

Se registró que el aumento en el porcentaje de las fibras de coco afecta la resistencia e incrementa la absorción de agua.

Heinemann [41] desarrolla un aditivo de promoción del secado, con lo cual se optimiza la fabricación de ladrillos.

Prochazka [42] obtuvo una patente en la que incorpora elementos para la protección contra el agua; esto fue logrado mediante aglutinantes y estabilizadores poliméricos.

Oti, et al. [43] muestra las propiedades de los ladrillos de arcilla sin quemar, este documento informa que únicamente se utilizó 1.5 % de cal.

González y García [44] trabajaron en el desarrollo de una evaluación para la disminución de las emisiones de CO₂ en el campo de la construcción, por medio de la selección de materiales. De esta manera se analizaron viviendas con bajo impacto ambiental, los resultados muestran la posibilidad de reducir las emisiones de CO₂ en hasta un 30 % durante la fase de construcción mediante esta selección cuidadosa de los materiales.

De la misma manera, Ceñedo [45] apunta hacia la correcta selección de materiales bioclimáticos en la construcción, en donde realizan comparaciones entre materiales.



para determinar características como el consumo energético, contaminantes, entre otros.

Otras innovaciones destacadas son las contribuciones de Yue et al. [46] con una proporción de mezcla de concreto para construcción de macadán unida a arcilla, su propuesta incluye un método de preparación.

He et al. [47] propone un aditivo de arcilla, Mallow [48] sugiere un método para estabilizar suelos. Rodríguez [49] reporta trabajos en materiales como el bambú. Hernández [50] [34] ha hecho trabajos sobre vida útil en el diseño sustentable de edificios.

Es así como la industria de la construcción continúa buscando métodos de fabricación de materiales más sustentables [5].

El uso de ladrillos de arcilla sin quemar tiene el potencial de contribuir a resolver los problemas ambientales [43]. Su capacidad para regular el nivel de humedad relativa y su aislamiento representan menos energía durante el uso en la construcción [51].

En cuanto a Normas, Guías e Instituciones que contribuyen en el mejoramiento de la calidad y sustentabilidad de los edificios, se consideraron las siguientes:

ISO 15686

ISO 14025

CSA s478-95

ISO 14040

ISO 15686 (Service Life Planning for Buildings and Constructed Assets)

CSA S478-95 (Building Durability Plan),

Leadership in Energy and Environmental Design (LEED),

Living Building Challenge del International Living Future Institute, BREAM,

Earth Check,

Organización Nacional de Calidad Ambiental ONCA

ISO 9001:2008,

Hipoteka Verde del Infonavit

Reglamento de la ley general de desarrollo forestal sustentable

Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables (PCES)



1.8 Metodología presente en el documento

Nivel de la investigación:

Descriptiva

Tipo de la investigación:

Exploratoria y Experimental

Diseño de la investigación:

Documental y Experimental

Sentido temporal de la investigación:

Investigación longitudinal prospectiva

Enfoque de la investigación:

Cuantitativo

Técnica de recolección de datos:

Documental y experimental

Proceso en el método científico:

Inductivo



La decisión de trabajar con arcilla está fundamentada en la metodología planeada por la Arquitecta María Silva Borsinai en su trabajo “Materiales ecológicos. Estrategias, alcance y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles” [16], en donde presenta estrategias para disminuir el impacto ambiental, los cuales se muestran a continuación.

1. Materiales que minimizan el uso de los recursos.

Reutilizar materiales, reducir el uso de materiales nuevos, no reconstruir

Reutilizar las estructuras existentes en el lugar

Reducir el uso del material

Utilizar materiales durables

Recuperación y reutilización de materiales en su totalidad

Utilizar materiales regenerados de otras fuentes

Reprocesar materiales existentes para su uso en el mismo solar

Utilizar materiales y productos con potencial de reutilización y diseñar para el desmontaje

Utilizar materiales y productos con mayor contenido de reciclaje

Utilizar materiales y productos con mayor potencial de reciclaje

Utilizar materiales y productos producidos a partir de recursos renovables

2. Materiales con impacto ambiental bajo

Utilizar materiales extraídos o explotados de manera sustentable

Utilizar madera certificada

Utilizar materiales mínimamente procesados

Utilizar materiales con poca energía incorporada

Utilizar materiales producidos con energía de fuentes renovables

Utilizar materiales locales

Utilizar materiales no contaminantes

Utilizar materiales de bajo consumo de agua y de baja contaminación del agua

3. Materiales con riesgos para la salud del ser humano y del ambiente nulos o bajos

Utilizar materiales y productos de baja emisión

Utilizar materiales y productos que no contengan productos químicos tóxicos o subproductos

4. Materiales que contribuyen con las estrategias de diseño sostenible del sitio

Materiales que promueven la salud de un sitio hidrológico

Materiales que retienen carbono

Materiales que reducen el efecto isla de calor urbano

Materiales que reducen el consumo de energía de operación de la obra

Materiales que reducen el consumo de agua operación en la obra

5. Materiales de compañías con intereses sociales, ambientales y corporativos de tipo sustentable

El proceso de investigación será el desarrollado en los siguientes puntos.

Identificación de la problemática, el objeto de estudio y las variables, considerando aspectos ambientales, económicos, sociales y de viabilidad.

Desarrollo de justificación, hipótesis, objetivos, metas y cronograma de trabajo.

Estudio de la arcilla como material de construcción a lo largo del tiempo y sus propiedades

Estudio de los distintos tipos de arcillas en el mercado para determinar sus características y seleccionar aquella que cuente con las mejores condiciones de disponibilidad, caracterización y propiedades.

Investigación documental en artículos, patentes y reportes en donde se apliquen materiales para estabilizar o mejorar las propiedades de la tierra. Se analizarán patentes que sean similares a la

investigación propuesta y se estudiarán los materiales y procesos utilizados.

Se determinarán los materiales que serán la materia prima propuesta, cuidando que cumplan características sustentables.

Se determinará el proceso para realizar la mezcla de materiales.

Realización de pruebas de laboratorio con la mezcla de arcilla, incluyendo pruebas de compresión, pruebas de resistencia al agua, prueba de capilaridad, prueba de impacto y prueba Vicat modificado.

Se registrarán los datos obtenidos en cada caso y se generarán tablas y gráficas comparativas para determinar las características ideales y proceso final para realizar la mezcla.

Se aplicará la Metodología para el Desarrollo de Materiales Constructivos de Bajo Impacto Ambiental propuesta por Arellano [52] esta metodología es resultado de un proyecto Doctoral para identificar, evaluar y medir los impactos ambientales que produce un material constructivo.



Figura 1-11 Interior de un horno para tabiques. Fuente: foto del autor.

Capítulo 2

Materiales arcillosos como elemento constructivo

2.1 Conceptos

Para el presente trabajo se entenderán los conceptos a continuación mencionados de acuerdo con sus definiciones adjuntas.

Suelo: parte superficial de la corteza terrestre, en mayor parte mineral, que proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de seres vivos que se asientan sobre ella.

Tierra: parte superior del suelo que resulta en una mezcla de grava, arena, limo, arcilla y material orgánico presente en la corteza terrestre.

Grava: partículas con un tamaño superior a los 2 mm y hasta los 63 mm. Se consideran los componentes más estables ante el agua, pero carecen de cohesión en estado seco, así que requieren de los limos y arcillas para formar una estructura estable en los suelos.

Arena: partículas de roca con un rango de entre 0.06 mm y 2 mm. Son estables, sin grandes desplazamientos entre las partículas y con fuerte fricción interna.

Limo: partículas en un rango de 0.002 mm a 0.06 mm. En presencia de agua su cohesión aumenta; tienen variación de volumen debido a que se expanden o contraen.

Arcilla: roca sedimentaria descompuesta, constituida por silicatos de aluminio hidratados, que se hace plástica al contacto con el agua. Partículas menores a 0.002 mm. Son los componentes que dan cohesión al suelo; tienen gran capacidad de absorción.

Silicatos: grupo de minerales de mayor abundancia, constituyen el 92% de los minerales de la corteza terrestre. Compuestos por silicio y oxígeno. De acuerdo a su composición los silicatos pueden catalogarse en:

Nesosilicatos

Sorosilicatos

Ciclosilicatos

Inosilicatos

Filosilicatos

Tectosilicatos

		Nombre	Símbolo	Tamaño
Suelo muy Grueso		Roca Grande	LBo	> 630
		Roca	Bo	$> 200 - \leq 630$
		Adoquín	Co	$> 63 - \leq 200$
Suelo Grueso	Grava	Grava Gruesa	CGr	$> 20 - \leq 63$
		Grava Mediana	MGr	$> 6.3 - \leq 20$
		Grava Fina	FCr	$> 2.0 - \leq 6.3$
	Arena	Arena Gruesa	CSa	$> 0.63 - \leq 2.0$
		Arena Mediana	MSa	$> 0.2 - \leq 0.63$
		Arena Fina	FSa	$> 0.063 - \leq 0.2$
Suelo Fino	Limo	Limo Grueso	CSi	$> 0.02 - \leq 0.063$
		Limo Mediano	MSi	$> 0.0063 - \leq 0.02$
		Limo Fino	FSi	$> 0.002 - \leq 0.0063$
	Arcilla	Cl	≤ 0.002	

Tabla 2-1 Tabla con granulometría basada en la Norma ISO 14688-1:2018 [53].



Figura 2-1 Granulometría de distintos materiales; Fuente: foto del autor.

2.2 Composición y estructura de la arcilla

Las propiedades de las arcillas son consecuencia de sus características estructurales. De ahí la importancia de conocer la composición de la arcilla.

La arcilla se considera un filosilicato, es decir, pertenece al grupo de los silicatos. Su unidad estructural está compuesta por:

Silicio (*Si*)

Oxígeno (*O*), Si-*O*.

Su forma es de tetraedro, teniendo al Silicio en el centro y cuatro Oxígenos en los vértices del tetraedro.

El tetraedro *Si-O* se encuentra eléctricamente descompensado, ya que el *Si* aporta cuatro cargas positivas frente a las ocho negativas de los cuatro oxígenos, por lo que ha de unirse a otros cationes para neutralizar las cargas.

En estas estructuras los vértices de la cara basal se unen a otros tetraedros vecinos, generando una capa de tetraedros.

Oxígeno ●

Silicio ○

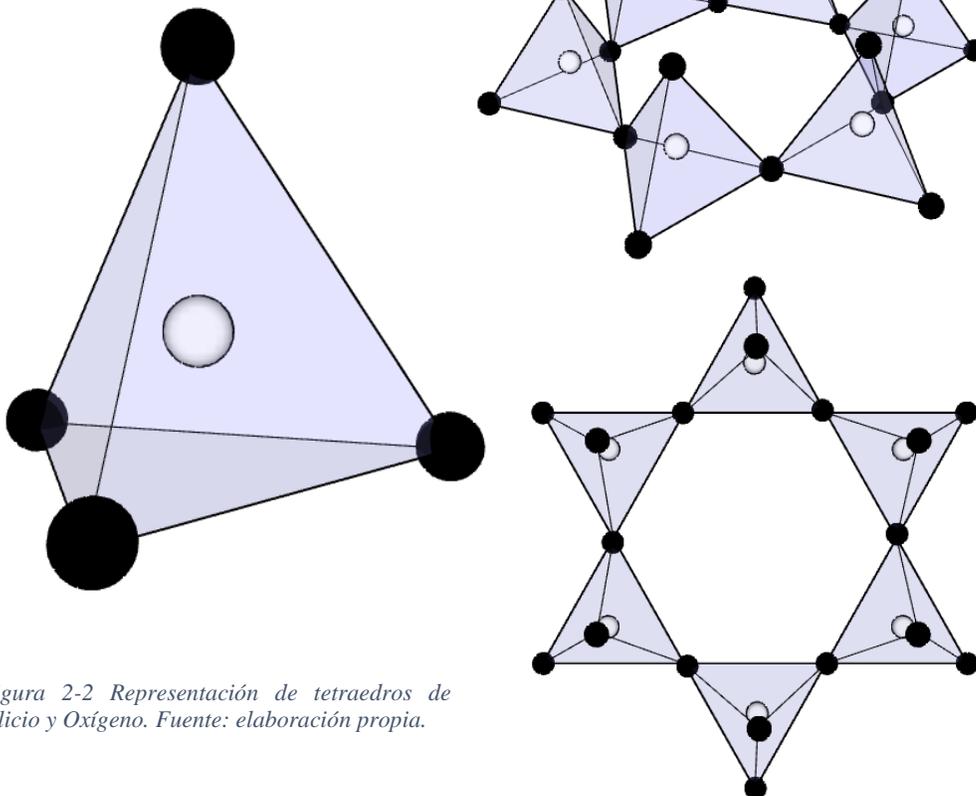


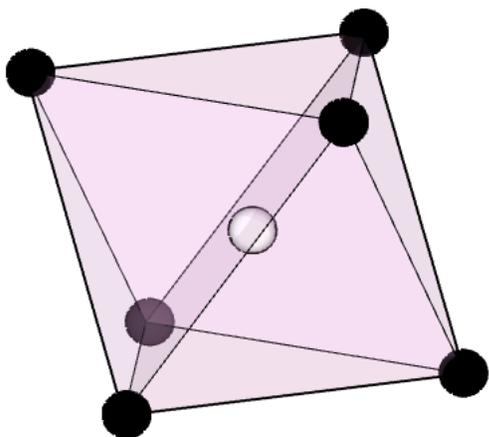
Figura 2-2 Representación de tetraedros de Silicio y Oxígeno. Fuente: elaboración propia.

Los filosilicatos comparten su vértice superior con un octaedro regular apoyado en una de sus caras; están compuestos por: Aluminio (*Al*) y/o Magnesio (*Mg*) en el centro.

Oxígeno (*O*) y/o Hidróxido (*OH*) en los seis vértices.

Oxígeno y/o Hidróxido ●

Aluminio y/o Magnesio ○



*Figura 2-3 Representación de Octaedros.
Fuente: elaboración propia.*

Estos octaedros se encuentran también descompensados eléctricamente (dos cargas positivas si el catión octaédrico es el *Mg* o tres si se trata de *Al*), frente a las 12 posibles cargas negativas que pueden aportar los seis vértices. Para neutralizarse se comparten entre sí sus vértices formando una capa de octaedros, que

además se unirán a los silicios de la capa tetraédrica.

Las capas de tetraedros y octaedros se acoplan dando láminas que al repetirse forma una estructura cristalina.

Estas láminas pueden componerse de una línea de tetraedros unidos a una línea de octaedros, la cual es llamada bilaminar (1:1, o T:O). Si la estructura se compone de una capa de tetraedros y una de octaedros, todos los vértices están ocupados por Hidróxidos (*OH*). Esta capa bilaminar tiene un espesor de 7 Armstrong.

Cuando dos líneas de tetraedros que mantienen en medio a una línea de octaedros, es llamada trilaminar (1:2, o T:O:T). Si la estructura se compone de dos capas de tetraedros y una de octaedros en medio, los iones de este plano son *O* y *OH*. Esta capa trilaminar tiene un espesor de 9 Armstrong.

Los minerales del grupo de los filosilicatos se originan por apilamiento de láminas.

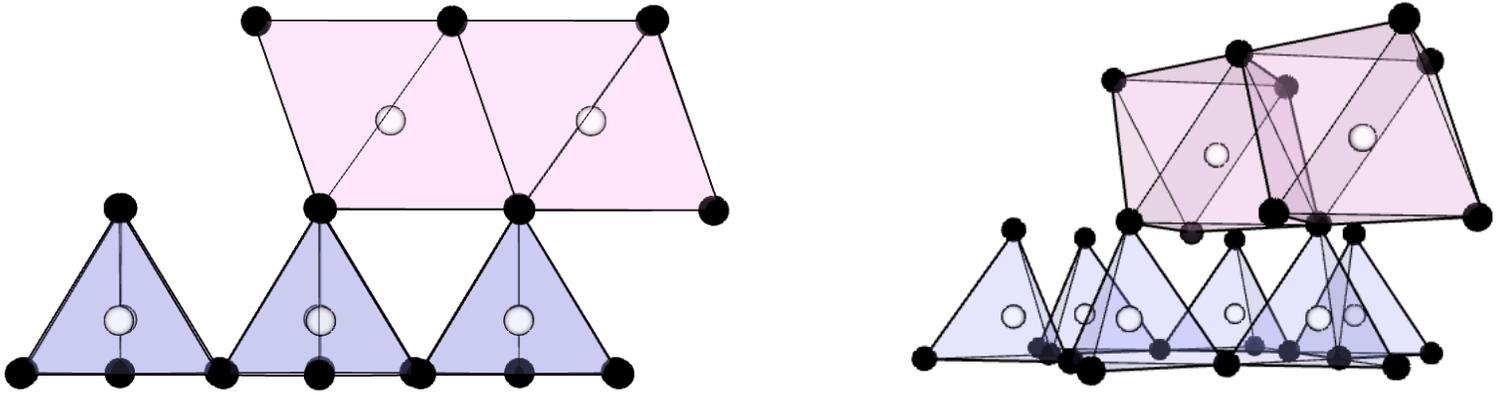


Figura 2-4 Representación de lámina con una capa de tetraedros y una de octaedros (bilaminar). Fuente: elaboración propia.

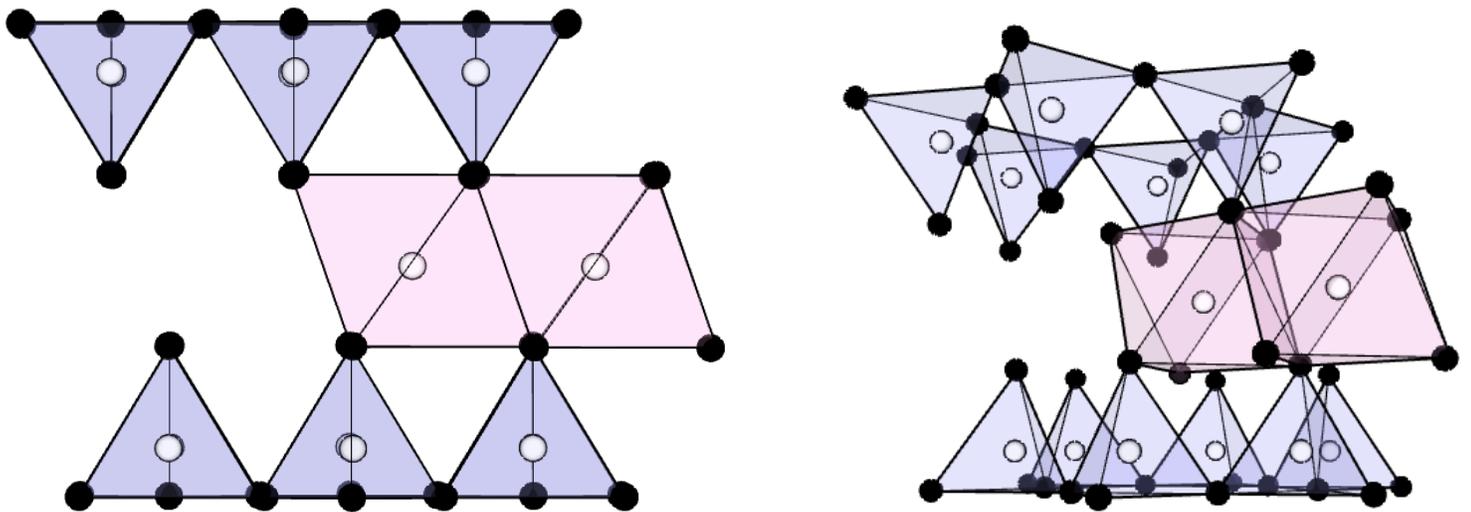


Figura 2-5 Representación de lámina con dos capas de tetraedros y una de octaedros en medio (trilaminar). Fuente: elaboración propia.

- Oxígeno ●
- Silicio ○
- Aluminio / Magnesio ⊗
- Hidróxido ⊕

Si todos los huecos octaédricos están ocupados, la lámina se denomina trioctaédrica, atendiendo al *Mg*. Si solo están ocupadas dos tercios de las posiciones octaédricas y el tercio restante está vacante, se denomina dioctaédrica atendiendo al *Al*.

Como en la capa octaédrica puede estar presente el de *Mg* o el *Al*, entonces se dan cuatro combinaciones:

Lámina con una capa de tetraedros y una de octaedros, con posibilidad de ser trioctaédrica o dioctaédrica.

Lámina con dos capas de tetraedros y una de octaedros en medio, con posibilidad de ser trioctaédrica o dioctaédrica.

La unidad formada por una lámina más la interlámina se conoce como unidad estructural. Los cationes interlaminares más frecuentes son alcalinos (*Na* y *K*) o alcalinotérreos (*Mg* y *Ca*).

Las fuerzas que unen las diferentes unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una misma lámina. Por ese motivo, los filosilicatos tienen una clara dirección de exfoliación, paralela a las láminas.

Existen otros grupos, uno llamado Cloritas, en donde la capa octaédrica contiene *OH* en todos sus vértices, lo que hace que no sea una arcilla expandible, ya que su carga se encuentra balanceada.

También se pueden encontrar, aunque de manera más rara, los filosilicatos fibrosos como la Sepiolita y la Paligorskita. Estructuralmente están formadas por láminas discontinuas de tipo Mica. A diferencia del resto de los filosilicatos que son laminares, éstos tienen hábito fibroso, ya que la capa basal de oxígenos es continua, pero los oxígenos apicales sufren una inversión periódica cada 8 posiciones octaédricas (Sepiolita) o cada 5 posiciones (Paligorskita). Esta inversión da lugar a la interrupción de la capa octaédrica que es discontinua.

A continuación, se presenta una tabla guiada en la información proporcionada en el documento “Las arcillas: propiedades y usos” [54].

	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS	
BILAMINARES		Caolinita		Antigorita
T : O	CANDITAS	Nacrita	SERPENTINA	Crisotilo
1:1		Dickita		Lizardita
		Halloisita		Bertierina
TRILAMINARES	Pirofilita		Talco	
T : O : T		Montmorillonita		Saponita
2 : 1	ESMECTITAS	Beidellita	ESMECTITAS	Hectorita
		Nontronita		
	Vermiculitas		Vermiculitas	
	Illitas			
		Moscovita		Biotita
	MICAS	Paragonita	MICAS	Flogopita
				Lepidolita
T : O . T : O			CLORITAS	
2 : 1 : 1				
FIBROSOS	Paligorskita			Sepiolita

Tabla 2-2 Composición de arcillas. Fuente: Las arcillas: propiedades y usos. García Romero, Emilia; Suárez Barrios, Mercedes. Madrid. [54].



2.3 Propiedades y

Características de las arcillas

Tamaño:

El tamaño de sus partículas es el más pequeño del suelo. Menor a 0.002 mm o 2 micras (μm).

Cantidad:

Su cantidad puede variar dependiendo de lugar de donde se extraiga, sin embargo, la arcilla es el componente más abundante del suelo.

Ubicación:

Ubicada inmediatamente por debajo de la capa vegetal del suelo.

Color:

Variable, sin embargo, se puede catalogar entre la gama de amarillos y rojos, con posibilidad de encontrar arcillas de colores grises claros y oscuros en incluso azules.

Morfología:

Laminar.

Dureza:

Alcanza dureza al ser calentada por arriba de los 800°C.

Comportamiento ante el agua:

Comportamiento plástico, al presentar, por una parte, un valor elevado del área superficial y a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Esto permite la interacción con muy diversas sustancias.

Capacidad de absorción:

Pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmectitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita). La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

Hidratación e hinchamiento:

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades de las esmectitas. La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento.

Plasticidad:

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

Composición:

Sus partículas están constituidas por minerales microscópicos menores a las dos micras de diámetro, los que, debido a su dinámica molecular, forman laminas que atraen y atrapan películas de agua entre sí, las cuales forman puentes entre las micropartículas del suelo, dándoles cohesión, característica que define su resistencia mecánica.

Adherencia:

Al ser mezclada con agua permite una excelente adherencia.

2.4 Elementos estabilizadores de tierra

Como elementos estabilizadores de la tierra se entiende a los métodos que permiten la alteración de la respuesta constructiva de la tierra mediante el agregado de componentes adicionales que corrigen su posible vulnerabilidad; pueden catalogarse de dos forma Homogéneos y Heterogéneos [8].

Homogéneos: componentes con la misma naturaleza de la tierra.

Estos componentes se utilizan cuando la presencia de ellos en la tierra es menor a la que se requiere, su obtención y uso no demanda procesos costosos ya que se obtienen de la misma tierra.

Arcilla: se utiliza cuando la tierra contiene poca proporción de arcilla provocando una falta de cohesión y desmoronamiento al presionarla.

Limo y arena: se utiliza cuando la tierra contiene poca cantidad de estos compuestos y la tierra se vuelve inestable.

Heterogéneos: son aquellos ajenos a la naturaleza propia de la tierra y se presentan en distintos grupos.

Hidrofugantes: conocidos también como estabilizadores por impermeabilización, cuya función principal es generar una capa protectora en torno a la arcilla, repeliendo el agua y, por lo tanto, las consecuencias en cambios de volumen. Las grasas son el elemento más utilizado y se pueden dividir en grasas de origen animal como el sebo de res o la leche y grasas de origen vegetal como los aceites de girasol, linaza y oliva. Otro tipo de hidrofugante son los Bituminosos como el asfalto.

Consolidantes: son aquellos que intervienen como aglutinante, ejemplo de esto es el Hidróxido de calcio, el cual ayuda a la arcilla en su acción aglutinante al formar cadenas, disminuye la absorción hídrica.



Fibras: forman una especie de red a la cual se adhieren las partículas; esto permite controlar su desplazamiento, dilatación y retracción durante el fraguado. Modifican los patrones de agrietamiento. Mejoran las cualidades de durabilidad, plasticidad y resistencia. Deben utilizarse secas ya que de lo contrario corren el riesgo de pudrirse y perder sus cualidades, además de generar microorganismo.

De origen vegetal: paja de diferentes gramíneas, virutas de madera, cáscaras de coco, tallos del maíz.

De origen animal: lana de ovejas o cabras, crines de caballo, pelo de llama, cabello, etcétera.

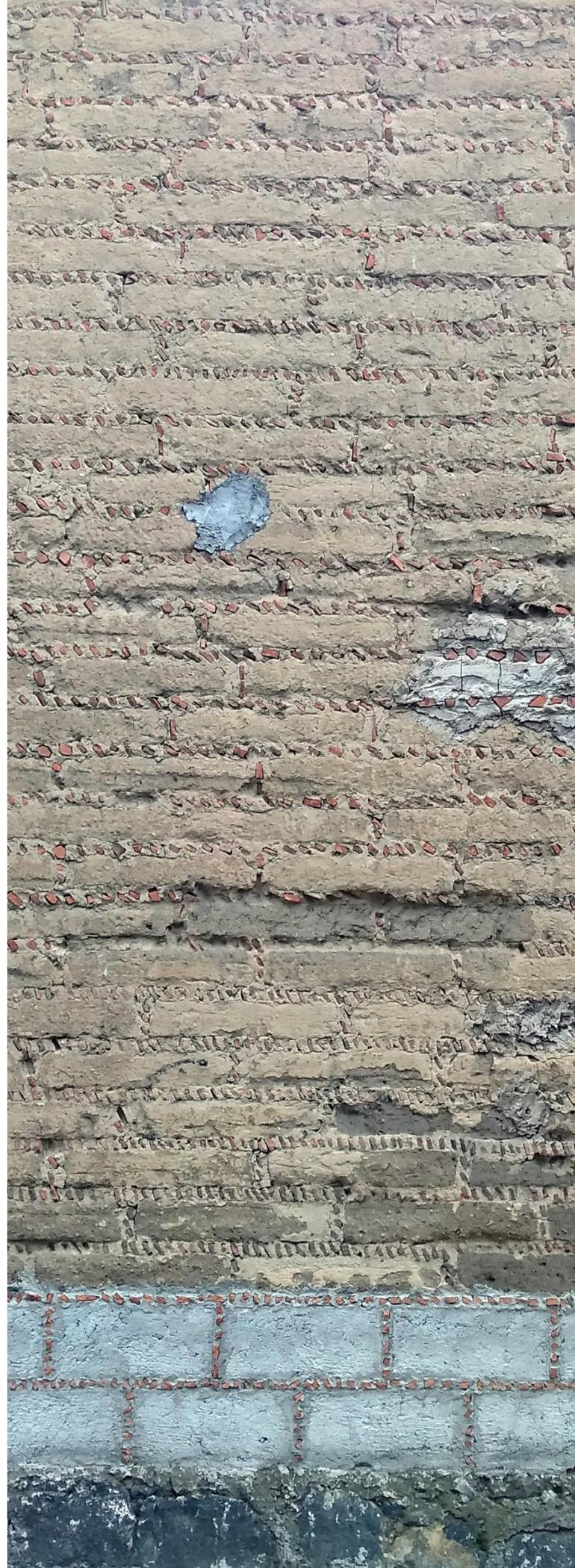


Figura 2-7 Muro de adobe, block y piedra. Fuente: foto del autor

2.5 Arquitectura de tierra en el mundo

Representación de acuerdo con: *Adobe construction modeling by discrete element method: first methodological steps* [55].





Figura 2-8 Representación en color café de las zonas geográficas con construcciones de tierra. Fuente: elaboración propia.

2.6 Técnicas constructivas con arcilla y prototipos

La arquitectura con tierra es una de las más asombrosas expresiones de la habilidad y de la creatividad humana. Los materiales, las formas, y el conocimiento acumulado generaron diversas técnicas constructivas [56].

Durante los últimos años se han desarrollado normativas que regulan la construcción.

En países, sobre todo aquellos donde la construcción con tierra es común, que han considerado normativas sobre el tema, tal es el caso de España, Perú y Brasil.

Sin embargo, gran parte de las normas (79%) centran su contenido en el estudio de una única técnica constructiva, ya sea adobe, Bloque de Tierra Comprimida (BTC) o tapial. Los restantes documentos examinan varias técnicas.

A continuación, se presentan datos y tablas de países con normas establecidas al año 2010, basados en el documento: The earth building normative documents in the world [57].



Figura 2-9 Muro de Adobe. Fuente: foto del autor.

Año	País	Normas Vigentes al 2010
1979	Perú	3
1980	India	1
1982	India	1
1985	Turquía	3
1986	Brasil	2
1989	Brasil	2
1990	Brasil	1
1992	Brasil	2
1993	India	1
1994	Brasil	3
1996	Brasil (3), Reg. Africa (14), Túnez (2)	19
1997	Nigeria	1
1998	Nueva Zelanda	2
1999	Nueva Zelanda (1), kenya (1)	2
2000	Perú	1
2001	Francia (1), Zimbabue (1)	2
2004	Colombia (1), EEUU (1), Italia (1)	3
2006	Italia	1
2008	España	1
2009	Sri Lanka	3
2010	EEUU	1

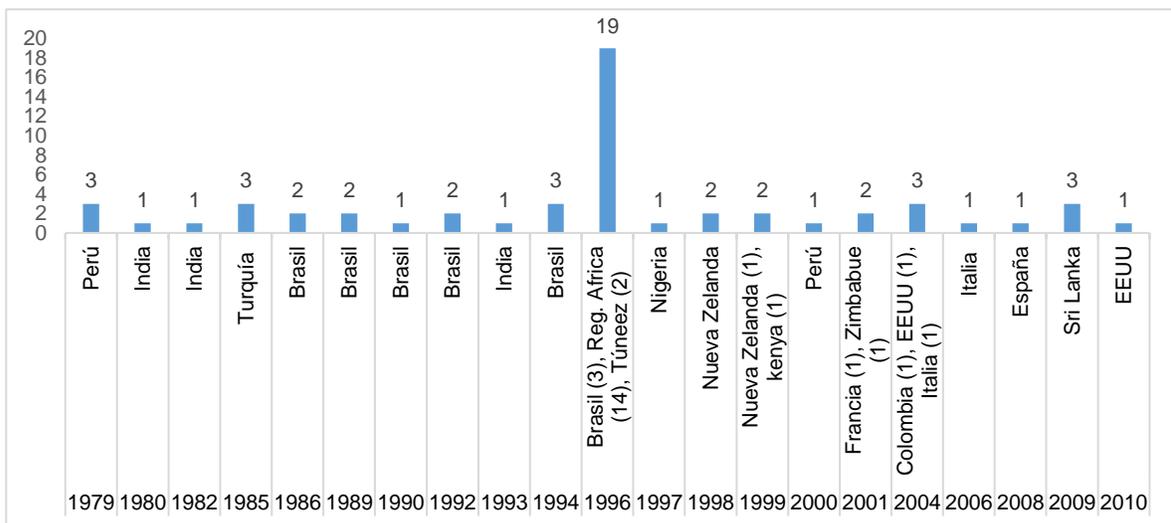


Tabla 2-3 Normas, construcción con tierra, vigentes por país y año. Fuente: *The earth building normative documents in the world*. Cid, J.; Mazarrón, F.R.; Cañas, I. 2011 [57].

Tapial

En inglés es conocida como *Rammed earth*. Refiere a la técnica en donde la tierra se amasa y se apisona en un molde a manera de cimbra para generar muros monolíticos.

El proceso normalmente consiste en generar una capa con un grosor de entre 10 a 15 centímetros, esta capa se apisona fuertemente dentro del molde, el cual funciona como paredes laterales, para después colocar otra capa y repetir el proceso hasta lograr la altura deseada, una vez hecho esto se retira el molde.

En ocasiones se pueden colocar refuerzos verticales de bambú, sin embargo, en la mayoría de los procesos no es necesario la inclusión de fibras.

Esta técnica es de las que menor energía incorporada requiere y el grosor de muros finales brinda características de aislamiento térmico y acústico.

Se han podido desarrollar diversos procesos derivados de la compactación, tales como el tapial prefabricado, tapial aislado, tapial pos-tensado y tapial con dispersores sísmicos [58].

Entre las construcciones que destacan por utilizar esta técnica se encuentran:

Capilla de la reconciliación, en Berlín, Alemania.

Centro de visitantes del proyecto "edén" en Cornualles en el sudoeste de Inglaterra.

Centro Nacional del Vino, en Adelaide, Australia.

Bodhi Mandala Zen Center, Nuevo México, EE. UU.

Biblioteca Sublette County en Wyoming, EE. UU.

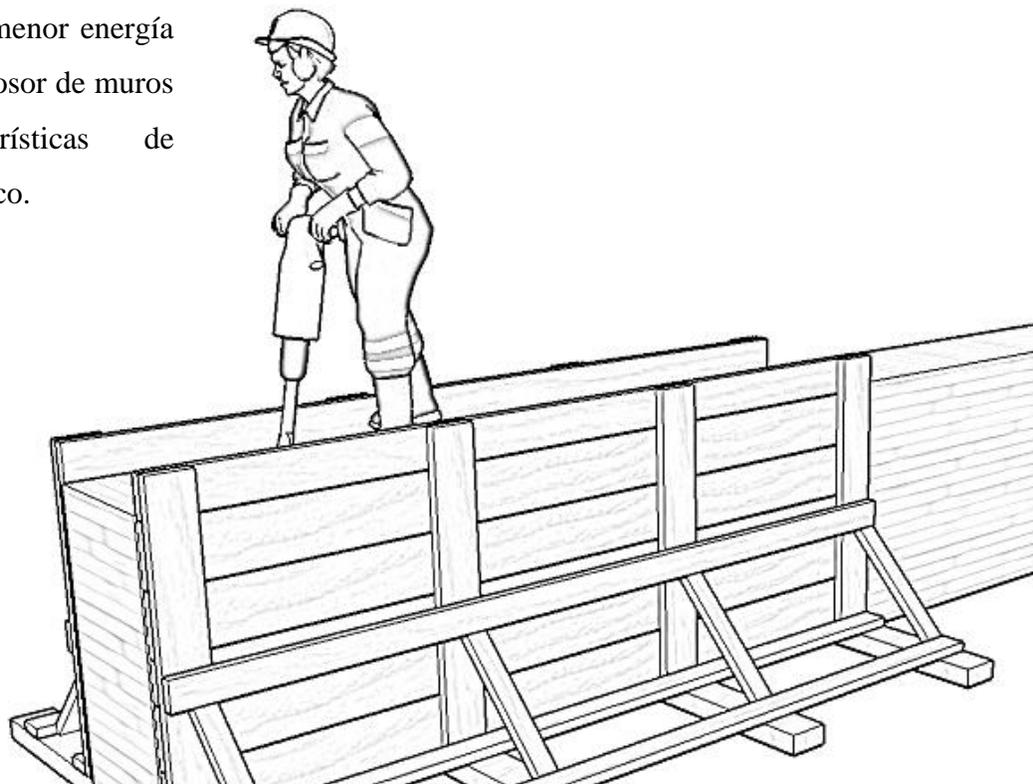


Figura 2-10 Representación de muro de Tapial. Fuente: elaboración propia.

Bloque de Tierra Comprimida (BTC)

Son bloques de construcción uniformes y crudos de tierra compactada, por compresión o, adecuada para el uso en muros [35]. Normalmente no requiere la adición de fibras. Los bloques pueden ser elaborados con máquinas que cumplan la demanda de la obra, se puede decir que es posible elaborarlos con máquina de compresión móvil, es decir, se pueden fabricar en el lugar de trabajo o con complejas unidades de producción industrial

Estos bloques pueden sustituir a los cerámicos o de concreto.

La capa superior de la tierra, normalmente fértil, se aparta dejando descubierta la capa inferior de arcilla para que se seque. Una vez seca por el sol y el viento, se pulveriza y se humedece para ser mezclada con arena. Una vez realizado esto, se deja secar nuevamente y se considera lista para la compactación.

A continuación, se mencionan algunos proyectos representativos de esta técnica:

Sala polivalente de la escuela Deepanam de Auroville.

Centro para la Atención de Gente Invidente, Ciudad de México, México.

Figura 2-11 Muro de BTC. Fuente: foto del autor.





Figura 2-12 Muro de BTC. Fuente: foto del autor.

Adobe

Es probablemente la técnica con tierra más difundida. Definido como “una masa de barro, frecuentemente mezclada con paja, moldeada con forma prismática, de tamaño variable y secada al aire para formar muros de fábrica” [4] que permiten construir estructuras portantes de muros, arcos, bóvedas o cúpulas por hiladas sobrepuestas.

Este proceso requiere de bastante agua para su fabricación, las fibras vegetales evitan la fractura normal de la tierra debido a la evaporación.

Las siguientes construcciones muestran esta técnica.

Bodega en los Robles en San Fernando, Chile.

Universidad Indígena Chiquitana, en San Ignacio de Velasco, Bolivia.

Edificio para la asociación Yeredemé de apoyo a jóvenes madres solteras, en Mopti, Mali.





Figura 2-13 Muro de adobe. Fuente: foto del autor.

Cob

Consiste en una masa de barro y abundante paja que se apila y moldea a mano para formar muros monolíticos.

La composición del material es parecida al adobe, pero el moldeado se realiza directamente en el muro, esto implica que el secado también se lleva a cabo en el lugar [4]. Cuando el material se encuentra estable es posible aplanar los muros retirando con una pala los elementos sobresalientes.

Esta técnica puede llegar a ser muy duradera y resistente, siempre y cuando se utilicen los materiales correctos (arena, arcilla y fibra vegetal). En Yemen se han visto edificaciones de hasta tres niveles, y cabe destacar en Devon, Inglaterra existen aproximadamente 20,000 casas con esta técnica [59].

Como ejemplos podemos presentar los siguientes:

- Handmade School en Rudrapur, Bangladesh.
- Pabellón de Servicios de Cob en Eden Project, en Cornwall, Reino Unido.

Bahareque

Es un sistema constructivo mixto que utiliza los elementos del entorno como palos y cañas para generar un entretejido que finalmente estructura un encofrado que da forma a los muros, este a su vez se rellena con barro y piedras para terminar la edificación [60].

Colectivo BMA – Edificio de alojamiento y reunión para el Instituto Mexicano para el Desarrollo Comunitario (IMDEC), Guadalajara, México.

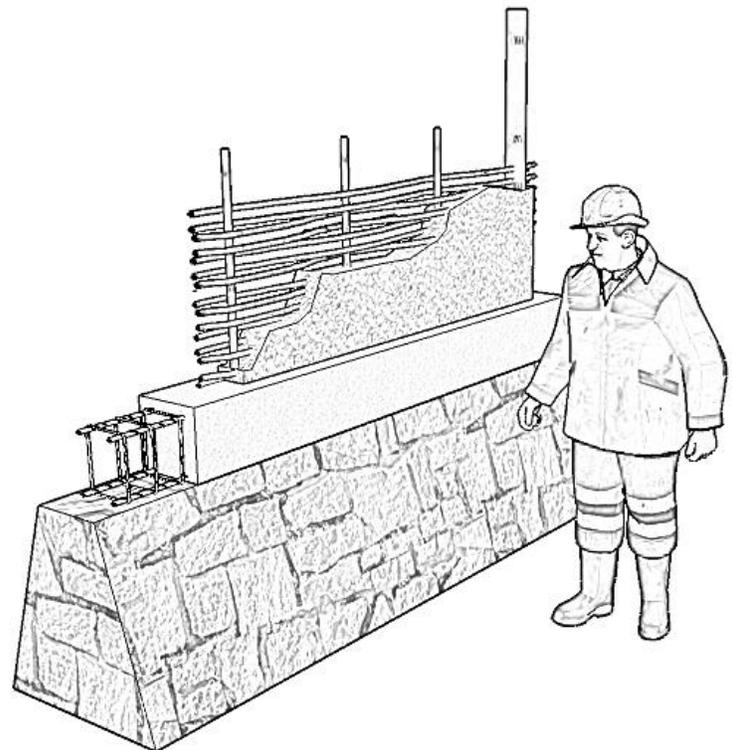


Figura 2-14 Representación de muro realizado con Bahareque. Fuente: elaboración propia.



Figura 2-15 Ramas de "Chapulixtle" utilizadas en la construcción mediante la técnica de Bahareque. Fuente: foto del autor.

Llenado

Técnica que consiste en llenar con tierra algún encofrado libre. Este encofrado funciona como contenedor del material.

Este proceso permite reutilizar objetos que aparentemente han terminado su ciclo de vida, tal es el caso de botellas, neumáticos o costales.

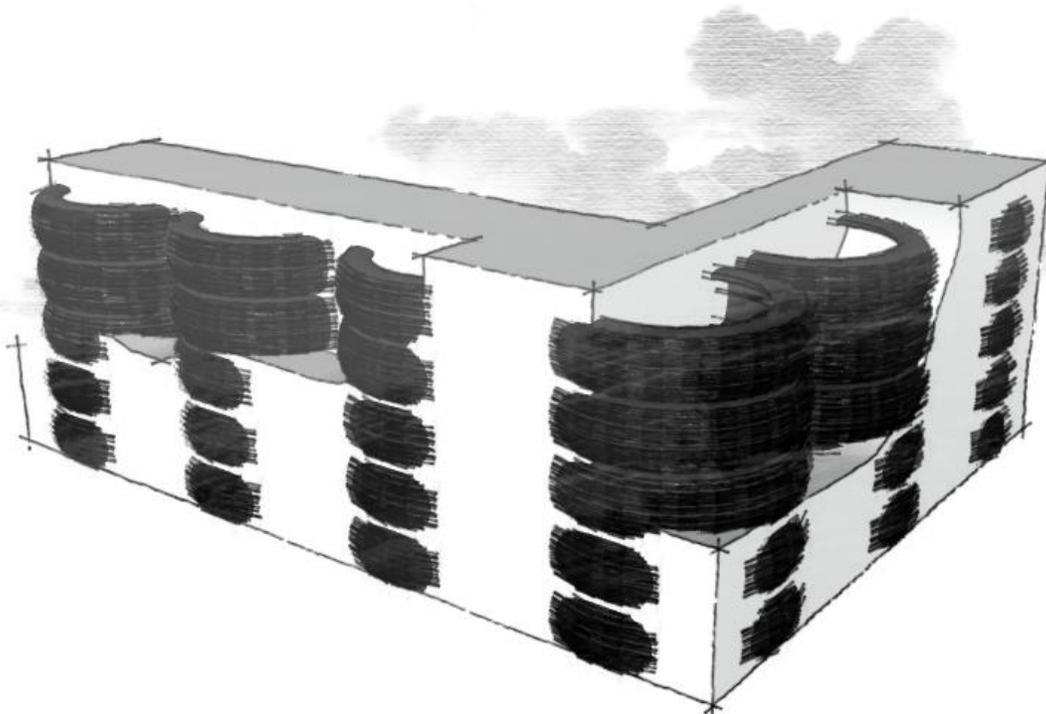
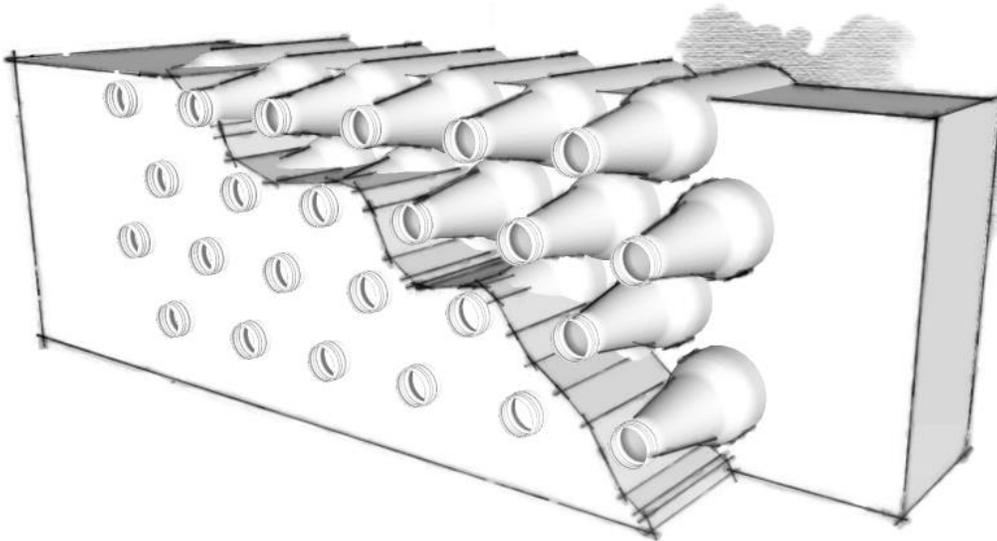
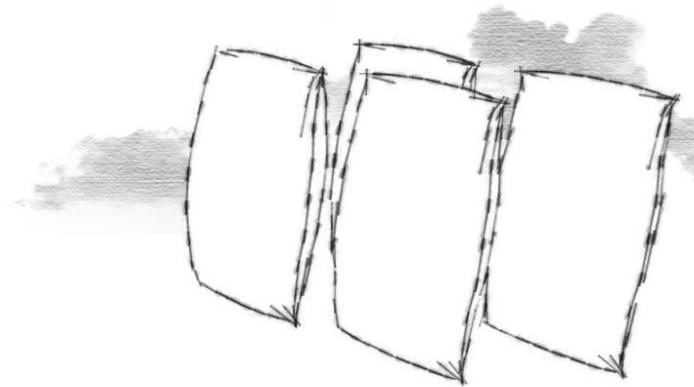


Figura 2-16 Representación de llenado de costales, botellas y llantas con tierra. Fuente: elaboración propia.

Todas las técnicas anteriormente descritas se han realizado en diferentes países alrededor del mundo. En diferentes proyectos arquitectónicos que van desde viviendas hasta espacios culturales.



Figura 2-17 Edificio educativo ubicado en la Ciudad de México. Fuente: foto del autor.

Capítulo 3

Desarrollo de mezcla a base de arcilla y aditivos como propuesta en la elaboración de elementos constructivos

3.1 Compuestos y características

El creciente avance tecnológico permite el mejoramiento de las características naturales de la arcilla, con esto se garantizan cualidades óptimas para su empleo, optimizando sus propiedades, reduciendo costos y tiempos de edificación al mismo tiempo de disminuir el impacto ambiental.

Los sistemas de estabilización para arcillas pueden ser utilizados en conjunto, por lo que, si se manejan en las proporciones adecuadas, son plenamente compatibles.

En este capítulo se desarrolla la propuesta de aditivo para arcillas, que permite hacer

uso de ellas para la fabricación de bloques constructivos.

Entendiendo por aditivo, ya sea natural o sintético, a una sustancia o mezcla de varias sustancias, que condiciona intencionalmente al producto, para lograr ciertos beneficios.

La propuesta cuenta con materiales arcillosos como elemento principal, al cual se le integran aditivos como polisacáridos, sacarosas, y diversos complementos que permiten que el producto final pueda ser aplicado.

Con este propósito se han propuesto y estudiado los siguientes elementos.

Arcilla

Para establecer la arcilla requerida se trabajó con cuatro distintos tipos de arcilla, en las que se consideró su plasticidad, pureza, costo, accesibilidad y uniformidad de partícula y generación de microorganismos.

Finalmente se optó por una arcilla comercial, caracterizada y controlada, con el propósito de conocer exactamente las características de cada elemento, y estudiar los resultados de las pruebas sin alteraciones o variables.

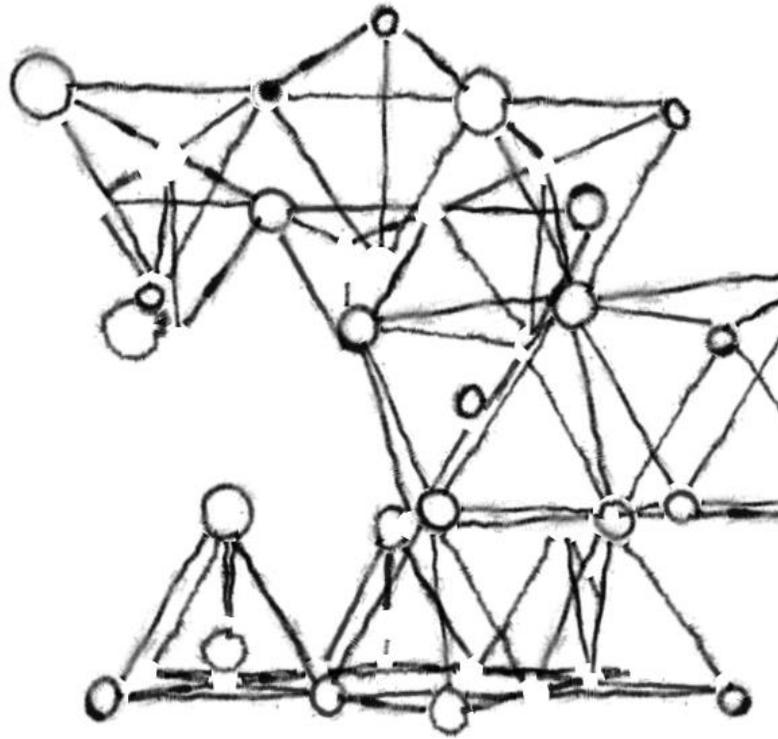


Figura 3-1 Presentación de 4 distintos tipos de arcilla, como parte del proceso comparativo. Fuente: foto del autor.



Se propone la Arcilla Old Mine #4, conocida también como Old Mine 4, OM4, Arcilla Bola o Arcilla Caolinítica, la cual puede ser suministrada por la empresa Koprino S.A. de C.V.

Esta es una arcilla de grano fino y uniforme, con buena plasticidad y resistencia. Su pureza es apropiada para combatir la proliferación de hongos en las muestras.

OM4 Es una arcilla muy utilizada en pastas para moldes de fundición, aunque su uso se aplica normalmente a la Cerámica, en esmaltes cerámicos, aisladores de porcelana, paneles de yeso, azulejo de techo y emulsiones de sellado de carbón de alquitrán.

A continuación, se muestra el análisis químico, propiedades físicas, propiedades de cocimiento y tamaño de partícula. Datos obtenidos de la ficha técnica de la arcilla OM4, proporcionada por Koprino S.A. de C.V.

Tamaño de partícula	
% < 20 (micras)	96
% < 10 (micras)	91
% < 5 (micras)	83
% < 2 (micras)	68
% < 1 (micras)	57
% < 0.5 (micras)	46

Tabla 3-2 Tamaño de partícula de la arcilla OM4. Fuente: Ficha técnica proporcionada por Koprino S.A. de C.V.



Figura 3-2 Arcilla OM4. Fuente: foto del autor.

Propiedades Físicas %	
Agua de plastividad (%)	32.8
Encogimiento en seco (%)	6.2
Módulo de ruptura (M.O.R) en seco * (psi)	610
pH	4.0
Methylene Blue Index (M.B.I) (meq/100 g)	9.2
Área de superficie específica (m ² /g)	23.1
SO ₂ Soluble * (ppm)	Bajo
* SO ₂ Soluble (ppm)	Bajo Trazas a 150 Medio 150 a 450 Alto Mayor a 450

Tabla 3-1 Propiedades físicas de la arcilla OM4. Fuente: Ficha técnica proporcionada por Koprino S.A. de C.V.

Análisis Químico	
SiO ₂ (%)	59.7
Al ₂ O ₃ (%)	26.3
Fe ₂ O ₃ (%)	1.3
TiO ₂ (%)	2.0
K ₂ O (%)	1.1
Na ₂ O (%)	0.2
CaO (%)	0.2
MgO (%)	0.5
L.O.I. (% a 950°C)	9.3
Carbón (%)	0.5

Tabla 3-3 Análisis químico de la arcilla OM4. Fuente: Ficha técnica proporcionada por Koprino S.A. de C.V.

Propiedades de cocimiento	
% de encogimiento total	
Cono 5	11.3
Cono 10	13.6
% de absorción	
Cono 5	11.1
Cono 10	4.2
P. C. E.	31

Tabla 3-4 Propiedades de cocimiento de la arcilla OM4. Fuente: Ficha técnica proporcionada por Koprino S.A. de C.V.

Polisacárido

Los polisacáridos son largas moléculas de hidratos de carbono formadas por la unión de numerosas unidades individuales de monosacáridos (hidratos de carbono más sencillos y que no pueden ser hidrolizados en otros compuestos más simples) unidas entre sí por enlaces glucosídicos.

Los polisacáridos son carbohidratos, y por lo tanto contienen carbono, hidrógeno, y oxígeno. Tienen la fórmula general $C_x(H_2O)_y$, en donde y es definida como $x-1$ [61].

La gran mayoría de polisacáridos naturales contienen cientos de monómeros y , en ocasiones, varios miles.

Se encuentran como cadenas lineales o ramificadas, integrados por un solo tipo de monosacárido (homopolisacárido) o por varios tipos de monosacáridos (heteropolisacárido) [62].

La unión entre polímeros se lleva a cabo principalmente mediante enlaces electrostáticos. Algunos de estos complejos al calentarse forman geles y producen una estructura ordenada tridimensional en la que queda atrapada el agua. Las características del gel dependen,

entre otros factores, de la concentración del polímero.

Como polisacárido principal se utilizó almidón.

El almidón es un polisacárido de alto peso molecular y se le considera, después de la celulosa, el polisacárido más abundante e importante desde el punto de vista comercial, ha sido parte fundamental de la dieta del hombre con un gran número de usos industriales. Son polímeros donde se unen un gran número de monosacáridos de glucosa. Los almidones tienen la fórmula general $(C_6H_{10}O_5)_n$ [58].

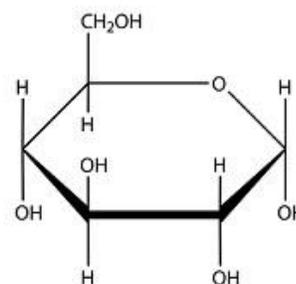
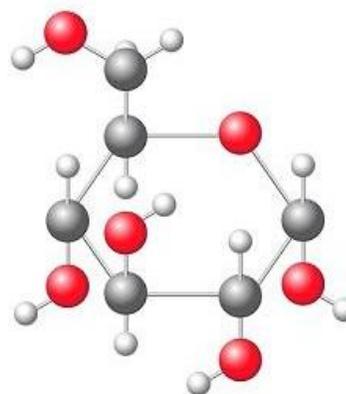


Figura 3-3 Estructura química de la glucosa. Fuente: <https://www.lifeder.com/ejemplos-de-monosacaridos/>. Consultada el 25/03/2019.

Este elemento es una mezcla de dos polisacáridos muy similares, la amilosa y la amilopectina, ambas se componen de cadenas largas de moléculas de glucosa.

En términos generales, los almidones contienen aproximadamente 17-27% de amilosa y el resto de amilopectina.

Amilosa: Molécula linear de almidón que está constituida por muchos anillos de glucosa unidos entre sí para formar largas moléculas que no tienen ramificaciones.

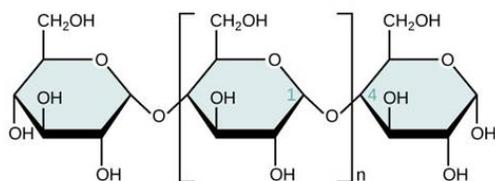


Figura 3-4 Estructura de la Amilosa. Fuente: <http://www.edualimentaria.com/frutas-hortalizas-frutos-secos-composicion-propiedades/preguntas-frecuentes/2-uncategorised/78-hidratos-de-carbono-carbohidratos>. Consultada el 25/03/2019.

Amilopectina: Molécula del almidón que tiene ramificaciones (forma similar a la de un árbol) y está constituida por anillos de glucosa unidos entre sí para formar largas moléculas con numerosas ramificaciones laterales cortas. La amilopectina es esencialmente insoluble en agua caliente.

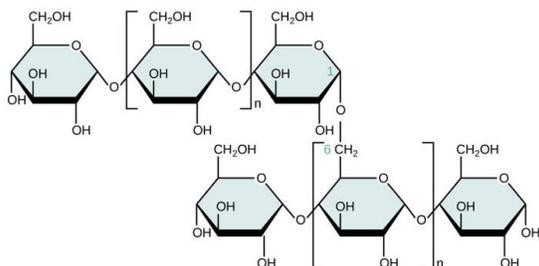


Figura 3-5 Estructura de la Amilopectina. Fuente: <http://www.edualimentaria.com/frutas-hortalizas-frutos-secos-composicion-propiedades/preguntas-frecuentes/2-uncategorised/78-hidratos-de-carbono-carbohidratos>. Consultada el 25/03/2019.

Tanto la amilosa como la amilopectina influyen de manera determinante en las propiedades sensoriales y reológicas de los alimentos, principalmente mediante su capacidad de hidratación y gelatinización.

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, debido a que su estructura está altamente organizada y a que presenta una gran estabilidad por las múltiples interacciones que existen con sus dos polisacáridos constituyentes; sin embargo, cuando se calientan se empieza un proceso lento de absorción de agua.

A medida que se incrementa la temperatura, se retiene más agua y el gránulo empieza a hincharse y a aumentar de volumen sin que se presente un aumento en la viscosidad. Al llegar a temperaturas normalmente cercanas a los 65°C, dependiendo de cada tipo de almidón, el gránulo alcanza su volumen máximo. Si se administra más calor, el gránulo hinchado, incapacitado para retener más líquido, se rompe parcialmente y la amilosa y la amilopectina, fuertemente hidratadas, se dispersan en la disolución. A este proceso se le llama gelatinización.

La temperatura de gelatinización es aquella en la que se alcanza el máximo de

viscosidad; esta temperatura es en realidad un intervalo, ya que los gránulos tienen diferente composición, lo que provoca que unos sean más resistentes que otros. Por esta razón, se llega a presentar una diferencia de 8 a 12°C, teniendo como promedio 10°C entre la temperatura de gelatinización de los primeros gránulos y la de los últimos [62].

Cabe indicar que al final de este fenómeno se genera una pasta en la que existen cadenas de amilosa de bajo peso molecular altamente hidratadas que rodean a los agregados, también hidratados, de los restos de los gránulos. La solubilización y la destrucción total de dichos gránulos se consigue cuando se someten a temperaturas de autoclave y se acelera considerablemente con una agitación violenta.

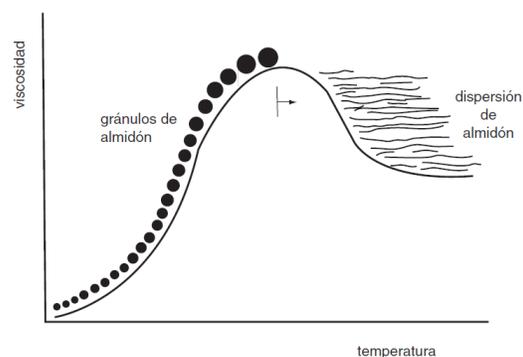


Figura 3-6 Gelatinización del almidón. Fuente: *Química de los alimentos*, Salvador Badui. 2006.

La cantidad de agua que absorben los diferentes almidones varía, pero se puede considerar que va de 40 a 55 gramos de agua por cada 100g de sólido. El maíz tiene menor capacidad de hincharse, por lo que se agrega pectina para sumar al proceso de gelatinización.

Se anexa una tabla con las características y cantidades de cada componente en los almidones más utilizados.

Tipo	Amilopectina (%)	Amilosa (%)	Temperatura Gelatinización (°C)	Tamaño de Gránulo (micras)
Maíz	69 - 74	26 - 31	62 - 72	5 - 25
Papa	73 - 77	18 - 27	58 - 67	5 - 100
Arroz	83	17	62 - 78	2 - 5
Tapioca	82	18	51 - 65	5 - 35
Trigo	76	24	58 - 64	11 - 41

Tabla 3-5 Características de algunos almidones usados en la industria alimentaria. Fuente: *Química de los alimentos*, Salvador Badui. 2006.

Posterior a una evaluación general de los tipos de almidones en el mercado y sus características se optó por la utilización del almidón de maíz.

Uno de los métodos más utilizados para la obtención de almidón comercial consiste en la llamada molienda húmeda del maíz, en la que intervienen los siguientes pasos:

Se limpian los granos y se maceran en agua de 24 a 48 horas a 50°C (se puede añadir entre 0.1 y 0.2% de anhídrido sulfuroso como agente microbiano); en esta etapa el maíz absorbe agua hasta alcanzar un contenido de 45 a 50%, con lo cual se ablanda el grano y facilita su trituración; durante este proceso se desprende el germen, que se recupera por flotación o mediante un sistema de hidrociclones. La suspensión resultante se muele y se filtra, y el almidón se separa de las proteínas por diferencia de densidades.

La fracción que contiene el polisacárido se purifica hasta reducir su contenido de proteínas a un valor menor de 0.3%; posteriormente se concentra y se seca por métodos como el de tambor rotatorio o el de aspersión.

Los subproductos también tienen un alto valor comercial, ya que el germen se usa para la extracción de aceite comestible, y

el gluten, rico en proteínas, para el consumo humano y animal.

El almidón de maíz aportó características cementantes y será el principal elemento para lograr la polimerización, lo cual aumentará la cohesión de las moléculas, resultando en una mayor resistividad a las pruebas no destructivas, y flexión y tensión a las pruebas destructivas. Se espera también que al agregar este elemento se obtenga una mejoría en la trabajabilidad de la mezcla, una reducción de la absorción de humedad y una dureza temprana de la mezcla sin la necesidad de utilizar altas temperaturas [62].



Figura 3-7 Almidón utilizado para las pruebas de laboratorio.

Sacarosa

Generalmente el término “azúcar de mesa” es utilizado para referirse a la sacarosa, la cual es obtenida de la caña de azúcar o remolacha azucarera. Su fórmula molecular es $C_{12}H_{22}O_{11}$, (oxígeno 51.42%, carbono 42.10% e hidrógeno 6.48%). Su peso molecular es de 342.30 g/mol. Presenta una solubilidad al agua de 100gr. Por cada 50ml. a 20°C.

En la naturaleza se encuentra en un 20 % del peso en la caña de azúcar y en un 15 % del peso de la remolacha azucarera [63].

La sacarosa es un disacárido y está formado por dos unidades de monosacáridos unidos por el enlace glucosídico. Entre los disacáridos destacan la sacarosa, la lactosa y maltosa, siendo la sacarosa un disacárido formado por fructosa y glucosa, cuyo carbono aldehídico se une al cetónico de la fructosa, estableciendo un enlace glucosídico.

La fructosa que contiene hace que el enlace glucosídico pueda hidrolizarse con facilidad para producir una mezcla altamente reductora de los correspondientes monosacáridos.

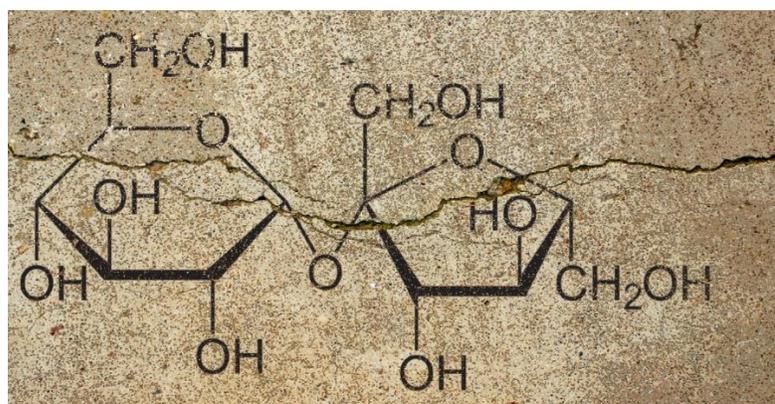


Figura 3-8 Unión de glucosa y fructosa.

Este disacárido se puede clasificar por su origen (de caña de azúcar, de remolacha), y por el grado de refinación de éste, el cual es evidente visualmente a través del color (azúcar moreno, azúcar rubio, blanco), que está dado principalmente por el porcentaje de sacarosa que se le ha extraído.

La sacarosa es el químico orgánico más abundante del mundo, el uso industrial del azúcar ha aumentado considerablemente pasando del 50% de hace un siglo, a un 70% en la actualidad. La sacarosa ha sido y sigue siendo una importante fuente de energía en la dieta de la especie humana a lo largo de su historia [64].

La industria de la alimentación utiliza este compuesto como edulcorante por sus atributos, entre los cuales se hallan sus cualidades sensoriales, seguridad,

compatibilidad con otros ingredientes alimentarios y estabilidad en diferentes ambientes alimentarios [65].

Su hidrólisis parcial se aprovecha comercialmente en la elaboración de azúcar usado en bebidas, ya que se reduce el porcentaje de azúcar necesario para proporcionar un dulzor determinado, siendo el edulcorante más utilizado [62], con aplicaciones en productos de confitería, panadería, botanas, repostería de chocolate, productos lácteos, mermeladas, jaleas y ates, entre muchos otros. Se utiliza como endulzante, preservante, antioxidante, excipiente y agente granulador y tensoactivo, se encuentra en la lista de alimentos seguros de la Administración de Alimentos y Drogas de Estados Unidos (Food and Drug Administration, o FDA) [65].

Este azúcar tiene un grado de solubilidad muy alto, gran capacidad de hidratación es un azúcar no reductor, se utiliza como patrón de dulzor, de los azúcares posee la mayor viscosidad o espesor en una solución acuosa. empieza a caramelizar a una temperatura aproximada de 160°C. El cristal de sacarosa es transparente, el color blanco es causado por la múltiple

difracción de la luz en un grupo de cristales.

La alta presión osmótica de las soluciones de sacarosa en solución es un importante factor para preservar los alimentos y la actividad microbiana. La gran uniformidad en el tamaño de la partícula de sacarosa la hace un buen aditivo. Se aprovecha el efecto de la sacarosa en la gelatinización de los almidones, en la habilidad de la sacarosa para dispersar partículas amorfas. La sacarosa en solución evita la formación de óxidos en hierro debido a su baja actividad [65], tiene un efecto preservante al disminuir la actividad del agua en el producto mediante el aumento de la presión osmótica, eliminando la actividad microbiana.



Figura 3-9 Sacarosa o "azúcar de mesa". Fuente: foto del autor.

Tripolifosfato de Sodio

También conocido como: Trifosfato de sodio, Tripolifosfato, STPP, Trifosfato pentasódico. Es un compuesto inorgánico de fórmula $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$. Presentado en polvo blanco, ligeramente higroscópico y soluble en agua, a pesar de su elevado peso molecular de 367.87 g/mol.

Su producción es a gran escala como un componente de muchos productos domésticos e industriales como detergentes [66].

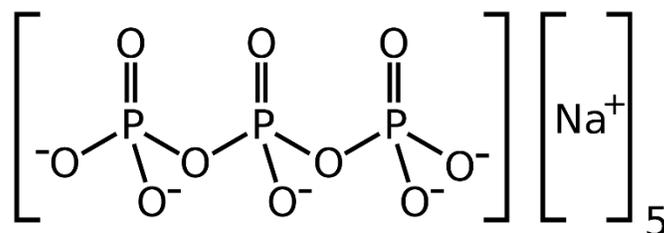


Figura 3-11 Modelo del Tripolifosfato de Sodio.

Entre sus diversas aplicaciones funciona como: agente secuestrante, es decir, facilita la acción del tensioactivo al secuestrar los iones de calcio y magnesio, y evitar la formación de compuestos incrustantes, esto hace que sea utilizado en productos para la limpieza como detergentes y jabones en polvo, en medicina, la agricultura y en tratamiento de aguas, pinturas, etcétera [62].

Otras características importantes son sus propiedades de defloculante, permitiendo que las superficies coloidales absorban el anión Tripolifosfato, y tener como resultado partículas coloidales que se repelen mutuamente para mantener la suspensión; así mismo funciona como emulsificante y estabilizante.

En el presente proyecto se utilizó principalmente como defloculante para disminuir la necesidad de agua en la mezcla, aumentando la eficiencia de los procesos subsiguientes de secado. Aprovechando sus cualidades secuestrantes y emulsificantes.



Figura 3-10 Tripolifosfato de Sodio utilizado en las pruebas.
Fuente: foto del autor.

Alcohol Polivinílico

También conocido como PVOH, PVA, PVal, polietenol o poli (alcohol vinílico), es un polímero sintético del alcohol vinílico, totalmente degradable, de fórmula química general $(C_2H_4O)_n$ en donde n indica la cantidad de átomos de carbono presentes en ese compuesto. Cuenta con presentación en crema blanca inodora, gránulos o polvo. Se disuelve lentamente en agua fría, pero lo hace más rápidamente a temperaturas elevadas, y puede normalmente disolverse a más de 90°C . Cuando se calienta a más de 200°C se descompone, emitiendo un humo ocre e irritante. Es un material flexible, e higroscópico.

Este elemento cuenta con propiedades para formar películas, las presentaciones de mayor peso molecular generan una película más resistente, y los grados de hidrólisis alta aumentan la resistencia al agua [67].

Tiene alta resistencia y flexibilidad, así como alta propiedades de barrera para el oxígeno y los aromas, con mayor humedad más agua es absorbida, lo que permite, sea utilizado en el empaquetamiento de alimentos.

El agua es el principal solvente empleado para disolver el PVOH.

En construcción se utiliza como recubrimiento o sellador. Resiste a la mayoría de los solventes. Es utilizado para proteger a los automóviles de rayones o suciedad. Recubrimiento en papel, protector de telas, espesante en aditivos, revestimientos de papel, como una película soluble en agua útil para el embalaje, se utiliza en protección guantes resistentes a químicos

Es materia para la síntesis de otros polímeros como el nitrato de polivinilo y el alcohol polivinílico.

Se aprovecharon en este proyecto sus propiedades formadoras de películas con capacidad emulsionante y adhesiva, que pueden soportar tensiones fuertes.



Figura 3-12 Alcohol Polivinílico utilizado en las pruebas. Fuente: foto del autor.

Pectina citrina lenta

la pectina es un bio-polímero constituido principalmente por ácido galacturónico, siendo una sustancia natural formada principalmente en la pared celular primaria plantas y frutas. Se extrae con agua caliente acidificada [70], precipitándola de la disolución con etanol o con una sal de aluminio.

Tiene la función de cemento intercelular [71], ayudando a mantener unida la pared celular de las plantas. Están compuestas por distintos elementos estructurales que consisten en cadenas largas de moléculas de polisacáridos que se unen para formar una pasta gomosa [72]. Funciona como espesante natural, que al unirse con el azúcar y los ácidos de la fruta forma geles.

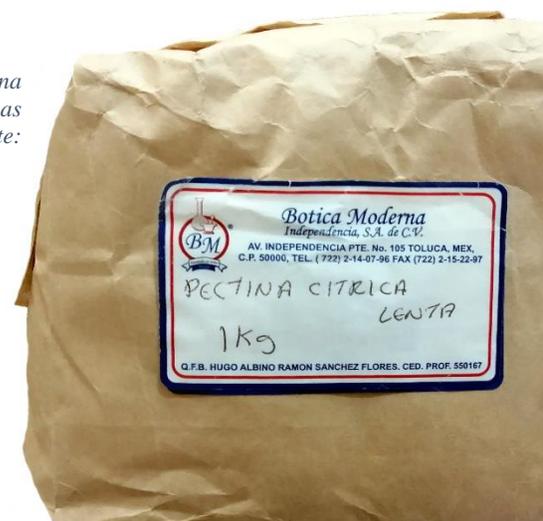
Existen dos tipos principales de pectina comercial: Alto Metoxilo (HM) y Bajo Metoxilo (LM). La de alto metoxilo es la más común, se subdivide con relación al tiempo que tarda en iniciar el proceso de gelificación, en pectina HM de corto tiempo de gelificación y pectina HM de largo tiempo de gelificación.

Las pectinas, se hinchan rápidamente con el agua, si no existe una fuente de agitación que la disperse, ésta tiende a retener

rápidamente agua, entre 15 y 25 veces su peso, formando grumos difíciles de disolver. Es conveniente mezclar por separado las partículas con agua, mediante sistemas mecánicos o mezclándolo previamente con otro material no acuoso [73]. Se le añaden distintos azúcares para incrementar su solubilización, así como el aumento de la temperatura.

La pectina tiene diversas aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética gracias a sus propiedades emulsificantes, espesantes, texturizantes y gelificantes [71]. En la industria alimenticia utilizan pectina para hacer dulces, mejorar la consistencia de los yogures y de algunos productos horneados, como gelificante para productos como mermeladas y jaleas, como estabilizante en jugos, siendo uno de los estabilizadores más versátiles del mercado. La pectina se utilizó en el presente proyecto como pegamento vegetal, trabajando con la sacarosa para brindar estabilidad estructural a la mezcla.

Figura 3-14 Pectina utilizada para pruebas de laboratorio. Fuente: foto del autor.



Cemento Portland

El cemento portland es un polvo finamente molido, compuesto principalmente por silicatos de calcio y, en menor proporción, por aluminatos de calcio, que, mezclado con agua se combina, fragua y endurece a temperatura ambiente, tanto al aire como bajo el agua, patentado por J. Aspdin en 1824 [74].

Denominado Pórtland por su semejanza a una piedra que abunda en Inglaterra. Composición química: $95\% [3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3] + 5\% \text{CaSO}_4$.

También conocido como cemento hidráulico ya que, al mezclarse con agua, reacciona químicamente hasta endurecer en condiciones secas y húmedas e incluso, bajo el agua.

Las materias primas para la producción del portland son minerales que contienen: óxido de calcio (44 %), óxido de silicio (14,5 %), óxido de aluminio (3,5 %), óxidos de hierro (3 %), óxido de magnesio (1,6 %). La extracción de estos minerales se hace en canteras

Tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes con características plásticas con propiedades adherentes que solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas hasta adquirir su resistencia característica.

Cuando el cemento se mezcla con arena, grava y agua tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada concreto, utilizado en obras de ingeniería y construcción.



Figura 3-15 Bulto de cemento, 50 Kg. Fuente: foto del autor.

Diseñado para su aplicación en todo tipo de elementos o estructuras de concreto simple o armado.

Su resistencia a la compresión está en relación con la cantidad de agua y al tiempo de secado.

Su durabilidad y flexibilidad es excelente ya que no sufre deformación alguna.

Al entrar en contacto con el agua y los agregados, como la arena y la grava, el cemento es capaz de asumir cualquier forma tridimensional.

A pesar de las condiciones climáticas, el cemento conserva la forma y el volumen, y su durabilidad se incrementa con el paso del tiempo.

El cemento es un adhesivo tan efectivo que una vez que fragua, es casi imposible romper su enlace con los materiales tales como el ladrillo, el acero, la grava y la roca.

Existen generalmente cinco tipos: Cemento Portland Normal (CPN): o común, sin aditivos, es el más empleado en construcción.

Cemento Portland blanco (PB): compuesto por materias primas pobres en hierro. Se emplea para estucos, terrazos, etc.

Cemento Portland de bajo calor de hidratación (CBC): produce durante el fraguado una baja temperatura de hidratación.

Cemento Portland de elevada resistencia inicial (CER): posee un mayor contenido de silicato tricálcico que le permite un fraguado más rápido y mayor resistencia. Se emplea en muros de contención y obras hidráulicas.

Cemento Portland resistente a los sulfatos (CPS): tiene bajo contenido en aluminato tricálcico, que le permite una mayor resistencia a la acción de sulfatos contenidos en el agua o en el terreno.

Cemento Portland con aire ocluido: tiene un aditivo especial que produce un efecto aireante en el material [75].

Se utiliza en mínimas cantidades, como aglutinante auxiliar.



Figura 3-16 Cemento utilizado en las pruebas. Fuente: foto del autor.

3.2 Equipo para preparación de mezcla

Equipo para preparar aditivo y mezcla

Balanza digital de precisión

Mezclador mecánico utilizado en el Estándar N.CMT.2.02.001 y citado en el Manual M.MMP.2.02.004 / 04

Vasos de precipitado

Espátulas

Guantes de látex

Bandejas

Moldes para cubos



*Figura 3-17 Mezcladora KitchenAid professional 600.
Fuente: foto del autor.*

3.3 Proceso de preparación de mezcla (100 g de arcilla)

Cantidades

Producto	Proveedor	Cantidad para 100 g de arcilla en g	Porcentaje total	g necesarios para obtener 1 kg	Kg necesarios para obtener 1 ton
Arcilla OM4	Koprino S.A. de C.V.	100.00	64.72%	647.25	647.25
Almidón de maíz en polvo	Botica la moderna	3.00	1.94%	19.42	19.42
Sacarosa	-	6.00	3.88%	38.83	38.83
Ácido Acético	Sabormex S.A. de C.V.	0.20	0.13%	1.29	1.29
Tripolifosfato de sodio	Drogería Cosmopolita	2.00	1.29%	12.94	12.94
Pectina cítrica lenta	Botica la moderna	3.00	1.94%	19.42	19.42
Alcohol polivinílico	-	0.50	0.32%	3.24	3.24
Cemento Portland	Cementos Tolteca	2.00	1.29%	12.94	12.94
Agua	-	37.80	24.47%	244.66	244.66
Total		154.50	100.00%	1000.00	1000.00

Las cantidades aquí presentadas fueron determinadas posteriores a diversos ensayos de laboratorio. Se considera esta tabla como la mejor prueba lograda.

Tabla 3-6 Cantidades propuestas en el proyecto. Fuente: foto del autor.



Figura 3-18 Colocación de los materiales. Fuente: foto del autor.

Proceso

Proceso para elaboración 154.50 g de material (100 g de arcilla) con fundamento en lo establecido en ASTM-Designation-C305, (Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency) [76] con modificaciones derivadas de la naturaleza del material.

Todos los ingredientes son pesados y colocados por separado, sólidos en bandejas y líquidos en los vasos de precipitado.

Se colocan 100 g de arcilla OM4 en el mezclador mecánico, posteriormente se agregan 3 g de almidón de maíz y 2 g de Tripolifosfato de sodio. Se enciende el mezclador a una velocidad baja (140 ± 5 r/min) durante 45 segundos.

Con una espátula plástica se retira el material ubicado en los bordes y se vuelve a mezclar por 30 segundos a igual velocidad.

Se agregan al mezclador 3 g de pectina cítrica lenta, 2 g de cemento portland y 0.5 g de alcohol Polivinílico.

Se enciende el mezclador a una velocidad baja durante 45 segundos.

Mediante una espátula plástica se retira el material ubicado en los bordes y se vuelve a mezclar por 30 segundos a igual velocidad para obtener la mezcla total de los componentes secos.

Se calienta el agua a temperatura de ebullición, la cual corresponde a 94°C por estar a 2600 msnm.

Se añade ácido acético al agua y se deja reposar por 10 segundos. Posteriormente se adicionan 6 g de sacarosa y se mezcla manualmente.

Se enciende la mezcladora a baja velocidad y se va adicionando la solución (agua, sacarosa y ácido acético) por un periodo de 8 segundos. Se mezcla durante 45 segundos a una velocidad media (285 ± 10 r/min). Mediante una espátula plástica se retira el material ubicado en los bordes y se vuelve a mezclar por 30 segundos a velocidad media.

El material es retirado para su colocación en moldes e inmediatamente se continúa con la compresión a 1.21 MPa.

Figura 3-19 Cubos hechos para pruebas mecánicas. Fuente: foto del autor.



3.4 Pruebas de laboratorio

Para las siguientes pruebas se realizó una mezcla de arcilla Old Mine No. 4 mezclada con un 33% de su peso en agua, y una mezcla de arcilla OM4 con el aditivo descrito anteriormente.

Los moldes que se utilizaron fueron de acuerdo con ASTM-Designation-C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) [77] y a la norma N.CMT.2.02.001 [78], y citados en el Manual M.MMP.2.02.004/04 [79] para obtener cubos de 5 cm y vigas de 16 x 4 x 2,5 cm.

Las muestras permanecieron en los moldes por 24 horas, posteriormente las muestras fueron desmoldadas y colocadas en una hoja de polietileno para prevenir pérdida de humedad.

El área de trabajo se mantuvo con una humedad relativa de 60 % a $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante el tiempo de curado que fue de 28 días.

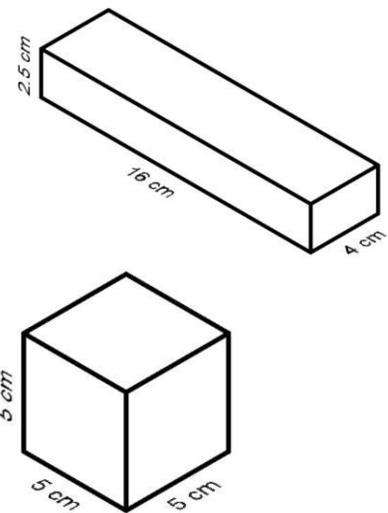


Figura 3-21 Medidas para muestras de arcilla con aditivo. Fuente: elaboración propia.

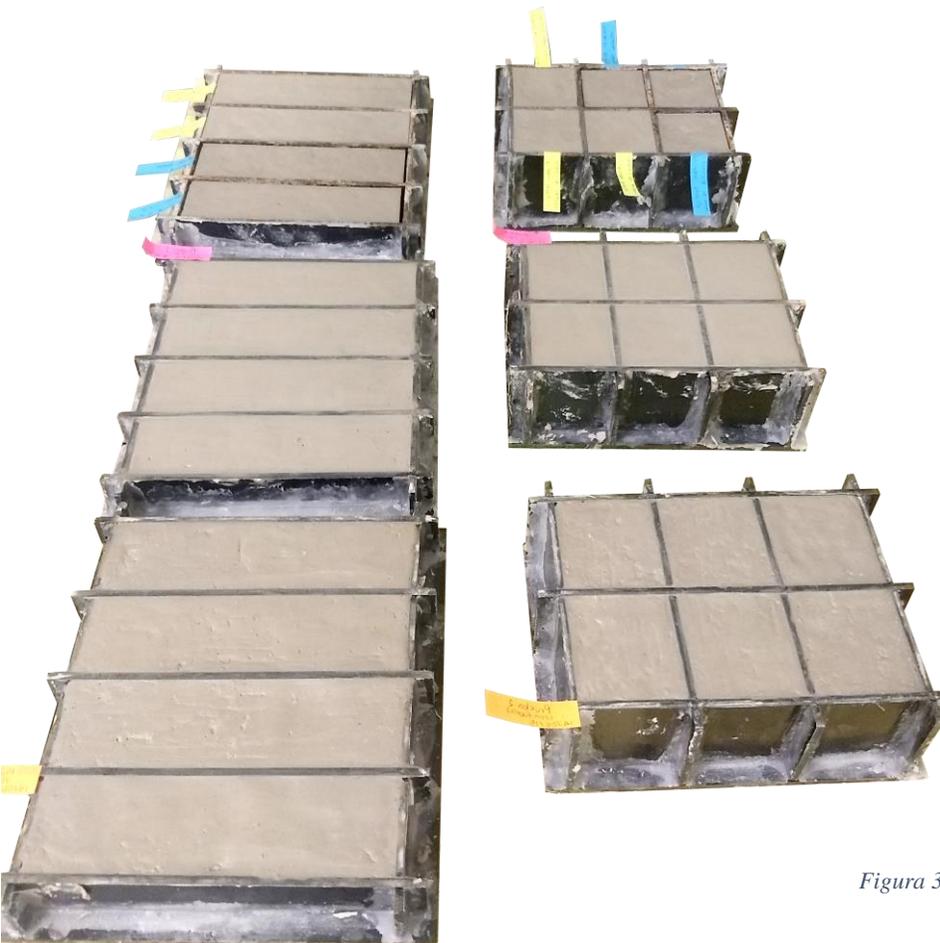


Figura 3-20 Muestras de arcilla con aditivo. Fuente: foto del autor.

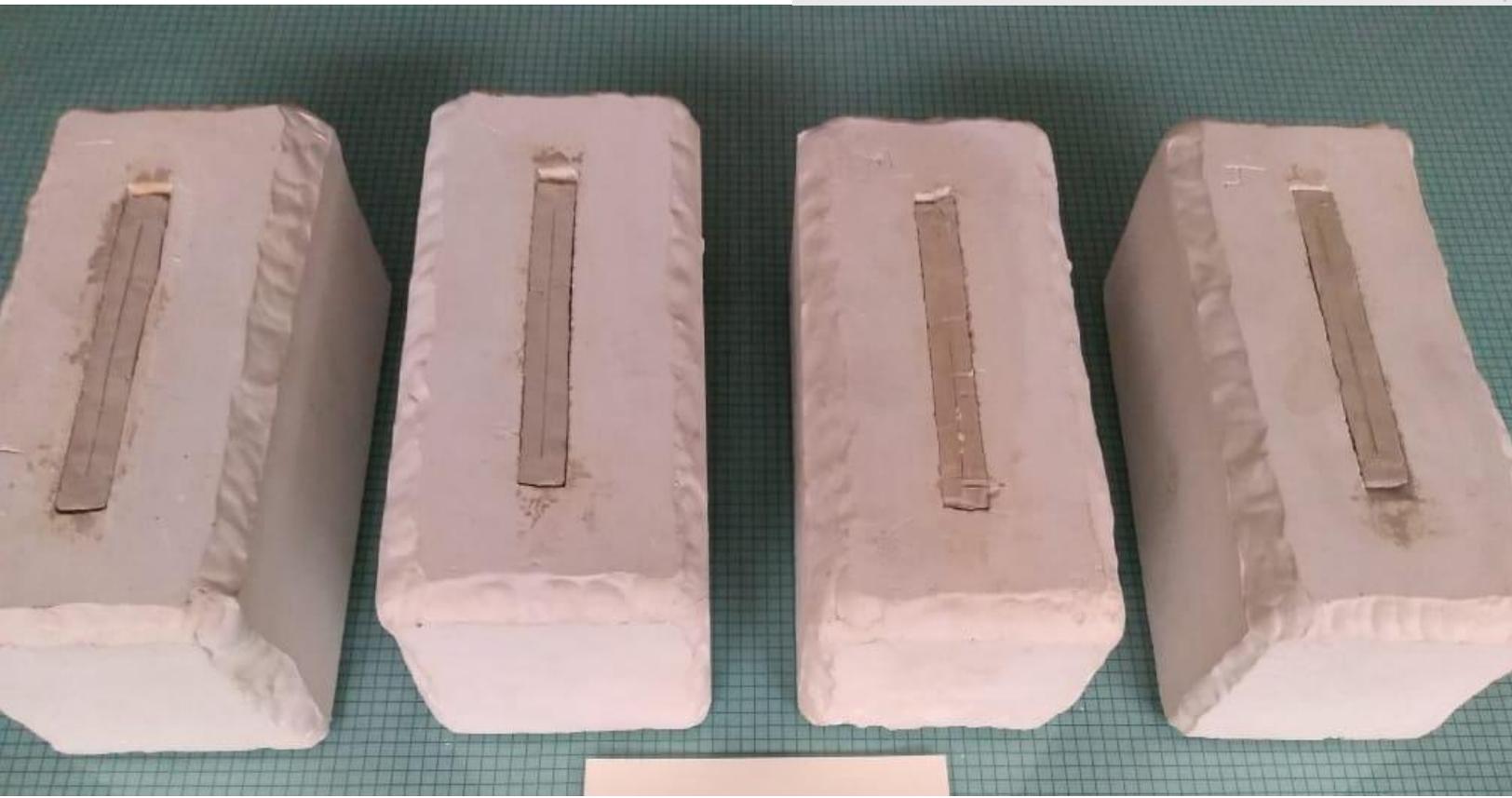
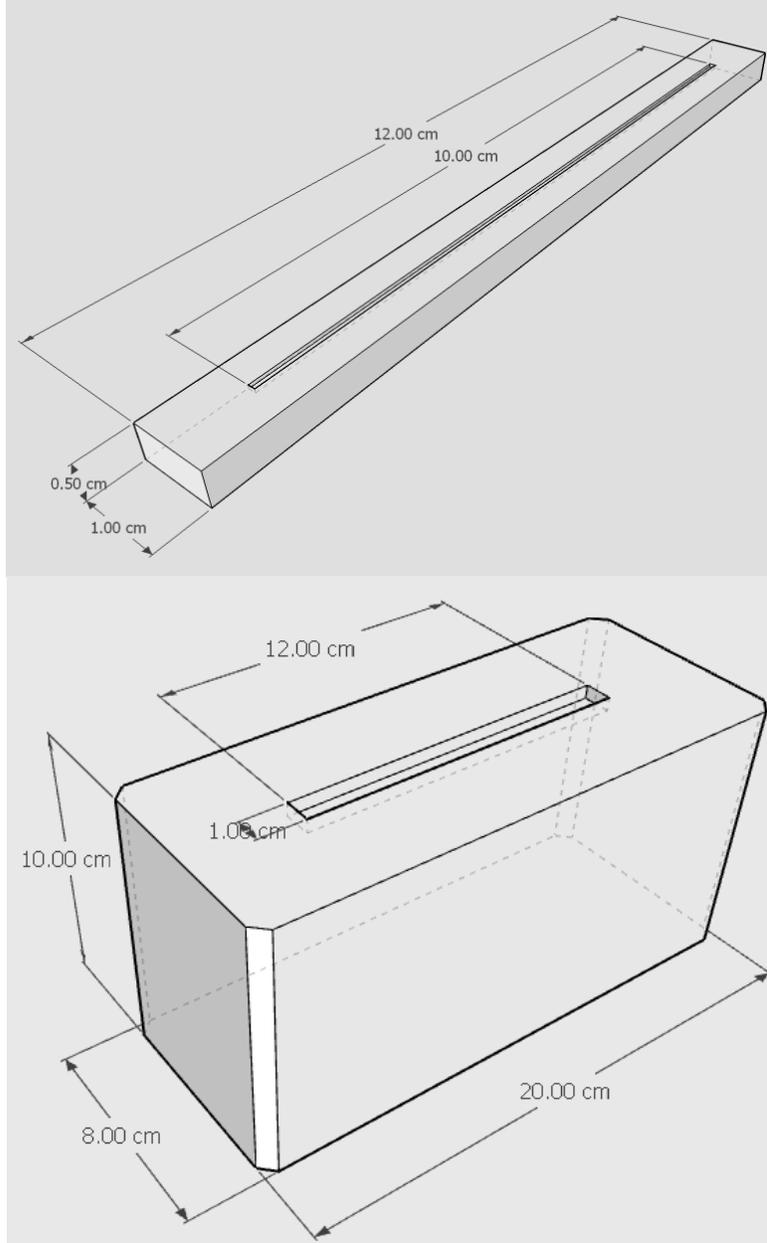
Contracción lineal al secado

Tiene el objetivo de definir el grado de contracción lineal.

Se colocó la muestra en un molde con características de acuerdo con el artículo propuesto por Mendoza [80], en donde se obtienen piezas en forma de barra con 12 cm de longitud, 1 cm de ancho 0.5 cm de alto. Mientras está fresca la mezcla se traza una línea de 10 cm y se deja secar por 21 días. Posteriormente se toma la medida de la línea para corroborar el índice de contracción lineal.

Los resultados en 8 muestras indican una contracción lineal del 5%.

Figura 3-22 Moldes para pruebas de contracción. Fuente: elaboración propia.



Contracción volumétrica al secado

Esta prueba define el grado de contracción volumétrica.

Se lubrican los moldes de 5 x 5 x 5 cm y de 15 x 2.5 x 4 cm a los que se coloca la mezcla, se deja secar por 21 días y se verifica el porcentaje de contracción, tomando la medida de cada lado de las muestras.

Se analizaron un total de cuatro cubos de arcilla con aditivo obteniendo un promedio de 100.53 cm³ con un error estándar de 1.39 y cuatro barras arcilla con aditivo obteniendo un promedio de 126.96 cm³ con un error estándar de 2.60.

Los siguientes valores se obtuvieron después de 15 días de la finalización de las mezclas, permitiendo que las muestras se secan a una temperatura ambiente de 21°C ± 2°C.



Figura 3-23 Cubo sometido a prueba volumétrica al secado.
Fuente: foto del autor.

	Longitud cm	Altura cm	Anchura cm	Área cm ³	Promedio cm ³	Error estándar
Cubo 1	4.70	4.70	4.60	101.61	100.53	1.40
Cubo 2	4.60	4.70	4.80	103.78		
Cubo 3	4.70	4.60	4.50	97.29		
Cubo 4	4.60	4.60	4.70	99.45		

Tabla 3-7 Prueba volumétrica en cubos. Fuente: foto del autor.

	Longitud cm	Altura cm	Anchura cm	Área cm ³	Promedio cm ³	Error estándar
Viga 1	14.90	2.30	3.70	126.80	126.96	2.60
Viga 2	14.70	2.40	3.80	134.06		
Viga 3	14.70	2.30	3.60	121.72		
Viga 4	14.50	2.40	3.60	125.28		

Tabla 3-8 Prueba volumétrica en vigas. Fuente: foto del autor.

Densidad

Esta medición se utiliza para identificar la relación con otros materiales del mismo tipo.

Se registró la masa de cuatro muestras colocadas en una balanza digital de precisión marca Precisa, serie 165 BJ, modelo BJ 2100D.

Los siguientes valores se obtuvieron después de 21 días de realizada la mezcla y dejada secar a temperatura ambiente $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.



Figura 3-24 Cubo en balanza digital. Fuente: foto del autor.

Muestra	Masa en gr	Área en cm^3	Densidad gr/cm^3	Promedio	Error estándar
Muestra 1	168.80	101.61	1.66	1.67	0.02
Muestra 2	169.10	103.78	1.63		
Muestra 3	165.30	97.29	1.70		
Muestra 4	167.35	99.45	1.68		

Tabla 3-9 Peso en muestras de arcilla con aditivo. Fuente: foto del autor.

Los resultados indican que el peso es un 11% superior al del tabique rojo recocido y 4 % al adobe tradicional.

Muestra	Kg/m^3
Tabique rojo recocido	1,500 kg/m^3
Adobe tradicional	1,600 kg/m^3
Muestra de arcilla con aditivo	1,670 kg/m^3

Tabla 3-10 Comparativa de densidad de materiales. Fuente: elaboración propia.

Por lo que se deduce que las piezas obtenidas de este material no diferencian de los cálculos estructurales normalmente realizados con otros materiales como los comparados anteriormente.

Prueba de compresión

El objetivo de esta prueba es determinar la resistencia del material o su deformación ante un esfuerzo de compresión para determinar los posibles usos y los alcances estructurales que brinda el material obtenido para otorgar seguridad y estabilidad.

La máxima resistencia a la compresión de un material es el valor del esfuerzo de compresión alcanzado cuando el material falla por completo.

Para la prueba de compresión se realizaron cubos de arcilla con aditivo en moldes de 5 cm por lado. Ambas bases de los cubos tuvieron que ser perfectamente paralelos. Se dejaron secar a temperatura ambiente de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Las pruebas se llevaron a cabo con un equipo **MULTIENSAYO** (Electromechanical Universal Testing Machine). En donde la base es fija, para evitar la distribución no uniforme de los esfuerzos sobre la muestra. Las fuerzas que se aplican al cubo van en aumento a partir de un régimen preestablecido, hasta que se rompe, estos esfuerzos de rotura quedarán anotados en los indicadores de la prensa.

La fractura varía de acuerdo con las propiedades mecánicas del material y está influida por el tipo de esfuerzo aplicado, la geometría de la muestra y la velocidad de deformación. En los materiales de ingeniería, existen dos tipos generales de fractura: dúctil y frágil. La fractura frágil ocurre por una propagación rápida de la fisura (grieta) después de poca o ninguna deformación plástica. La fractura dúctil se produce después de una deformación plástica extensa [81].

Por las características de las muestras la falla a presentar es por aplastamiento. Durante las pruebas de compresión se obtuvieron los resultados mostrados en las siguientes tablas.

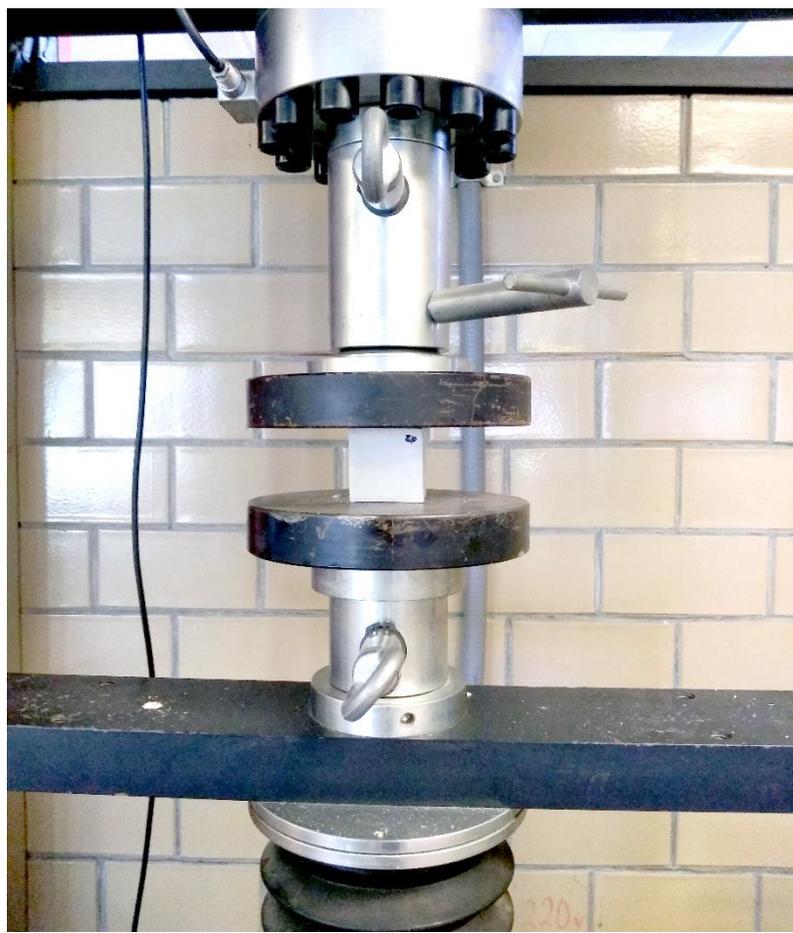


Figura 3-25 prueba de compresión. Fuente: foto del autor.

Ensayo 1

Número	Ensayo 1	Área de muestra inicial	20.25	cm ²
Ensayo	Compresión	Longitud inicial	45.00	mm
Norma	EN-196-1	Volumen inicial	911.25	mm ³
Sensibilidad	25%	Velocidad en posición	10.00	mm/min
Material	Arcilla con aditivo	Velocidad en fuerza	240.00	kg/seg
Días de fraguado	28	Intervalo de muestreo	1.00	seg
Número de datos	17	Fuerza máxima	87.25	Kg/cm ²

Tabla 3-11 Datos de ensayo 1 a compresión. Fuente: elaboración propia.

Fuerza Ton	Posición mm (deformación)	Deformación unitaria	kg/cm ²	Pascales	Megapascales (MPa)	Psi
0.03	0.00	0.00E+00	1.57	153,613.30	0.15	22.28
0.12	0.11	2.44E-03	5.93	581,909.66	0.58	84.40
0.34	0.29	6.44E-03	16.66	1,634,054.24	1.63	237.00
0.66	0.47	1.04E-02	32.61	3,198,275.45	3.20	463.87
0.93	0.63	1.40E-02	46.05	4,515,708.08	4.52	654.95
1.23	0.82	1.82E-02	60.62	5,944,912.30	5.94	862.24
1.43	0.97	2.16E-02	70.73	6,936,522.01	6.94	1,006.06
1.68	1.16	2.58E-02	83.12	8,151,578.05	8.15	1,182.29
1.77	1.29	2.87E-02	87.25	8,556,629.01	8.56	1,241.03
1.70	1.47	3.27E-02	83.93	8,230,709.24	8.23	1,193.76
1.58	1.62	3.60E-02	77.81	7,630,203.26	7.63	1,106.67
1.52	1.80	4.00E-02	75.05	7,360,169.29	7.36	1,067.50
1.46	1.99	4.42E-02	72.06	7,066,889.92	7.07	1,024.97
1.42	2.14	4.76E-02	70.07	6,871,338.05	6.87	996.60
1.39	2.29	5.09E-02	68.45	6,713,075.67	6.71	973.65
1.36	2.48	5.51E-02	67.03	6,573,409.60	6.57	953.39
1.35	2.61	5.80E-02	66.70	6,540,817.62	6.54	948.67

Tabla 3-12 Resultados de ensayo 1 a compresión. Fuente: elaboración propia.

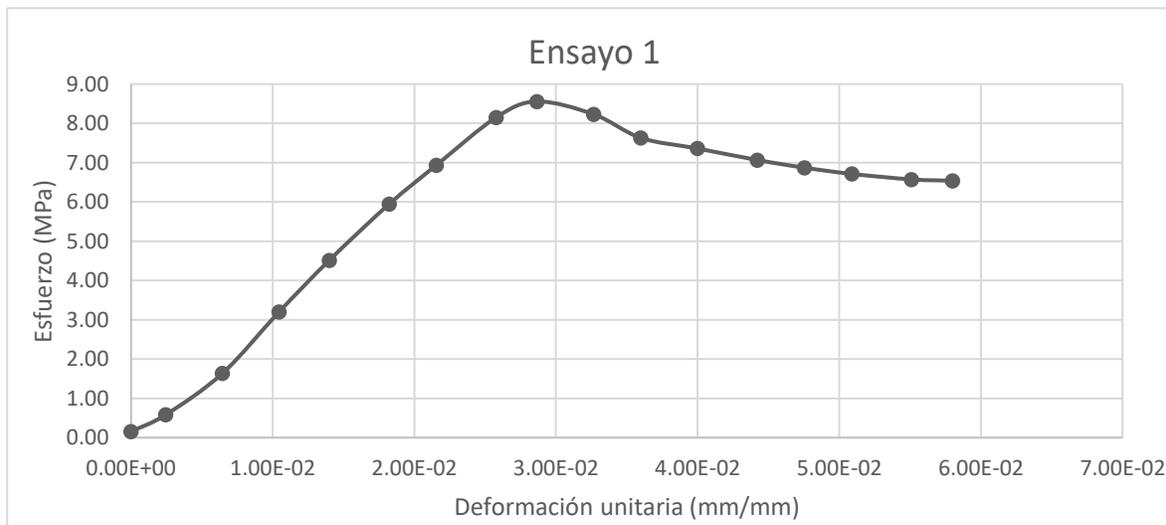


Figura 3-26 Resultados de ensayo 1 a compresión. Fuente: elaboración propia.

Ensayo 2

Número	Ensayo 2	Área de muestra inicial	20.25	mm ²
Ensayo	Compresión	Longitud inicial	45.00	mm
Norma de aplicación	EN-196-1	Volumen inicial	911.25	mm ³
Sensibilidad	25%	Velocidad en posición	10.00	mm/min
Material	Arcilla con aditivo	Velocidad en fuerza	240.00	kg/seg
Días de fraguado	28	Intervalo de muestreo	1.00	seg
Número de datos	15	Fuerza máxima	99.93	Kg/cm ²

Tabla 3-13 Datos de ensayo 2 a compresión. Fuente: elaboración propia.

Fuerza Ton	Posición mm (deformación)	Deformación unitaria	kg/cm ²	Pascales	Megapascuales (MPa)	Psi
0.03	0.00	0.00E+00	1.61	158,262.38	0.16	22.95
0.13	0.15	3.33E-03	6.27	614,501.64	0.61	89.13
0.27	0.31	6.89E-03	13.58	1,331,428.29	1.33	193.11
0.44	0.46	1.02E-02	21.79	2,136,832.71	2.14	309.92
0.64	0.69	1.53E-02	31.38	3,077,205.70	3.08	446.31
1.05	0.83	1.84E-02	52.03	5,102,315.25	5.10	740.03
1.39	1.00	2.22E-02	68.50	6,717,724.75	6.72	974.32
1.62	1.14	2.53E-02	79.80	7,825,706.70	7.83	1,135.02
1.84	1.34	2.98E-02	91.00	8,924,390.50	8.92	1,294.37
1.95	1.54	3.42E-02	96.18	9,431,818.04	9.43	1,367.97
2.02	1.68	3.73E-02	99.93	9,799,579.53	9.80	1,421.31
1.97	1.87	4.16E-02	97.51	9,562,185.95	9.56	1,386.88
1.84	2.03	4.51E-02	90.72	8,896,447.60	8.90	1,290.32
1.68	2.18	4.84E-02	82.74	8,114,336.99	8.11	1,176.88
1.54	2.32	5.16E-02	75.96	7,448,647.06	7.45	1,080.33

Tabla 3-14 Resultados de ensayo 2 a compresión. Fuente: elaboración propia.

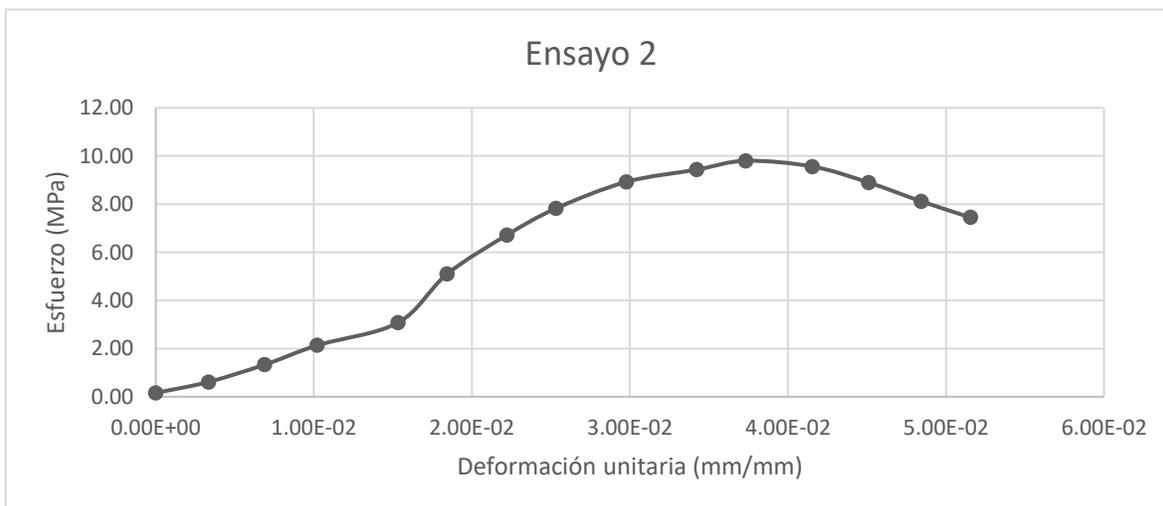


Figura 3-27 Resultados de ensayo 2 a compresión. Fuente: elaboración propia.

Ensayo 3

Número	Ensayo 3	Área de muestra inicial	20.25	cm ²
Ensayo	Compresión	Longitud inicial	45.00	mm
Norma de aplicación	EN-196-1	Volumen inicial	911.25	mm ³
Sensibilidad	25%	Velocidad en posición	10.00	mm/min
Material	Arcilla con aditivo	Velocidad en fuerza	240.00	kg/seg
Días de fraguado	28	Intervalo de muestreo	1.00	seg
Número de datos	11	Fuerza máxima	69.31	Kg/cm ²

Tabla 3-15 Datos de ensayo 3 a compresión. Fuente: elaboración propia.

Fuerza Ton	Posición mm (deformación)	Deformación unitaria	kg/cm ²	Pascales	Megapascales (MPa)	Psi
0.04	0.00	0.00E+00	1.95	190,854.36	0.19	27.68
0.12	0.14	3.11E-03	6.16	603,895.93	0.60	87.59
0.23	0.28	6.22E-03	11.49	1,126,626.69	1.13	163.40
0.42	0.46	1.02E-02	20.70	2,029,758.62	2.03	294.39
0.59	0.62	1.38E-02	28.96	2,839,812.13	2.84	411.88
0.86	0.82	1.82E-02	42.53	4,171,240.42	4.17	604.99
1.06	0.95	2.11E-02	52.50	5,148,854.46	5.15	746.78
1.28	1.11	2.47E-02	63.09	6,187,003.38	6.19	897.35
1.40	1.31	2.91E-02	69.31	6,796,855.94	6.80	985.80
1.39	1.45	3.22E-02	68.45	6,713,075.67	6.71	973.65
1.16	1.63	3.62E-02	57.11	5,600,444.64	5.60	812.28

Tabla 3-16 Resultados de ensayo 3 a compresión. Fuente: elaboración propia.

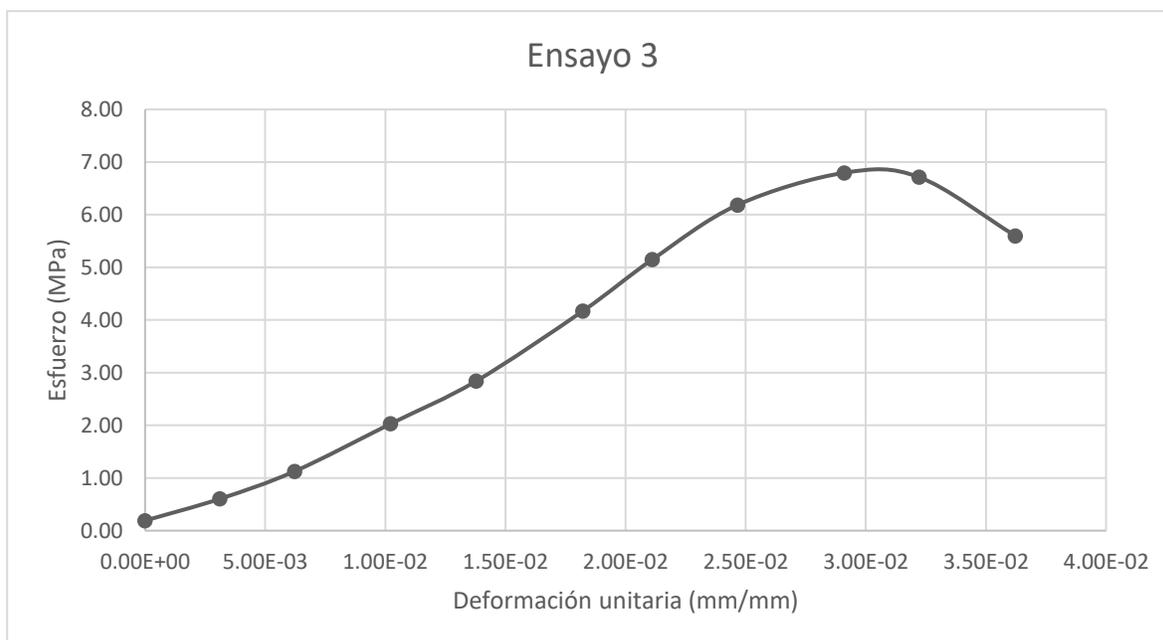


Figura 3-28 Resultados de ensayo 3 a compresión. Fuente: elaboración propia.

Ensayo 4

Número	Ensayo 4	Área de muestra inicial	20.25	cm ²
Ensayo	Compresión	Longitud inicial	45.00	mm
Norma de aplicación	EN-196-1	Volumen inicial	911.25	mm ³
Sensibilidad	25%	Velocidad en posición	10.00	mm/min
Material	Arcilla con aditivo	Velocidad en fuerza	240.00	kg/seg
Días de fraguado	28	Intervalo de muestreo	1.00	seg
Número de datos	13	Fuerza máxima	69.45	Kg/cm ²

Tabla 3-17 Datos de ensayo 4 a compresión. Fuente: elaboración propia

Fuerza Ton	Posición mm (deformación)	Deformación unitaria	kg/cm ²	Pascales	Megapascales (MPa)	Psi
0.04	0.00	0.00E+00	1.76	172,258.04	0.17	24.98
0.13	0.13	2.89E-03	6.65	651,887.98	0.65	94.55
0.21	0.32	7.11E-03	10.49	1,028,850.76	1.03	149.22
0.41	0.47	1.04E-02	20.13	1,973,872.83	1.97	286.29
0.66	0.65	1.44E-02	32.38	3,174,981.63	3.17	460.49
0.86	0.81	1.80E-02	42.68	4,185,187.65	4.19	607.01
1.12	0.96	2.13E-02	55.49	5,442,133.83	5.44	789.31
1.24	1.13	2.51E-02	61.14	5,996,149.02	6.00	869.67
1.41	1.27	2.82E-02	69.45	6,810,851.60	6.81	987.83
1.38	1.45	3.22E-02	68.31	6,699,128.43	6.70	971.63
1.35	1.59	3.53E-02	66.51	6,522,221.31	6.52	945.97
1.27	1.78	3.96E-02	62.95	6,173,056.14	6.17	895.33
1.14	1.94	4.31E-02	56.54	5,544,558.84	5.54	804.17

Tabla 3-18 Resultados de ensayo 4 a compresión. Fuente: elaboración propia.

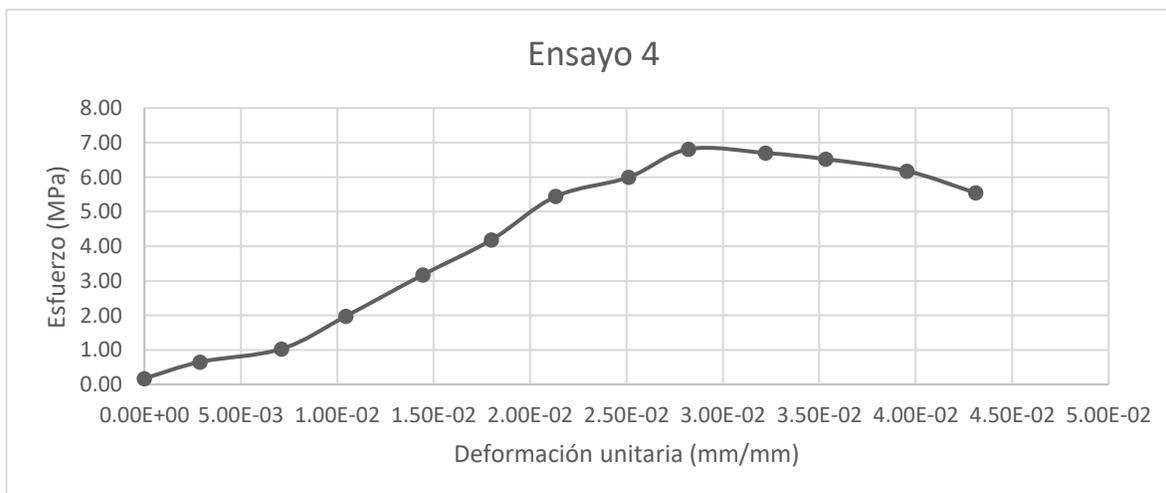


Figura 3-29 Resultados de ensayo 4 a compresión. Fuente: elaboración propia.

Ensayo 5

Número	Ensayo 5	Área de muestra inicial	20.25	cm ²
Ensayo	Compresión	Longitud inicial	45.00	mm
Norma de aplicación	EN-196-1	Volumen inicial	911.25	mm ³
Sensibilidad	25%	Velocidad en posición	10.00	mm/min
Material	Arcilla con aditivo	Velocidad en fuerza	240.00	kg/seg
Días de fraguado	28	Intervalo de muestreo	1.00	seg
Número de datos	17	Fuerza máxima	73.44	Kg/cm ²

Tabla 3-19 Datos de ensayo 5 a compresión. Fuente: elaboración propia

Fuerza Ton	Posición mm (deformación)	Deformación unitaria	kg/cm ²	Pascales	Megapascales (MPa)	Psi
0.03	0.00	0.00E+00	1.42	139,666.07	0.14	20.26
0.11	0.13	2.89E-03	5.46	535,370.45	0.54	77.65
0.19	0.28	6.22E-03	9.21	903,131.93	0.90	130.99
0.43	0.46	1.02E-02	21.41	2,099,591.66	2.10	304.52
0.68	0.65	1.44E-02	33.61	3,296,002.96	3.30	478.04
0.88	0.79	1.76E-02	43.53	4,269,016.35	4.27	619.17
1.07	0.94	2.09E-02	52.88	5,186,095.52	5.19	752.18
1.21	1.17	2.60E-02	59.81	5,865,781.11	5.87	850.76
1.37	1.31	2.91E-02	67.88	6,657,189.87	6.66	965.54
1.41	1.50	3.33E-02	69.59	6,824,798.84	6.82	989.85
1.46	1.65	3.67E-02	72.20	7,080,837.15	7.08	1,026.99
1.49	1.83	4.07E-02	73.44	7,201,906.90	7.20	1,044.55
1.48	1.97	4.38E-02	73.06	7,164,665.85	7.16	1,039.15
1.44	2.15	4.78E-02	71.26	6,987,758.72	6.99	1,013.49
1.38	2.31	5.13E-02	68.12	6,680,483.69	6.68	968.92
1.25	2.49	5.53E-02	61.86	6,065,982.05	6.07	879.80
1.17	2.62	5.82E-02	57.96	5,684,224.91	5.68	824.43

Tabla 3-20 Resultados de ensayo 5 a compresión. Fuente: elaboración propia.

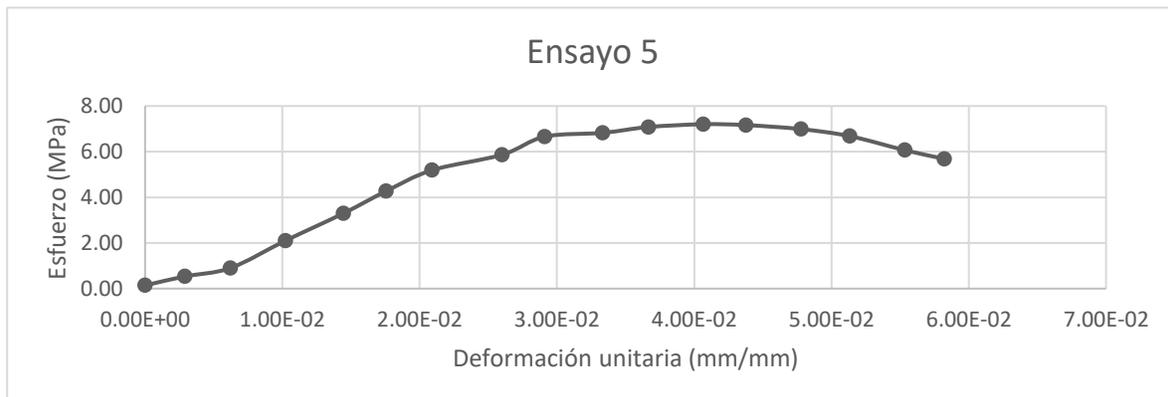


Figura 3-30 Resultados de ensayo 5 a compresión. Fuente: elaboración propia.

Se presenta el resumen de las gráficas.

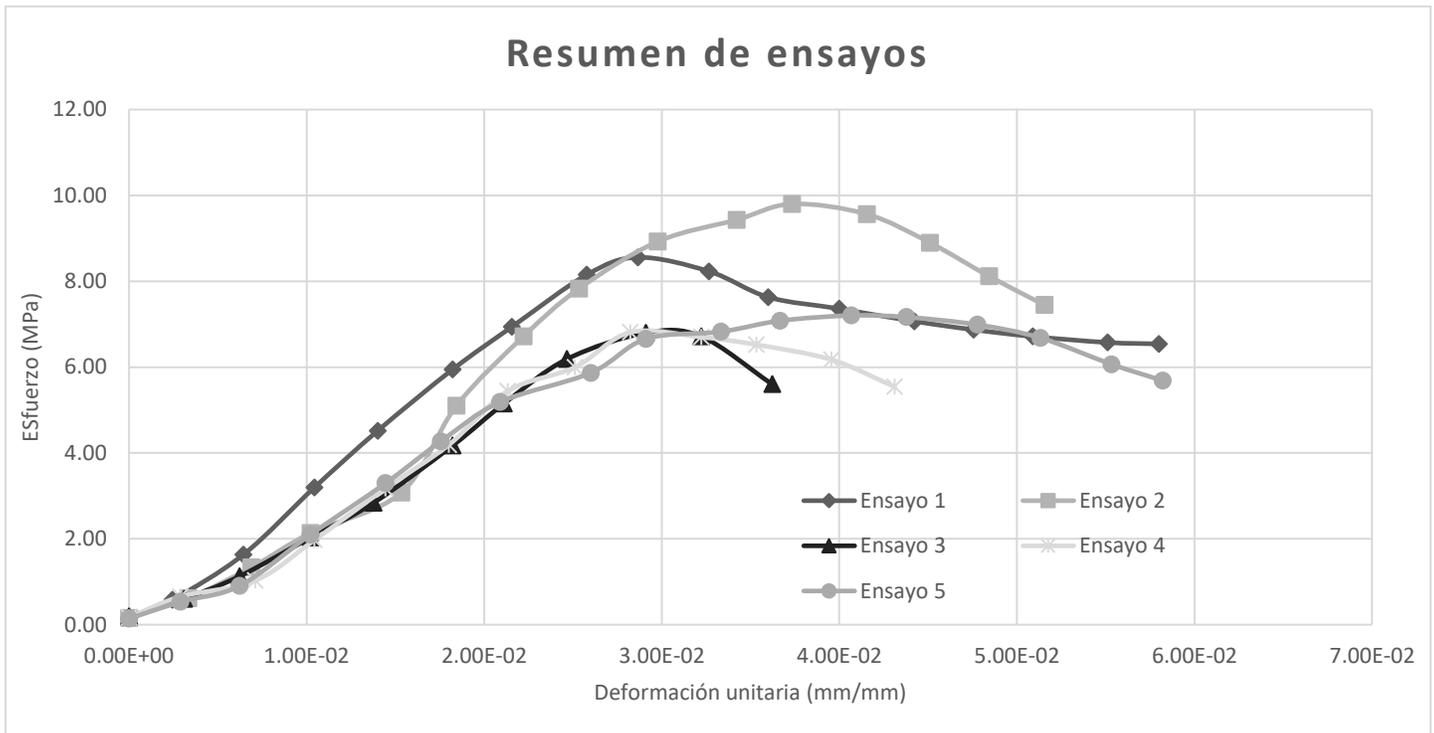


Tabla 3-21 Resumen de gráficas, pruebas de compresión. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en el resumen de gráficas que las resistencias alcanzan un promedio de 74.68 kg/cm^2 (7.3236 MPa).

Considerando la “norma mexicana nmx-c-404-onncce-2005 piezas para uso estructural” [82]. Se concluye que es posible utilizar este material para la fabricación de piezas ornamentales y divisorias, pero también como material para elaboración de elementos estructurales como bloques o tabiques, ya que el mínimo en tabique macizo de arcilla artesanal es de 60 kg/cm^2 .

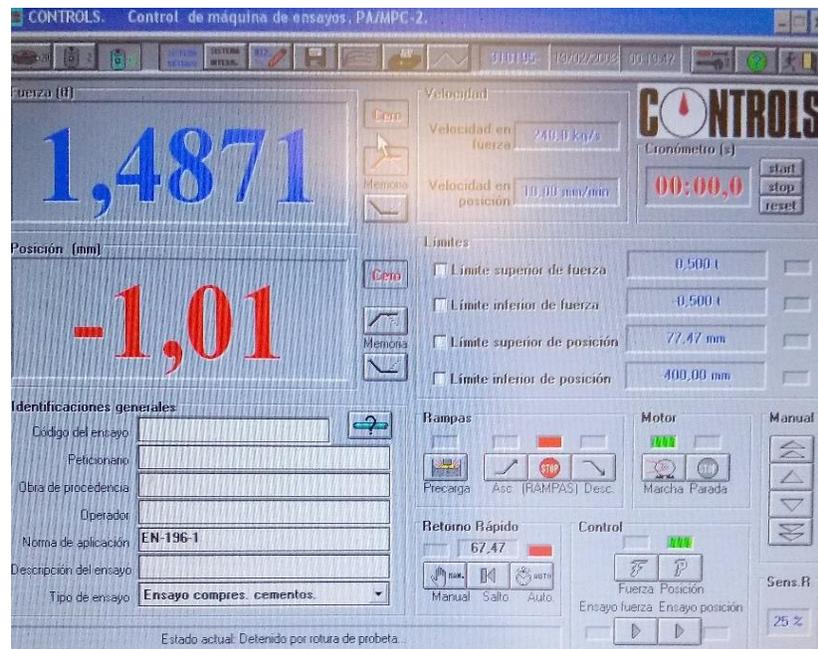


Figura 3-31 Área de trabajo, Software de equipo de compresión. Fuente: foto del autor.

Prueba Vicat

La prueba Vicat mide la resistencia que ejerce una pasta a lo largo del tiempo, a la penetración de una aguja metálica, de forma cilíndrica, con una sección de 1 mm^2 y una masa de $300 \pm 5 \text{ g}$. [83] y se deja que penetre en la pasta por su propio peso durante un lapso de 30 segundos; esto para determinar el tiempo de fraguado inicial y final de la muestra por medio de la aguja de Vicat.

La primera lectura se realiza 30 minutos después de ser moldeada la mezcla sin ser alterada y luego se realizan lecturas a intervalos de 15 minutos hasta que se obtenga una penetración de 25 mm o menor y será el tiempo de fraguado inicial.

Posteriormente se realizan penetraciones hasta determinar el primer instante en el cual la aguja penetre 0.5 mm o menos, y se registra como el tiempo de fraguado final. El tiempo transcurrido desde el principio hasta el final es la duración del fraguado.

Se debe mantener una distancia de al menos 6 mm con respecto a una penetración previa y al menos de 10 mm del borde del molde.

Para el presente proceso se fabricó una pieza de acuerdo a la norma M.MMP.2.02.006/04 [84], al “Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle” [85] y al “Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle” [86] Con la cual se siguió lo establecido anteriormente.

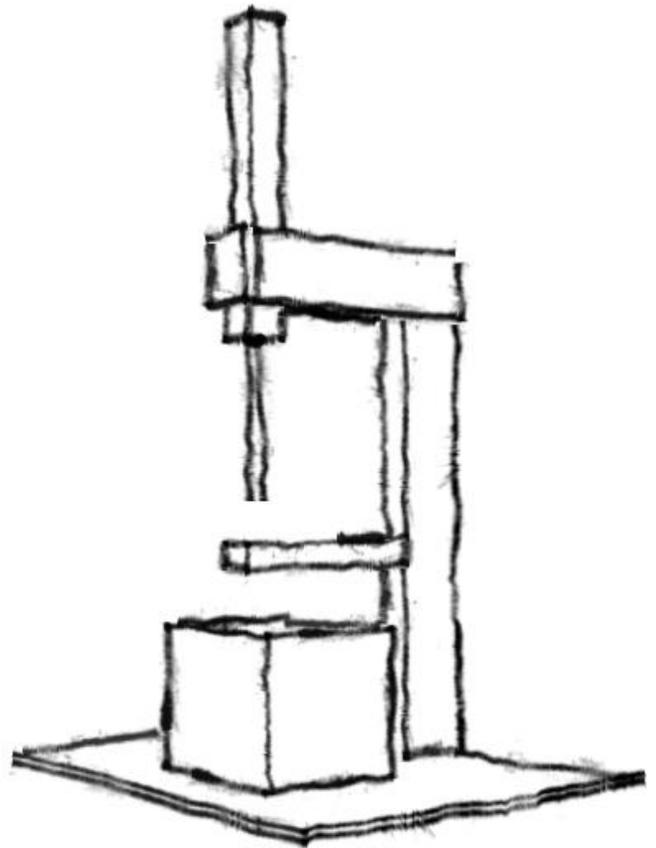


Figura 3-32 Boceto de diseño aparato tipo Vicat. Fuente: elaboración propia.

Los datos obtenidos arrojan los siguientes resultados.

Número de lectura	Tiempo (minutos)	Penetración (mm)
1	30	15
2	45	11
3	60	6
4	75	3.5
5	90	3
6	105	2.5
7	120	2
8	135	2
9	150	2
10	165	2
11	180	2
12	195	1.5
13	210	1.5
14	225	1
15	240	1
16	255	0.8
17	270	0.8
18	285	0.8
19	300	0.5
20	315	0.04
21	330	0.04
22	345	0.02
23	360	0.02
24	375	0.02

Tabla 3-22 Resultados de prueba Vicat. Fuente: elaboración propia.



Figura 3-34 Ensayo de prueba Vicat. Fuente: foto del autor.

El tiempo de fraguado inicial registrado fue de 105 minutos y el tiempo de fraguado final fue de 300 minutos.

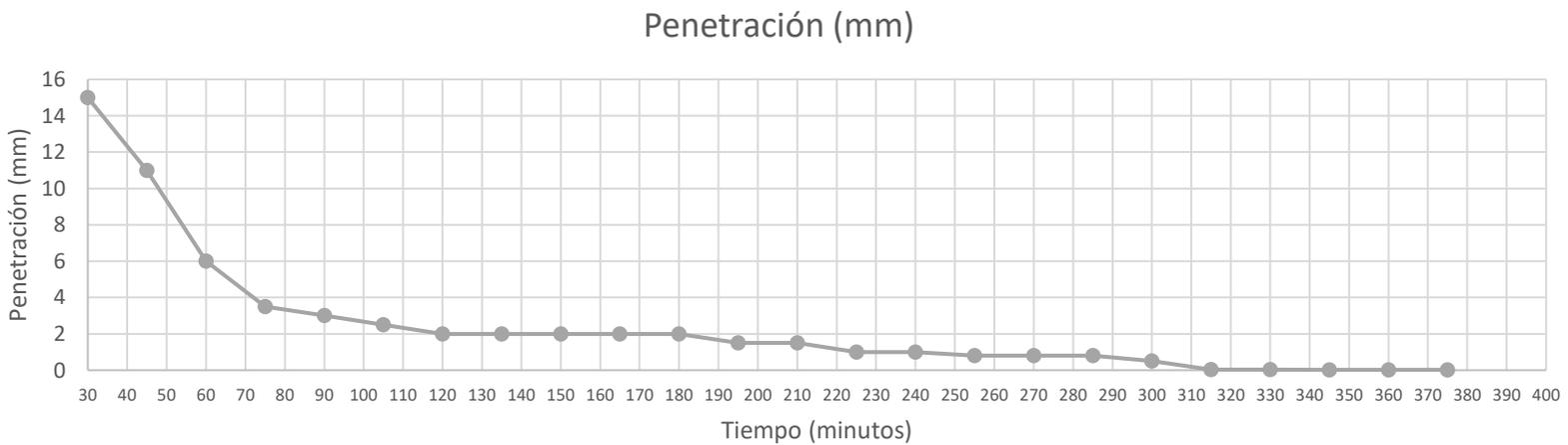


Figura 3-33 Resultados de prueba Vicat. Fuente: elaboración propia.

Prueba de pH

Las características de muchos compuestos están relacionadas directamente con sus propiedades ácidas o alcalinas.

pH es la forma en que se expresa la acidez o alcalinidad de una sustancia a partir de su concentración molar de protones o potencial de hidrógeno, la medición está dada en una escala que va desde 0 hasta 14, correspondiendo los valores menores de 7 a la acidez y los mayores de 7 a la alcalinidad de la sustancia en cuestión, siendo en este caso el 7 un valor que corresponde a un pH neutro.

Para determinar su acidez o alcalinidad en la mezcla, se hace uso un medidor de pH. La prueba se obtuvo colocando las tiras de prueba pH-Fix 0-14 en la mezcla fresca inmediatamente después del mezclado, obteniéndose un pH de 6. Lo que lo clasifica en una mezcla levemente ácida, esto beneficia en la polimerización y en la identificación de posibles microorganismos.

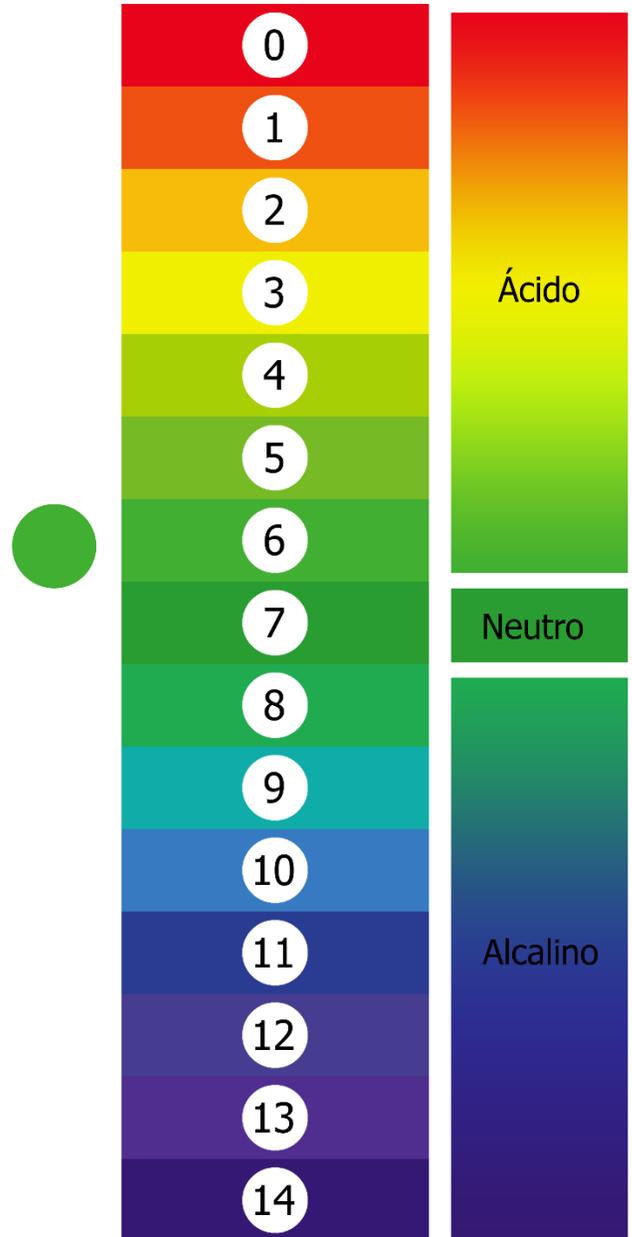


Figura 3-35 Grado de pH obtenido en la mezcla. Fuente: elaboración propia.

Prueba de absorción total

La prueba de absorción total tiene por objetivo comprobar el grado de absorción que sufren las pruebas después de 24 horas.

Para esta prueba se utilizó la norma NMX-C-037-ONNCE-2013 [87] y la ASTM-Designation-C642, (Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete) [88], adaptadas para ser utilizadas con el material propuesto. Se utilizaron cubos de 5 cm por lado, los cubos fueron colocados en un recipiente con seis litros de agua, y cada cubo fue sumergido por 24 horas de acuerdo con las normas.

El porcentaje de absorción total de agua fue de 20.26% cumpliendo con lo establecido en la norma NMX-C-037-ONNCE-2013 [87], la cual establece un 23% para piezas de arcilla artesanal.

La fórmula para seguir fue la siguiente:

$$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_{sss} - M_a} \times 1000$$

A = volumen de agua absorbida referido al volumen aparente del espécimen en dm^3/m^3 .

M_s = masa seca del espécimen en g

M_{sss} = masa saturada y superficialmente seca en g.

M_a = masa del espécimen sumergido en agua en g.

El factor 1000 se usa para presentar el resultado en dm^3/m^3 (equivale a litros por m^3).

$$A = \frac{190.00 - 167.30}{190.00 - 78.00} \times 100 = 20.26\%$$

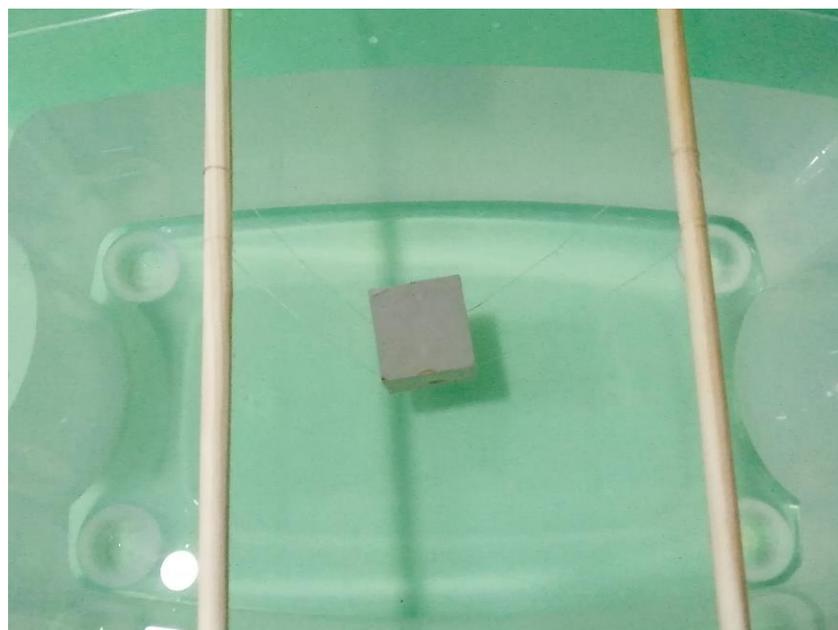
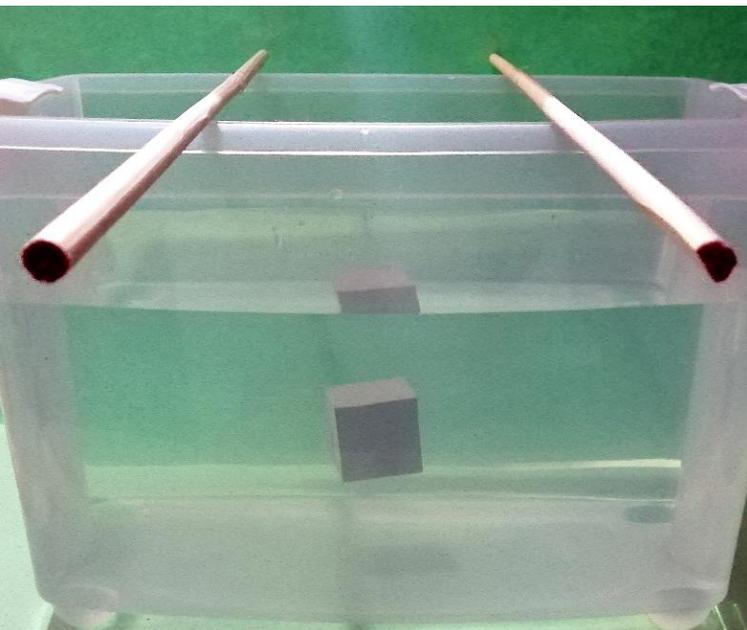


Figura 3-36 Ensayo de absorción total. Fuente: foto del autor

Prueba de absorción inicial (capilaridad)

La prueba de absorción inicial o por capilaridad tiene por objetivo definir el grado de capilaridad que sufren las pruebas después de 10 minutos.

Para esta prueba se utilizó la norma NMX-C-037-ONNCE-2013 [87] y la ASTM-Designation-C1585, (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes) [89], adaptadas para el presente material. Se utilizaron cubos de 5 cm por lado, los cubos fueron colocados en unas bases y estas sobre una charola con agua, de tal manera que el agua sobrepase 5 mm la superficie inferior de la muestra. Las características son precisadas en dichas normas.

El grado de absorción inicial de agua fue de 2.81 g/cm²min^{0.5}

La fórmula para seguir fue la siguiente:

$$Cb = \frac{100M}{S\sqrt{t}} = \frac{100(M_1 - M_s)}{S\sqrt{10}}$$

C_b = coeficiente de absorción inicial en g/(cm² × min^{0,5})

M = masa del agua absorbida por el bloque durante el ensayo en g ($M = M_1 - M_s$)

M_1 = masa húmeda en g.

M_s = masa seca en g

S = superficie de la cara sumergida en cm²

t = tiempo de inmersión en min ($t=10$ min)

$$Cb = \frac{100(170.30 - 168.50)}{20.25\sqrt{10}} = 2.81$$

Figura 3-37 Ensayo de absorción inicial. Fuente: foto del autor.



3.5 Evaluación de Impacto Ambiental

Se ha llevado a cabo un procedimiento técnico y teórico mediante la *Metodología para el Desarrollo de Materiales Constructivos de Bajo Impacto Ambiental* en México, esta metodología es resultado de un proyecto Doctoral propuesto por Arellano [52] para identificar, evaluar y medir los impactos ambientales que produce un material. El objetivo es aplicar la metodología al material propuesto en este documento y compararlo con el tabique artesanal.

La evaluación de impacto ambiental fue respaldada con el Software OpenLCA, (software para Análisis del Ciclo de Vida) en colaboración con el departamento de ingeniería civil, química y ambiente de la Universidad de Génova, Italia (Universita degli Studi di Genova). Dicho programa de análisis de datos ha sido empleado en otros proyectos de investigación como el de Arellano [52] y el de Islas [90].

Para este proceso se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La arcilla Old Mine #4 resultó excelente en los procesos de experimentación dado a su caracterización y control, lo cual permitió conocer exactamente las características de cada elemento auxiliar, y estudiar los resultados de las pruebas sin alteraciones o variables.

Sin embargo, el desarrollo de la Evaluación de Impacto Ambiental en el material propuesto se calculó con la proyección a ser utilizada con arcillas locales, ya que la utilización de arcilla Old Mine #4 en construcciones localizadas fuera su lugar de extracción (Estado de Tennessee, Estados Unidos) generaría grandes incrementos en los índices de sustentabilidad, debido factores como traslados y almacenaje.

Por otro lado, en la aplicación diaria y práctica es claro que se manipulará arcilla de la región, y para beneficio de la investigación se realizó una comparación con resultados muy cercanos entre la composición química de la arcilla utilizada en el capítulo 3 (Old Mine #4) y otras arcillas localizadas en diferentes zonas de México como Guanajuato y en territorios extranjeros como Perú y Bolivia. La caracterización obtenida se muestra en la siguiente tabla [91] [92] [93] [94].

Referencia	Ficha Técnica Koprino, S.A. de C.V.	Ticona [94]	Tuesta [93]	Lazo [92]	Ramos [91]	
Arcillas / Componentes	Old Mine #4	Bolivia	Perú	Perú	Cerámica comercial	Victoria, Guanajuato
SiO ₂ (%)	59.70	62.15	67.83	60.70	48.00 a 60.00	60.50
Al ₂ O ₃ (%)	26.30	18.33	12.58	10.80	12.00 a 30.00	27.00
Fe ₂ O ₃ (%)	1.30	9.15	11.28	0.57	0.30 a 1.00	1.50
TiO ₂ (%)	2.00	0.47		0.10		
K ₂ O (%)	1.10	0.99	1.32	0.08	0.30 a 1.00	3.50
Na ₂ O (%)	0.20	4.66		0.98	0.10 a 0.30	0.10
CaO (%)	0.20	0.59	1.82	1.00	0.3 a 9.50	0.10
MgO (%)	0.50	3.55	2.27	0.44	0.6 a 13.00	1.50

Tabla 3-23 Comparativa de arcillas. Fuente: elaboración propia, basada en diversas publicaciones [91] [92] [93] [94].

2. El cálculo se llevó a cabo utilizando el indicador *Cumulative Energy Demand* [95], el cual ayuda a calcular la energía, clasificándola en energía renovable y energía no renovable, colocándola en las siguientes categorías:

Fósil
Nuclear
Bosque primario
Biomasa
Geotérmica
Solar
Agua
Viento

Tabla 3-24 Categorías del Indicador *Cumulative Energy Demand* [95].

3. El análisis se efectuó considerando la etapa A1 y la A3 del análisis de ciclo de vida, según la nomenclatura incluida en las normas ISO 14040 [96] e ISO 14044 [97], que incluyen la energía consumida en el procesamiento de extracción de los materiales y en la elaboración del producto.

La tabla 3-25 muestra en resumen los resultados de la comparativa descrita anteriormente considerando la elaboración de 1 tonelada de producto.

Los resultados reflejan una reducción del 94 % en el uso de combustibles fósiles gracias a que no requiere llevar el material a la quema para lograr un sinterizado. Así mismo se presentó una disminución del 78% en los recursos nucleares no renovables y una disminución del 59% en biomasa renovable.

Se registró un ligero aumento en el uso de energías renovables como la geotérmica y el agua, reportando un 14% y 3% respectivamente; lo cual no representa un impacto ambiental gravoso, además de tomar en consideración que son energías renovables. La tabla 3-25 muestra una comparativa en el consumo energético de materiales considerando etapa A1 y A3 de lo establecido en la Norma ISO 14040 mediante el indicador *Cumulative exergy demand* [95].

La Figura 3-38 muestra una gráfica con el consumo energético del tabique artesanal y el tabique propuesto en el trabajo de investigación durante la etapa A1 y A3. La figura 3-39 muestra el porcentaje de consumo energético del material propuesto en relación con el tabique artesanal en dichas etapas, considerando los aspectos del indicador *Cumulative Energy Demand*.

Finalmente se afirma que la etapa A1 y A3 son claves en el ciclo de vida, considerando que con estos datos es posible garantizar una reducción en el impacto ambiental del material propuesto en esta investigación doctoral.

Categoría de Impacto	Unidad	Tabique artesanal	Tabique con material propuesto en Tesis	% de Diferencia
		Resultado	Resultado	
Recursos no renovables - fósiles	MJ	6696.588177	401.8988412	-94
Recursos no renovables - nuclear	MJ	109.9305764	23.72099088	-78
Recursos no renovables - bosques primarios	MJ	0.00897859	0.000141417	-98
Recursos renovables - biomasa	MJ	4.329747497	1.796184222	-59
Recursos renovables - geotérmicos	MJ	8.6688	9.8788608	14
Recursos renovables - sol	MJ	0.028818973	0.004642153	-84
Recursos renovables - agua	MJ	108.4344026	111.4409555	3
Recursos renovables - viento	MJ	6.344112808	5.259622991	-17

Tabla 3-25 Comparativa en el consumo energético de materiales considerando etapa A1 y A3 de lo establecido en la Norma ISO 14040, mediante el indicador *Cumulative exergy demand* [95].

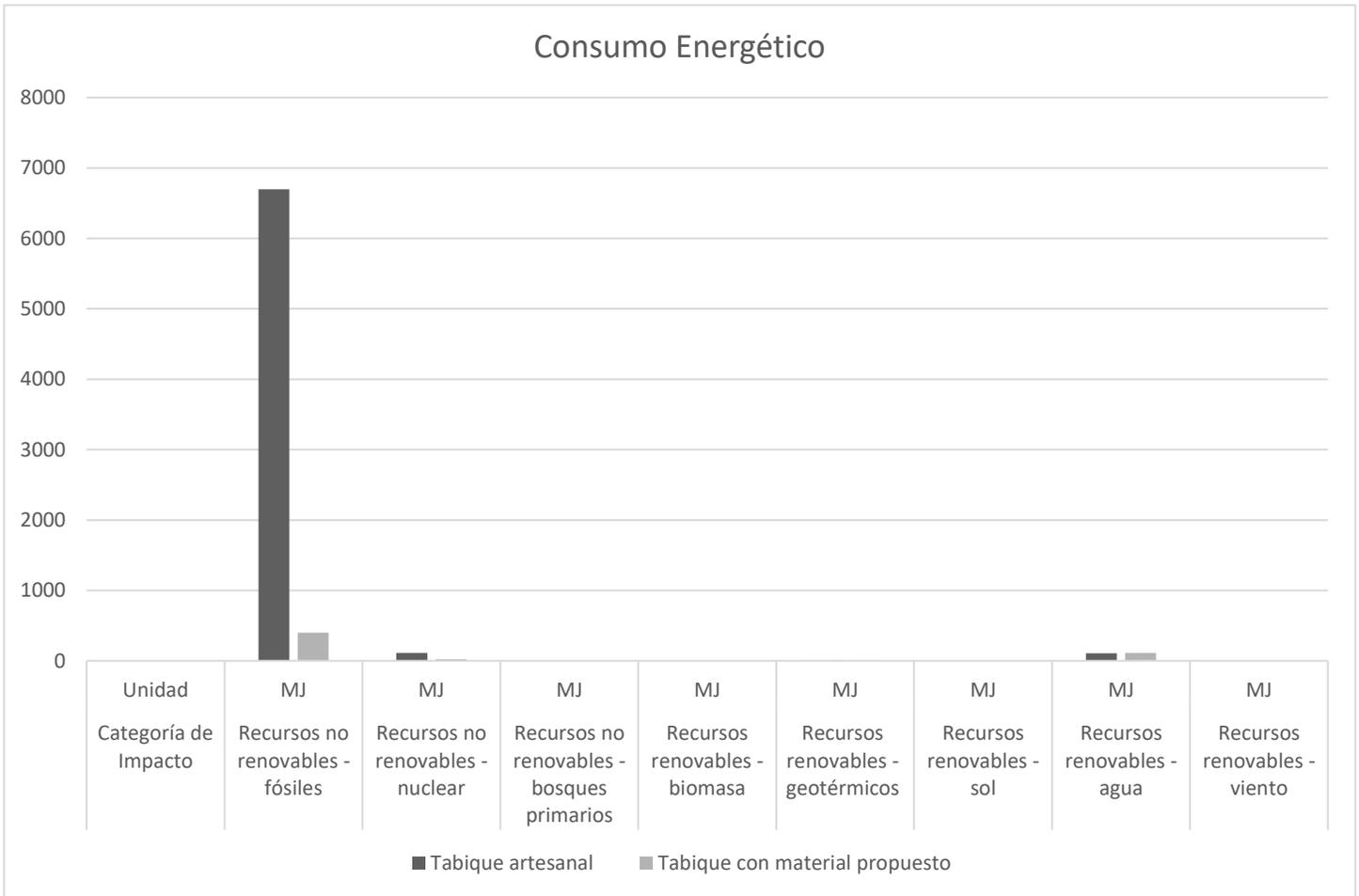


Figura 3-38 consumo energético del tabique artesanal y el tabique propuesto en el trabajo de investigación durante la etapa A1 y A3.

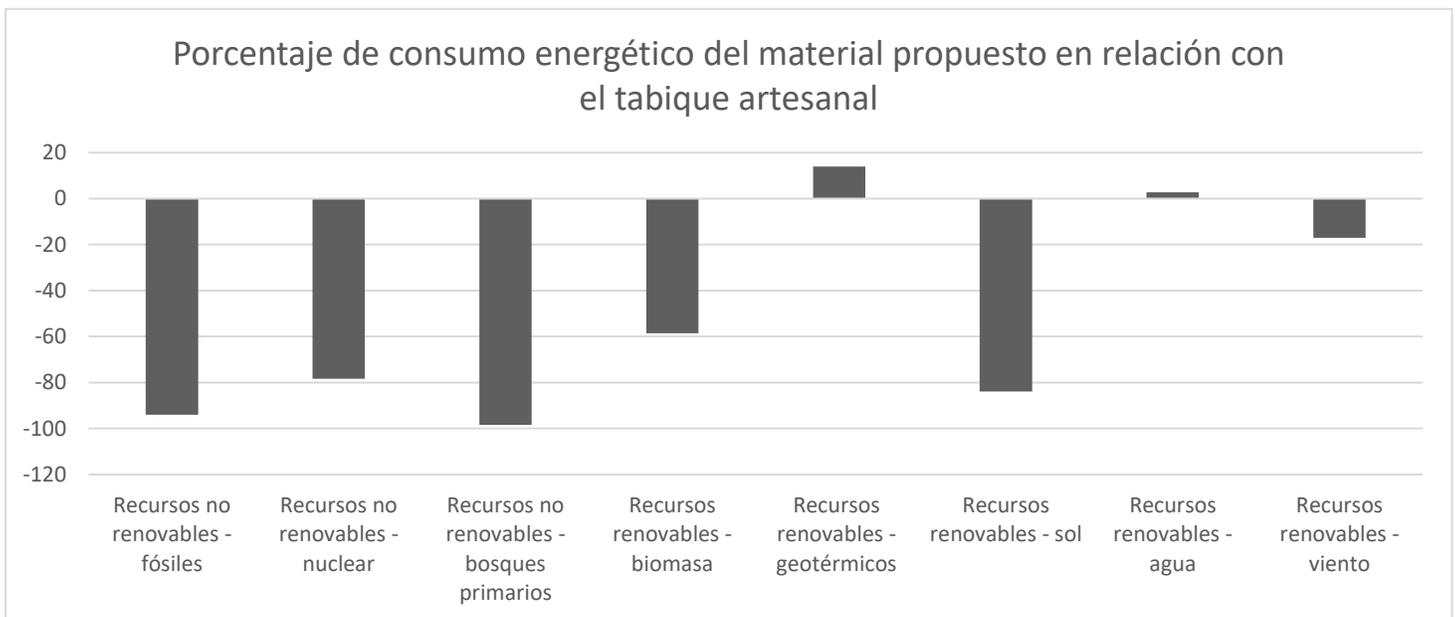


Figura 3-39 Porcentaje de consumo energético del material propuesto en relación con el tabique artesanal.

Capítulo 4

Anexos

4.1 Propuestas de aplicación



Figura 0-1 propuestas de aplicación. Fuente: elaboración propia

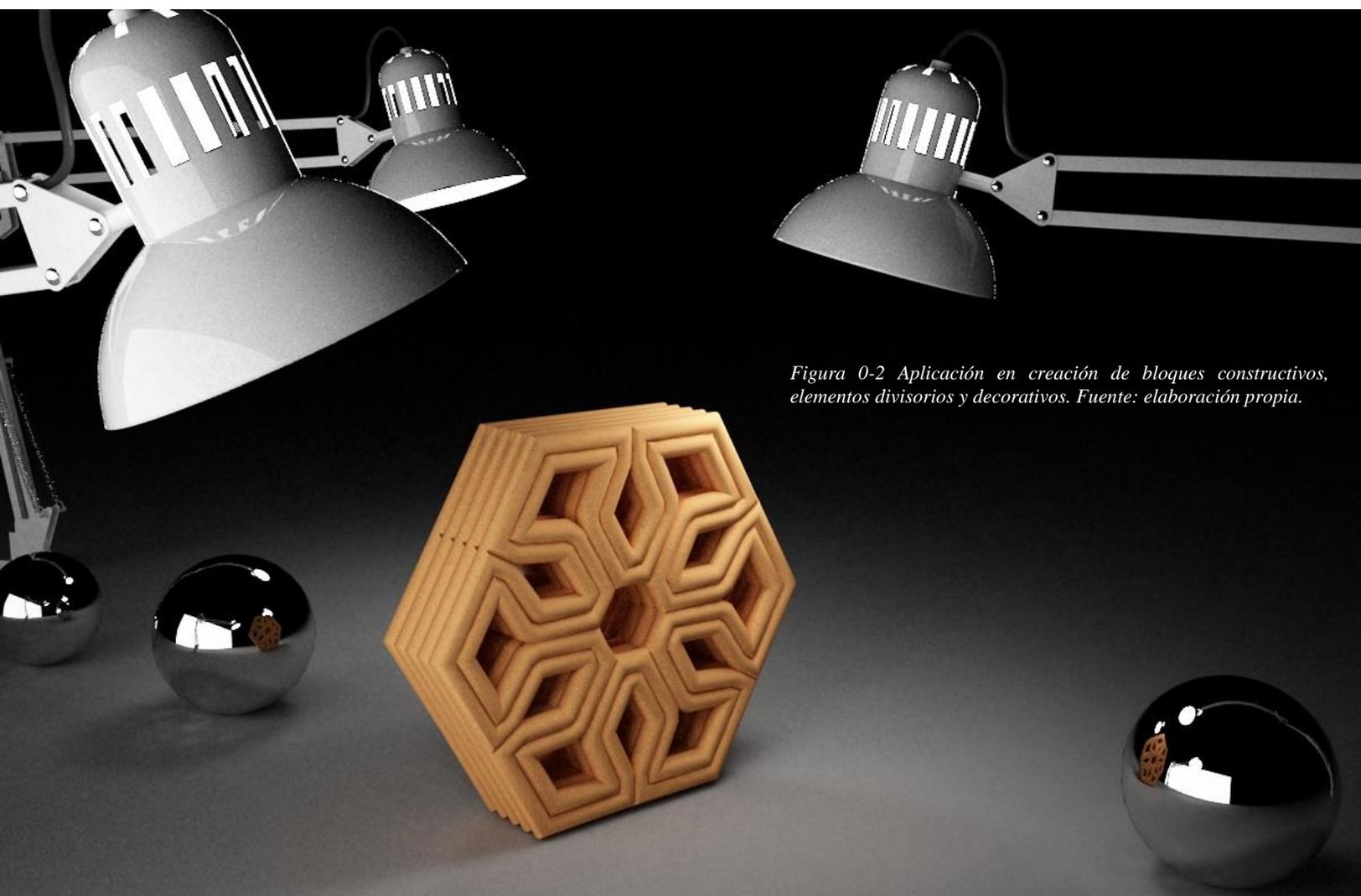
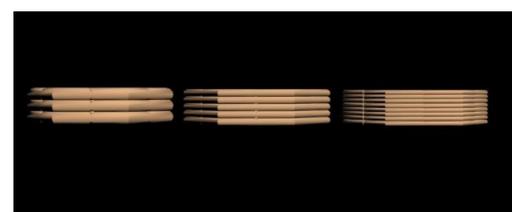
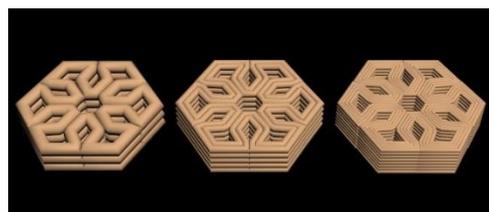
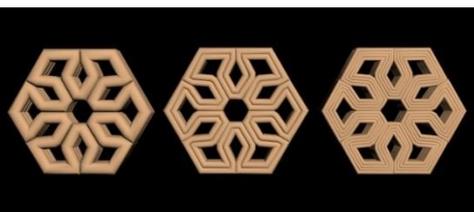
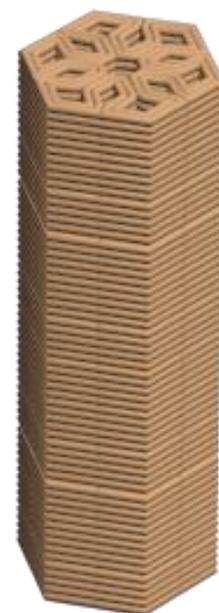
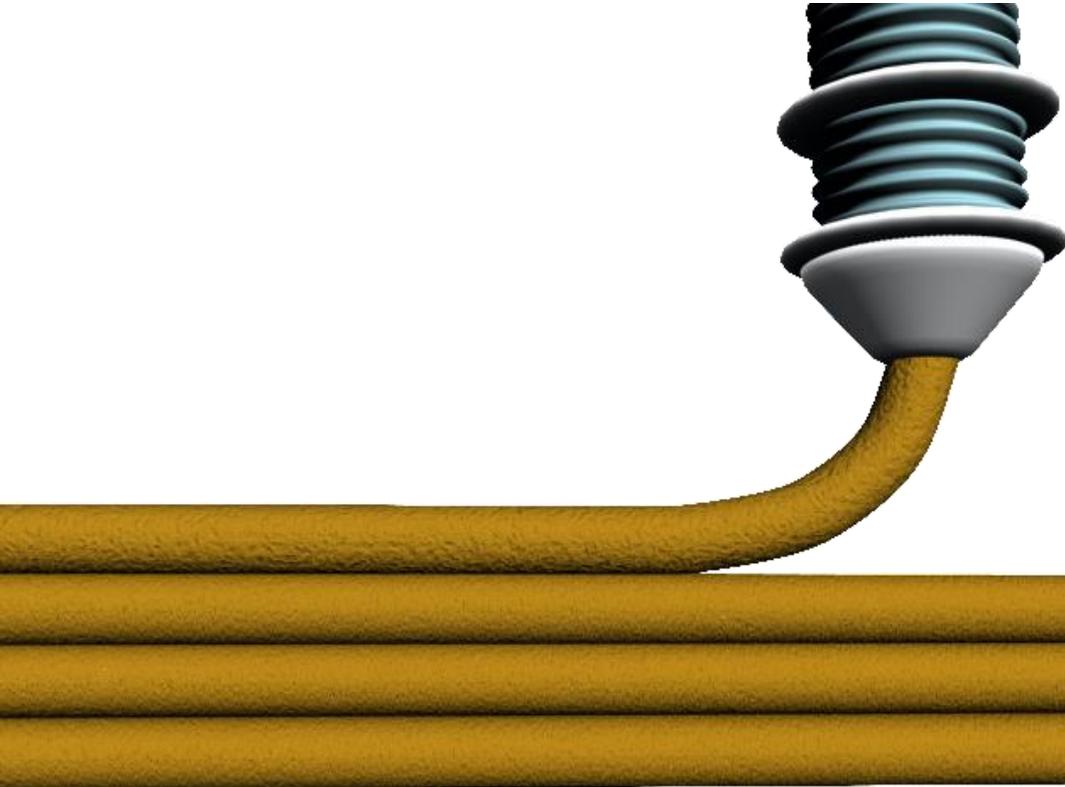


Figura 0-2 Aplicación en creación de bloques constructivos, elementos divisorios y decorativos. Fuente: elaboración propia.

Figura 0-3 Representación de recámara con bloques de arcilla en piso y muros. Fuente: elaboración propia.



Figura 0-4 Representación de salón con bloques de arcilla como celosía. Fuente: elaboración propia.





Figura 0-6 Representación de domo geodésico fabricado con arcilla extruida. Fuente: elaboración propia.

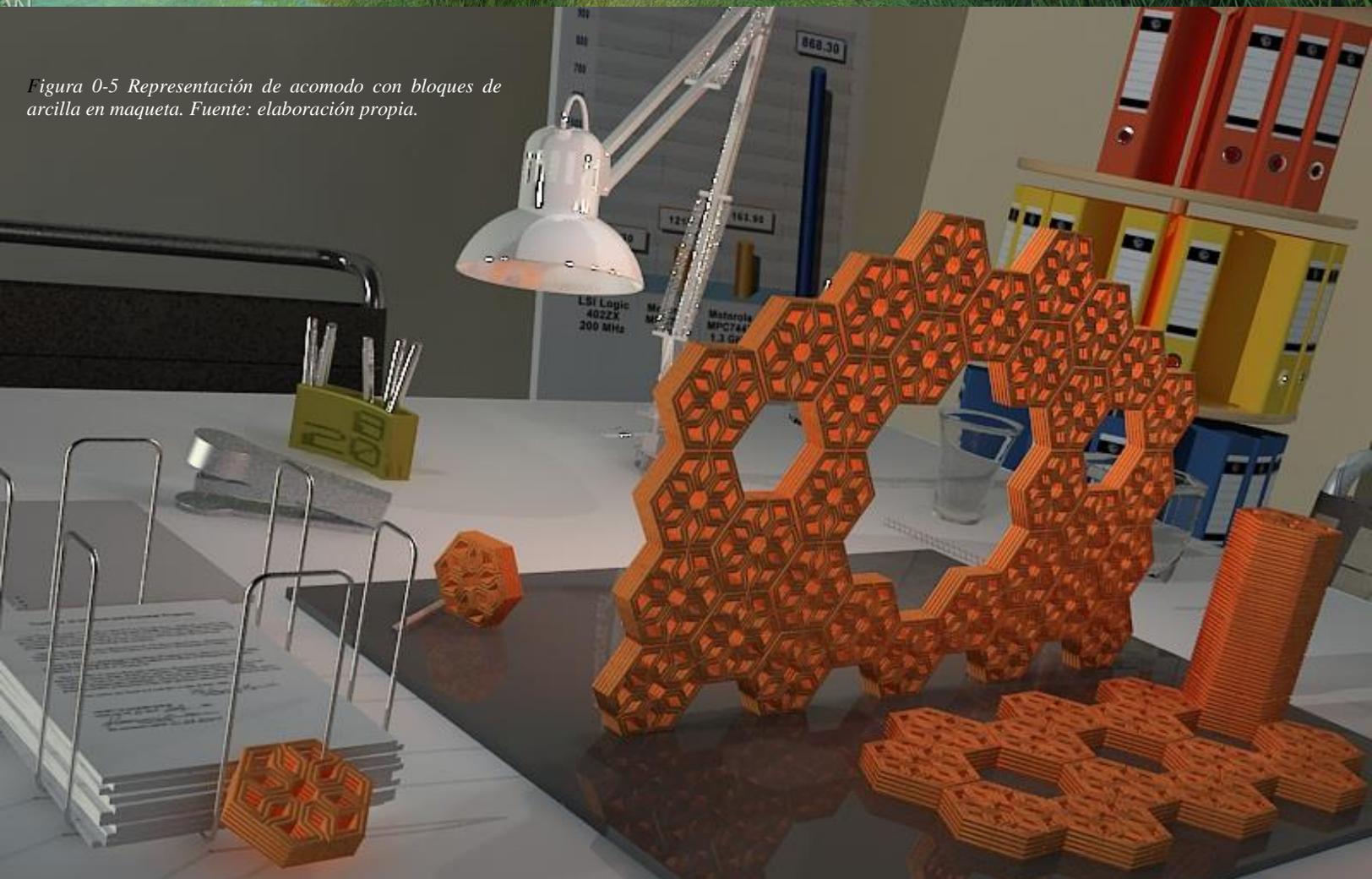


Figura 0-5 Representación de acomodo con bloques de arcilla en maqueta. Fuente: elaboración propia.



Figura 0-7 Representación de vivienda con arcilla estructural en muro 2. Fuente: elaboración propia.



Figura 0-8 Representación de vivienda con arcilla estructural en muro. Fuente: elaboración propia.

4.2 Redes de trabajo

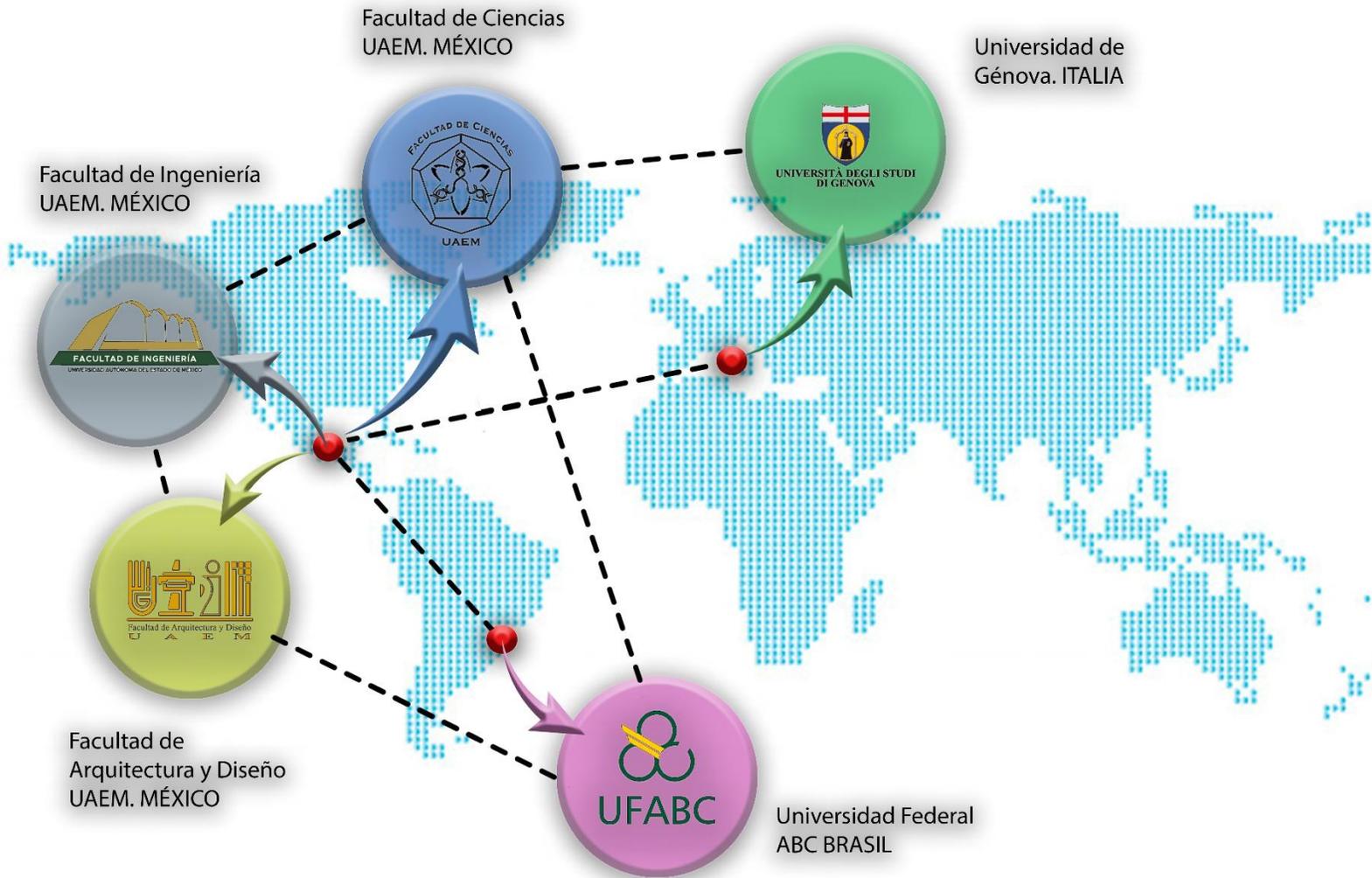


Figura 0-9 Redes de trabajo

Conclusiones

El objetivo principal de esta investigación se centró en diseñar una mezcla de arcilla caolinítica, polisacáridos de maíz, estabilizadores y otros compuestos para lograr una pasta aplicable en la elaboración de bloques constructivos, o incorporable a las nuevas tecnologías constructivas como la impresión 3D y 4D.

Para lograr este objetivo se trabajó en el capítulo 1 con la problemática a resolver, con los antecedentes generales y con la metodología utilizada. El capítulo 2 se encaminó a estudiar la arcilla, sus componentes y características, sus cualidades y ventajas, siendo un preámbulo para indagar en elementos idóneos que trabajasen en conjunto y permitieran los fines deseados. En el capítulo 3 se establecieron los componentes después de una rigurosa investigación documental y experimental en donde cada propuesta fue estudiada, caracterizada y probada en diferentes proporciones y procesos, descartando algunos materiales y agregando otros. La mezcla final, considerada exitosa, fue sometida a diversas pruebas entre las que destacan las mecánicas, de absorción y capilaridad, obteniendo resultados favorables, incluso para la aplicación del material como elemento estructural en bloques constructivos, alcanzando un promedio de 74.68 kg/cm² (7.3236 MPa) y con resistencia al agua.

Durante el tiempo de la investigación se logró colaborar con diferentes áreas del conocimiento y con distintas instituciones y cuerpos de investigación entre los que se encuentran investigadores de la Facultad de Ingeniería y la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), con grupos de investigación de alto reconocimiento como el Grupo de Investigación CNPp “Impresión y Biomimética” (4DB) del Centro de Ingeniería, Modelamiento y Ciencias Sociales Aplicadas de la Universidad Federal ABC (UFABC) en Sao Paulo, Brasil, en donde se me brindó el privilegio de ser miembro y realizar una estancia de investigación. Así mismo se trabajó en conjunto con integrantes del Departamento de Ingeniería Civil, Química y Ambiente de la Universidad de Génova, Italia.

Se generó el artículo “La musealización del patrimonio natural para su conservación, Museo “Luis Mario Schneider”, Malinalco, México” [98] publicado en la revista Legado de Arquitectura y Diseño y se está por concluir un artículo para su revisión y aprobación en la revista “Construction and Building Materials”

Dentro de las aportaciones de esta investigación se encuentra la obtención de una mezcla que puede ser utilizada en bloques constructivos de carácter estructural, ya que las pruebas mecánicas muestran una resistencia que alcanza un promedio de 74.68 kg/cm² (7.3236 MPa) siendo el mínimo requerido 60 kg/cm², de acuerdo con la Norma mexicana nmx-c-404-onnce-2005 piezas para uso estructural [82].

La mezcla presenta resistencia al agua siguiendo los estándares establecidos en la Norma mexicana nmx-c-037-onnce-2013 [87] y la ASTM-Designation-C642, (Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete) [88], y la ASTM-Designation-C1585, (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes) [89], todas adaptadas para el presente material.

Se obtuvieron estos objetivos sin la necesidad de procesos contaminantes como lo son la quema de arcilla para lograr un sinterizado o la inclusión de grandes cantidades de cemento, lo cual disminuye el impacto ambiental en comparación con otros procesos similares. Para comprobar dicha disminución se realizó un análisis de la etapa A1 y la A3 del análisis de ciclo de vida, según la nomenclatura incluida en las normas ISO 14040 [96] e ISO 14044 [97], que incluyen la energía consumida en el procesamiento de extracción de los materiales y en la elaboración, con el indicador *Cumulative exergy demand* [95].

Los resultados fueron comparados con los realizados en similitud de condiciones a un tabique artesanal llevado a la quema en horno. Se obtuvo una reducción del 94% en el uso de combustibles fósiles en el material propuesto en este documento, gracias a que no requiere llevar el material a la quema para lograr un sinterizado, se presentó una disminución del 78% en los recursos nucleares no renovables y una disminución del 59% en biomasa renovable; los aumentos energéticos se presentaron en menores porcentajes, 14% para energía geotérmica y 3% para agua.

Con los datos obtenidos se comprende que es posible disponer de un material para la elaboración de bloques constructivos que no requiera ser llevado a quema para lograr un sinterizado, lo cual resulta en una significativa disminución del impacto ambiental, en las primeras etapas del ciclo de vida. Por lo tanto, el resultado de este trabajo representa una alternativa sustentable en la elaboración de piezas constructivas, confirmando la hipótesis inicial.

Finalmente se establecen líneas futuras de investigación, plasmadas en los anexos, tales como la utilización del material propuesto en impresoras 3D a gran escala y la manipulación de la mezcla propuesta en consideraciones 4D.

Referencias

- [1] A. Esteva Loyola, *Estilos en la arquitectura*, primera ed., México: Hermon , 1993.
- [2] V. A. Galvañ Llopis y L. Palaia Perez, «Clasificación de materiales de construcción,» *Informes de la construcción*, vol. 36, nº 203, pp. 53-58, 1986.
- [3] G. Pons , *La tierra como material de construcción*, San Salvador, 2001.
- [4] S. Bestraten , E. Hormías y A. Altemir , «Construcción con tierra en el siglo XXI,» *Informes de la Construcción*, vol. 63, pp. 5-20, 2011.
- [5] A. A. M. Alaa A. Shakir, «Manufacturing of Bricks in the Past, in the Present and in the Future: A state of the Art Review,» *International Journal of Advances in Applied Sciences*, vol. 2, nº 3, pp. 145-156, 2013.
- [6] R. S. Roux Gutiérrez y M. Olivares Santiago, «Use of the adobe bricks stabilized with 6% portland cement and reinforced,» *Informes de la Construcción*, vol. 53, nº 478, pp. 39-50, 2002.
- [7] F. Parisi, D. Asprone, L. Fenu y A. Prota, «Experimental characterization of Italian composite adobe bricks,» *Composite Structures*, vol. 122, pp. 300-307, 2015.
- [8] L. F. Guerrero Vaca, «Arquitectura en tierra. Hacia una recuperación de una cultura constructiva,» *Apuntes*, vol. 20, nº 2, pp. 182-201, 2007.
- [9] S. Hernández Moreno, *Introducción a la planeación de la vida útil en proyectos de arquitectura y edificación*, primera ed., México, D.F.: Plaza y Valdéz, 2012.
- [10] S. Hernández Moreno, *Selección y diseño sustentable de materiales de construcción*, México: Trillas, 2016.
- [11] C. Caraballo Perichi, *Patrimonio Cultural, un enfoque diverso y comprometido*, México: UNESCO, 2011.
- [12] A. Lezama, «El patrimonio cultural frente al desafío de la globalización,» *CUADERNOS DEL CLAEH*, pp. 9-40, 2004.
- [13] A. Deffis Caso, *Energía. Fuentes primarias utilización ecológica*, México: Árbol Editorial, 1999.
- [14] I. E. Agency, «International Energy Agency,» 16 march 2019. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/newsroom/news/2019/march/global-energy-demand-rose-by-23-in-2018-its-fastest-pace-in-the-last-decade.html>. [Último acceso: 14 june 2019].
- [15] M. Li, «World Energy 2017-2050: Annual Report,» Department of Economics, University of Utah, Salt Lake City, 2017.
- [16] M. S. Borsani, *Materiales ecológicos, estrategias, alcances y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles*, 2011.
- [17] T. Abergel, B. Dean y J. Dulac, «Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector. Status report 2017,» 2017.
- [18] D. o. B. I. & Skill, «Estimating the amount of CO2 emissions that the construction industry can influence,» London, 2010.

- [19] P. S. M. S. A. S. S. P. S. K. L. S. B. B. P. S. P. P. Sangeet Nepal, «A Comparative Study of Stack Emissions from Straight-Line and Zigzag Brick Kilns in Nepal,» *Atmosphere*, vol. 10, n° 107, pp. 1-19, 2019.
- [20] P. E. George J. Venta, *Life cycle analysis of brick and mortar products*, Ottawa: the ATHENATM Sustainable Material, 1998.
- [21] A. Jyoti Nath, R. Lal y A. Kumar Das, «Fired Bricks: CO2 Emission and Food Insecurity,» 2018.
- [22] M. Luján y D. Guzmán, «Design, Construction and Evaluation of a furnace (MK3) for firing craft bricks,» *ACTA NOVA*, vol. 7, n° 2, pp. 165-193, 2015.
- [23] D. Gielen, «Building materials and co2 Western European emission reduction strategies,» Netherlands, 1997.
- [24] U. N. D. Programme, «Energy and the challenge of sustainability,» Communications Development Incorporated, Washington, 2000.
- [25] «Universia, España,» 11 junio 2015. [En línea]. Available: <http://noticias.universia.es/cultura/noticia/2015/06/11/1126546/4-nuevos-datos-alarmanes-contaminacion.html>.
- [26] UNESCO, «Oficina de la UNESCO en México,» 3 octubre 2016. [En línea]. Available: <http://whc.unesco.org/en/statesparties/mx>.
- [27] CONANP, «Áreas Naturales protegidas,» 18 octubre 2016. [En línea]. Available: <http://www.conanp.gob.mx/regionales/>.
- [28] S. Hernández Moreno y A. Garduño Hernandez, «Tecnologías actuales aplicadas al desarrollo urbano sustentable,» *Acta Universitaria*, vol. 20, n° 1, pp. 25-34, 2010.
- [29] G. MInke, *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*, Alemania, 2001.
- [30] R. T. J. A. O. W. A. A. Modeste Kameni Nematchoua, «Effect of wall construction materials over indoor air quality in humid and hot climate,» *Journal of Building Engineering*, vol. 3, pp. 16-23, 2015.
- [31] T. H. Midori Tanaka, «Investigating perceptual qualities of static surface appearance using real materials and displayed images,» *Vision Research*, vol. 115, pp. 246-258, 2015.
- [32] B. Yuste, *Arquitectura de Tierra. Caraterización de los tipos edificatorios*, Universitat Politècnica de Catalunya: Tesis. Departament de construccions arquitectòniques, Màster en Arquitectura Energia i Medi Ambient.
- [33] J. Martin Evans, «Actualización de la construcción con tierra,» de *Construcción con tierra 3*, C. d. I. H. y. Energía-CIHE-SI-FADU-UBA, Ed., Buenos Aires, 2007, pp. 7-15.
- [34] S. Hernández Moreno, «Diseño sustentable de materiales de construcción; caso del concreto de matriz de cemento Pórtland,» *Ciencia Ergo Sum*, vol. 15, n° 3, pp. 306-310, 2008.
- [35] Oskam, «Oskam,» [En línea]. Available: http://www.oskam-vf.com/bloques_%20de_tierra_comprimida.html. [Último acceso: 16 octubre 2016].
- [36] S. Hernández Moreno, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*, Primera ed., México: Trillas, 2015.
- [37] E. H. A. A. S. Bestraten, «Earthen construction in the 21rst century,» *Informes de la Construcción*, vol. 6, n° 523, p. 5.20, 2001.
- [38] I. Demir, «Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks,» *Wate Management*, vol. 8, pp. 622-627, 2008.

- [39] M. Arellano Reyes, «Additive for improving clay resistance in the manufacturing of building materials and the fabrication process thereof». Mexico Patente MX2016000863, 21 July 2017.
- [40] J. Lopez Mondragon, «Soil-Stabilizing additive». México Patente MXPA04002840 A, 28 September 2005.
- [41] D. Heinemann Hosrt, «Brick clay mfr - using drying promotion additive». Alemania Patente DE2155763, 17 May 1973.
- [42] P. Michal, «Unfired clay stabilized with polymers». Czech Republic Patente CZ302139, 10 November 2010.
- [43] j. Oti, J. Kinuthia y J. Bai, «Engineering properties of unfired clay masonry bricks,» *Engineering Geology*, vol. 107, n° 3-4, pp. 130-139, 2009.
- [44] M. Jesús González y J. García Navarro, «Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact,» *Building and Environment*, vol. 41, n° 7, pp. 902-909, 2006.
- [45] A. Cedeño Valdiviezo, «Materiales bioclimáticos,» *Revista de Arquitectura* , vol. 12, pp. 100-110, 2010.
- [46] J. Yue, L. Yin, J. Mo, J. Wu y W. Lui, «Concrete mixing proportion for clay-bound macadam construction and preparation method of concrete mixing proportion». China Patente CN108083703, 29 05 2018.
- [47] X. He, G. Sun, W. Zhou y X. He, «Clay additive for sand mold casting and bonding». China Patente CN105665616, 17 February 2016.
- [48] W. A. Mallow, «Soil stabilizer and method for stabilizing soil». United States Patente 4545820, 8 October 1985.
- [49] J. C. Rodríguez Romo, «El bambú como material de construcción,» *Conciencia Tecnológica*, n° 31, pp. 67-69, 2006.
- [50] S. Henández Moreno, *Vida útil en el diseño sustentable de edificios. Teoría y práctica*, primera ed., México: trillas, 2015.
- [51] M. S. El-Mahllawy y A. M. Kandeel, «Engineering and mineralogical characteristics,» *Housing and Building National Research Center*, vol. 10, pp. 82-91, 2013.
- [52] D. A. Arellano Vázquez, *Metodología para el desarrollo de materiales constructivos de bajo impacto ambiental en México*, Toluca: Tesis Doctoral, 2020.
- [53] I. S. I. 14688-1:2018, *Geotechnical investigation and testing - identification and classification of soil - Part 1: Identification and description (ISO 14688-1:2017)*, 2018.
- [54] E. García Romero y M. Suárez Barrios, *LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS*, Madrid.
- [55] D. Daudon, Y. Sieffert, O. Albarracín, L. Garino Libardi y G. Navarta, «Adobe construction modeling by discrete element method: first methodological steps,» *Procedia. Economics and Finance*, vol. 18, pp. 247-254, 2014.
- [56] G. M. Viñuales, «Tecnología y construcción con tierra,» *Apuntes* , vol. 20, n° 2, pp. 220-231, 2007.
- [57] J. Cid, F. Mazarrón y I. Cañas, «The earth building normative documents in the world,» *Informes de la construcción*, vol. 63, n° 523, pp. 159-569, 2011.
- [58] F. Gatti, *Arquitectura y construcción en tierra. Estudio comparativo de las técnicas contemporaneas en tierra*, Barcelona : Tesis, 2012.
- [59] J. Salazar, *Manual de Construcción Natural Construyendo con Cob.*, 2005.

- [60] A. M. Henneberg de León, «TRES PASOS PARA LA RECUPERACIÓN DE LA ARQUITECTURA DE TIERRA EN EL ESTADO ZULIA, VENEZUELA.» *Construcción con Tierra Investigación y Documentación*, pp. 235-242, 2015.
- [61] T. científicos, «Textos científicos,» Textos científicos, 01 02 2013. [En línea]. Available: <https://www.textoscientificos.com/quimica/carbohidratos/polisacaridos>. [Último acceso: 05 03 2019].
- [62] S. Badui Dergal, *Química de los alimentos*, México: Pearson Educación, 2006.
- [63] V. Duarte Sáenz, «Determinación de sacarosa por medio de polarimetría en unamuestra comercial de refresco gaseoso marca Fanta sabor naranja,» Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2018.
- [64] S. Zamora Navarro, «Importancia de la sacarosa en las funciones cognitivas: comportamiento y conocimiento,» *Nutrición Hospitalaria*, vol. 28, n° 4, pp. 106-111, 2013.
- [65] N. Aguilar Rivera, «Lo dulce del azúcar,» *La ciencia y el hombre*, vol. 19, n° 1, 2006.
- [66] C. M. J. , «The Crystal Structure of Sodium Triphosphate, $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$, Phase I,» *Acta Crystallographica*, vol. 13, n° 3, pp. 263-269, 1959.
- [67] E. Hernández B. , R. Cruz R., F. Robledo S. y L. Santoyo M., «Caracterización del alcohol polivinílico usado en recubrimientos de base acuosa,» *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, vol. 38, n° 002, pp. 15-25, 2007.
- [68] J. A. Samaniego Gaxiola, J. E. Amaya Carrillo y J. L. Puente Manríquez, «Assessment of acetic acid like fumigant of silverleaf whitefly Bemisia tabaci (Gennadius) in laboratory and field,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 3, n° 3, pp. 413-426, 2012.
- [69] M. Pereira-Zamora y E. Wong-González, «REDUCCIÓN DE LA CANTIDAD DE *Vibrio mimicus* CON CALOR O ÁCIDO ACÉTICO EN HUEVO DE TORTUGA (*Lepidochelys olivacea*),» *Agronomía Mesoamericana*, vol. 21, n° 2, pp. 319-326, 2010.
- [70] Y. Maldonado Culquimboz, S. M. Salazar Ocampo, C. E. Millones Ch., E. V. Torres M. y E. R. Vásquez C., «Extraction of pectin by acid hydrolysis method in fruit maushan (*Vasconcellea weberbaueri* (Harms) V.M. Badillo) from the district of San Miguel de Soloco, Amazon region.,» *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas*, vol. 3, n° 2, pp. 177-184, 2010.
- [71] N. Chasquibol Silva, E. Arroyo Benites y J. C. Morales Gomero, «Extracción y caracterización de pectinas obtenidas a partir de frutos de la biodiversidad peruana,» *Ingeniería industrial*, n° 26, pp. 175-199, 2008.
- [72] K. Hosmer Caffall y D. Mohnen, «The structure, function, and biosynthesis of plant cell wall pectic polysaccharides,» *Carbohydrate Research*, pp. 1879-1900, 2009.
- [73] B. R. Thakur, R. K. Singh y A. K. Handa, «Chemistry and Uses of Pectin - A Review,» *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 37, n° 1, pp. 47-73, 1997.
- [74] M. Á. Sanjuán Barbudo y S. Chinchón Yepes, *Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland*, Alicante: Universidad de Alicante.
- [75] E. d. c. y. p. d. l. r. ARQHYS.com, «Revista ARQHYS,» Cementos Portland especiales, 07 2011. [En línea]. Available: <https://www.arqhys.com/cementos-portland-especiales.html>. [Último acceso: 06 03 2019].
- [76] ASTM-Designation-C305, *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*, American Society for Testing and Materials, 1999.
- [77] ASTM-Designation-C109, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, American Society for Testing and Materials, 1999.

- [78] Mexican-Standard-N.CMT.2.02.001, *Calidad del Cemento Pórtland*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- [79] Mexican-Standard-M.MMP.2.02.004/04, *Resistencia a la Compresión del Cemento Pórtland*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- [80] L. Mendoza Cuenca, M. Mayora, L. Romero Salazar, H. Yee Madeira, J. Jiménez Gallegos y J. C. Arteaga-Arcos, «Advances in the use of the steel industry by-products when manufacturing traditional ceramics for sustainable purposes,» *Procedia Engineering*, vol. 118, pp. 1202-1207, 2015.
- [81] M. F. González Rodríguez, *Análisis de fractura en ensayos de compresión para materiales compuestos utilizando pruebas ópticas no destructivas*, León: Tesis, 2017.
- [82] Mexican-Standard-NMX-C-404-ONNCCE-2005, *Norma mexicana nmx-c-404-onncce-2005 piezas para uso estructural*, National Organization for Normalization and Certification of Building and Edification (in Spanish), 2005.
- [83] D. Gaspar-Tebar, «Normalización del cemento. Tiempo de fraguado: algunos comentarios sobre el método de ensayo.,» *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, pp. 39-57.
- [84] Mexican-Standard-M.MMP.2.02.006/04, *Tiempo de fraguado del cemento por el método Vicat*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes .
- [85] ASTM-Designation-C191, *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*, American Society for Testing and Materials, 1999.
- [86] ASTM-Designation-C807, *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle*, American Society for Testing and Materials, 1999.
- [87] Mexican-Standard-NMX-C-037-ONNCCE-2013, *Building Industry, dimension determination of Blocks, Partitions or Bricks and Brick Thick, Test Methods.*, National Organization for Normalization and Certification of Building and Edification (in Spanish), 2004.
- [88] ASTM-Designation-C642, *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, American Society for Testing and Materials, 1997.
- [89] ASTM-Designation-C1585, *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*, American Society for Testing and Materials, 2004.
- [90] G. J. Islas Valverde, *Uso y aplicación de la sorosis de (Ananas comosus) como biocompuesto en la industria de la construcción*, Toluca: Tesis, 2020.
- [91] E. Ramos Ramírez, J. J. Guzmán Andrade, M. C. Sandoval Juárez y Y. Gallaga Ortega, «Caracterización de Arcillas del Estado de Guanajuato y su Potencial Aplicación en Cerámica,» *Acta Universitaria*, vol. 12, nº 1, pp. 23-30, 2002.
- [92] J. C. Lazo, A. E. Navarro, M. R. Sun-Kou y B. P. Llanos, «Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación como absorbentes de Fenol,» *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 74, nº 1, pp. 3-19, 2008.
- [93] E. G. Tuesta, M. Vivas, R. Sun y A. Gutarra, «Revista de la Sociedad Química del Perú,» *Modificación química de arcillas y su aplicación en la retención de colorantes*, vol. 71, nº 1, pp. 26-36, 2005.
- [94] W. Ticona, M. Blanco y S. Cabrera, «Caracterización química mineralógica estructural de dos arcillas bolivianas,» *Revista Boliviana de Química*, vol. 23, nº 1, pp. 71-76, 2006.
- [95] H.-J. Althaus, C. Bauer, G. Doka, R. Dones, R. Frischknecht, R. Hischer, S. Hellweg, S. Humbert, N. Jungbluth, T. Köllner, Y. Loerincik, M. Margni y T. Nemecek, «Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods,» Roland Hischer, Bo Weidema, St. Gallen, 2010.

- [96] I. 14040:2006, *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, 2006.
- [97] I. 14044:2006, *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*, 2006.
- [98] E. d. J. Jiménez García, «La musealización del patrimonio natural para su conservación, Museo “Luis Mario Schneider”, Malinalco, México,» *Legado de Arquitectura y Diseño*, vol. 1, n° 22, 2017.
- [99] S. Hernández Moreno, *Diseño y manejo sustentable en edificación*, Primera ed., Toluca Edo. de México: Universidad Autonoma del Estado de México, 2010.
- [100] S. Hernandez Moreno, *Introduccion a la planeación de la vida util en proyectos de arquitectura y edificación*, Primera ed., Toluca: Plaza y Valdés, 2012.
- [101] S. Hernández Moreno, *Vida util en el diseño sustentable de edificios*, Primera ed., México: Trillas, 2015.
- [102] S. Hernandez Moreno, «El Diseño Sustentable como Herramienta para el Desarrollo de la Arquitectura y Edificación en México,» *Acta Universitaria*, vol. 8, n° 2, pp. 18-23, 2008.
- [103] S. Hernández Moreno y D. Delgado Hernandez, «MANEJO SUSTENTABLE DEL SITIO EN PROYECTOS DE ARQUITECTURA; CRITERIOS Y ESTRATEGIAS DE DISEÑO,» *Quivera*, vol. 1, n° 2010, pp. 38-51, 2012.
- [104] E. Velazco León, *Cómo acercarse a la arquitectura*, Primera ed., México: Limusa, 1990.
- [105] A. Plazola Cisneros, A. Plazola Anguiano y G. Plazola Anguiano, *Arquitectura Habitacional Plazola*, quinta ed., México: Limusa, 1992.
- [106] varios, *El diseño ante el deterioro ambiental*, primera ed., Toluca, Estado de México: Consejo Editorial de la Administracion Pública Estatal, 2010.
- [107] INEGI, *Censo de población y vivienda 2010*, Aguascalientes, 2013.
- [108] C. A. Avendaño Restrepo, C. A. Londoño Echeverri y M. A. Vela Rosero, «Patologías por la humedad en los materiales para construcción,» *Scientia Et Technica*, vol. 8, n° 36, pp. 343-347, 2007.
- [109] M. y. d. S. S. Evans, *Diseño bioambiental y arquitectura solar*, FADU, Universidad de Buenos Aires ed., Buenos Aires, 1991.
- [110] A. Cedeño Valdiviezo, «Materiales bioclimáticos,» *Revista de Arquitectura*, vol. 12, pp. 100-110, 2010.
- [111] R. Z. G. N. y. G. F. A. Solís Carcaño, «La administración de los materiales en la construcción,» *Ingeniería*, vol. 13, n° 3, pp. 61-71, 2009.
- [112] J. A. González Fajardo, J. N. Zaragoza Grifé y J. Díaz Ramírez, «Un sistema de planeación para proyectos de,» *González et.al. / Ingeniería*, pp. 81-90, 2004.
- [113] E. Méndez, S. Ruiz, F. J. Jiménez y J. De frutos, «Utilización de cerámicas piezoeléctricas para la determinación de microgrietas en materiales de construcción,» *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, pp. 189-197, 2015.
- [114] P. C. C. B.-B. A. R. E. G. E. M. I. González, «A proposal for the formulation of high-quality ceramic “green” materials with traditional raw materials mixed with Al-clays,» *Applied Clay Science*, 2016.
- [115] J. M. Macías-Bernal, «Modelo de predicción de la vida útil de la edificación patrimonial a partir de la lógica difusa,» 2016. [En línea]. Available: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewArticle/2952/3270>. [Último acceso: 10 marzo 2016].

- [116] L. Ortega Madrigal, Propuesta metodológica para estimar la vida útil de los sistemas constructivos de fachadas y cubiertas utilizados actualmente con más frecuencia en la edificación española a partir del método propuesto por la norma ISO-15686, Valencia, 2012.
- [117] UNESCO, «Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural,» Paris, 1972.
- [118] E. Larousse, Los grandes trabajos de los animales, Primera ed., México: Larousse.
- [119] 2017. [En línea]. Available: <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/18149506/Las-mas-espectaculares-arquitecturas-realizadas-por-animales.html>. [Último acceso: 8 mayo 2017].
- [120] R. Nitzkin, «Revista Hecohabitar,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.ecohabitar.org/arcilla-uso-en-la-construccion-que-es-como-encontrarla-y-para-que-se-puede-usar/>. [Último acceso: 18 marzo 2017].
- [121] P. Alonso, «El mundo,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.elmundo.es/madrid/2016/12/20/5857bf4d268e3ef2778b4761.html>. [Último acceso: 8 febrero 2017].
- [122] G. B. M. LIST, «The constructor,» [En línea]. Available: <https://theconstructor.org/building/green-building-materials-list/7028/>. [Último acceso: 15 mayo 2017].
- [123] 3. Natives, «3D Natives,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/clay-xyz-impresora-3d-arcilla-170520172/>. [Último acceso: 2017 mayo 19].
- [124] I. f. A. A. o. Catalonia, «Institute for Advanced Architecture of Catalonia,» 2017. [En línea]. Available: <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/pylos/>. [Último acceso: 9 enero 2017].
- [125] F. R. M. I. C. J. Cid, «Las normativas de construcción con tierra en,» *Informes de la Construcción*, vol. 63, nº 523, pp. 159-169, 2011.
- [126] M. Silva Borsani, estrategias de aplicación de los materiales como generadores de hábitats urbanos sostenibles.
- [127] C. Álvarez, «El país,» 2010. [En línea]. Available: <http://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/07/lo-que-contamina-un-ladrillo.html>. [Último acceso: 8 mayo 2017].
- [128] A. Locker, «<https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>,» 2018. [En línea]. Available: <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>. [Último acceso: 18 07 2018].
- [129] B. Macías, «mediatrends.es,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.mediatrends.es/a/75239/impresora-3d-dubai-construye-oficina/>. [Último acceso: 13 marzo 2018].
- [130] «anonymous-projects.com,» 2018. [En línea]. Available: <http://anonymous-projects.com/materiales-que-se-pueden-utilizar-para-impresion-en-3d/>. [Último acceso: 18 julio 2018].
- [131] X. Li, «Intelligent materials: a review of applications in 4D printing,» 1 julio 2016. [En línea]. Available: <https://www.emeraldinsight.com/doi/full/10.1108/AA-11-2015-093>. [Último acceso: 6 julio 2018].
- [132] Jin Choi, O-Chang Kwon, Wonjin Jo, Heon Ju Lee y Myoung-Woon Moon, «4D Printing Technology: A Review,» *3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING*, vol. 2, nº 4, pp. 159-167, 2015.
- [133] I. Demir, «Effect of organic residues addition on the technological,» *Waste Management*, vol. 8, pp. 622-627, 2008.
- [134] H. H. DIETER, «Brick clay mfr - using drying promotion additive». Alemania Patente DE2155763, 17 may 1973.
- [135] P. Michal, «Unfired clay stabilized with polymers». Czech Republic Patente CZ302139, 10 november 2010.

- [136] O. J.E. , K. J.M. y B. J, «Engineering properties of unfired clay masonry bricks,» *Engineering Geology*, vol. 107, pp. 130-139, 2009.
- [137] H. Xiangyan, S. Guozheng y Z. Wambo, «Clay additive for sand mold casting and bonding». China Patente CN105665616, 17 february 2016.
- [138] W. A. Mallow, «Soil stabilizer and method for stabilizing soil». United States Patente 4545820, 8 october 1985.
- [139] 3. Natives, «3D Natives,» 3D Natives, 17 05 17. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/clay-xyz-impresora-3d-arcilla-170520172/>. [Último acceso: 18 08 05].
- [140] «Institute for Advanced Architecture of Catalonia,» Institute for Advanced Architecture of Catalonia, [En línea]. Available: <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/pylos/>. [Último acceso: 17 01 2017].
- [141] *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle.*

