



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Doctorado en Materiales Poliméricos

Caracterización de adobes experimentales: Efecto
de la adición de aditivos poliméricos en sus
propiedades mecánicas

Tesis que presenta

Jhonny Martín Peraza Góngora

En opción al título de

DOCTOR EN MATERIALES POLIMÉRICOS

Mérida, Yucatán, México

2022

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.



Firma: _____

Nombre: Jhonny Martin Peraza Gongora



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Jhonny Martín Peraza Góngora titulado **“Caracterización de adobes experimentales: Efecto de la adición de aditivos poliméricos en sus propiedades mecánicas”**, fue realizado en la Unidad de Materiales, línea de investigación en Reciclado y Procesamiento de Materiales, del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del Dr. Carlos Rolando Ríos Soberanis y codirección de la Dra. Annick Jo Elvire Daneels Verriest, y pertenece al Programa de Posgrado en Materiales Poliméricos de este Centro.

Atentamente



Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 22 de septiembre de 2022.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero a través del proyecto Ciencia Básica CB2015-254328 otorgado a la Dra Annick Daneels, al apoyo de proyectos 60204/CM0042 otorgado al Dr. C.R. Rios Soberanis, así como el estipendio de la beca 442661 para el estudiante de doctorado Jhonny Peraza Góngora.

Agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el apoyo financiero DGAPA/PAPIIT IN400816 recibido a través de Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnología (PAPIIT).

Agradecimientos al Laboratorio de Difracción de Rayos X del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por su colaboración en la realización de las pruebas de caracterización por Fluorescencia de rayos X, Difracción de rayos X y TIC-TOC.

A mi director el Dr. Carlos Rolando Rios Soberanis por otorgarme la confianza de participar en su proyecto de investigación, por todo su apoyo y la transmisión de su conocimiento en mi formación durante el doctorado.

Agradecimiento a la codirectora de este trabajo, Dra Annick Jo Elvire Daneels Verriest, Investigadora del área de Arqueología del Instituto de Investigaciones Antropológicas (UNAM) por la manufactura de los adobes y su valiosa contribución en la investigación de materiales prehispánicos en el sitio arqueológico “La Joya”.

Agradecimiento a MC José de los Ángeles Rodríguez Laviada por su gran apoyo en las técnicas de caracterización fisicoquímicas y mecánicas.

Agradecimiento a los doctores Pedro Herrera Franco y José Gonzalo Carrillo Baeza, investigadores del CICY y tutores durante mi trabajo de investigación; así mismo para los doctores Emilio Vinajera Reyna y Emilio Pérez Pacheco, revisores de mi trabajo de tesis.

Al MC. Roberto Anaya Ramírez por su valioso apoyo en la caracterización mecánica de los materiales ensayados, así como en la generación de la información obtenida.

A los técnicos del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) que colaboraron en la caracterización química de los materiales.

A mis padres por brindarme su apoyo incondicional en este camino y siempre tenderme la mano ante la adversidad.

Finalmente, agradezco de todo corazón a mi familia, por su paciencia y apoyo incondicional durante todos estos años, en especial a mi madre Aracely Gongora Marín, a mi esposa Nely Liceny, a mi hijo Robbie Alexander y a mis hermanas Yaneht y Blanca a quienes debo este triunfo. Para ellos es todo mi agradecimiento por siempre contar con su motivación a nunca rendirme.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| ÍNDICE..... | i |
| ÍNDICE DE FIGURAS | iv |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | vii |
| RESUMEN | viii |
| ABSTRACT | x |
| HIPOTESIS | xii |
| OBJETIVO GENERAL | xii |
| CAPITULO 1 | 1 |
| ANTECEDENTES | 1 |
| 1.- Sitio arqueológico La Joya y la tecnología mesoamericana | 1 |
| 2.- El adobe como elemento constructivo | 4 |
| 2.1.- Composición y dosificación para la fabricación del adobe tradicional..... | 5 |
| 2.2.- Proceso para la elaboración del adobe tradicional | 6 |
| 2.3.- Ventajas y desventajas de las construcciones con adobe | 8 |
| 3.- La tierra | 10 |
| 3.1- Estabilizadores y refuerzos..... | 12 |
| 4.- Propiedades mecánicas de adobes..... | 16 |
| 4.1.- Comportamiento mecánico | 18 |
| 4.1.1.- Resistencia a la compresión | 19 |
| 4.1.2.- Resistencia a la tracción | 20 |
| 4.1.3.- Resistencia a la flexión..... | 22 |
| 4.1.4.- Resistencia al Impacto..... | 23 |
| 4.2.- Meteorización de adobes | 24 |
| 5.- Técnica No Destructiva de Emisión Acústica..... | 25 |
| 5.1- Emisión Acústica aplicado a adobes | 28 |
| CAPITULO 2 | 29 |
| METODOLOGIA..... | 29 |

| | |
|---|----|
| 1.- Sitio arqueológico La Joya..... | 29 |
| 2.- Elaboración de ladrillos experimentales de adobe | 29 |
| 2.1.- Serie experimental de ladrillos de adobe..... | 30 |
| 2.2.- Procedimiento de fabricación..... | 31 |
| 3.- Metodología y caracterización | 34 |
| 3.1.- Caracterización del suelo | 34 |
| 3.1.1.- Fluorescencia de rayos X | 34 |
| 3.1.2.- Difracción de rayos X | 35 |
| 3.1.3.- TIC-TOC (carbón inorgánico-carbón orgánico) | 36 |
| 3.1.4.- Distribución de tamaño de partícula..... | 37 |
| 3.1.5.- Análisis SEM | 38 |
| 3.1.6.- Ensayo de absorción de agua | 38 |
| 3.1.6.1.- Por Capilaridad..... | 38 |
| 3.1.6.2.- Ensayo de Humedad..... | 38 |
| 3.1.6.3.- Ensayo de absorción por sumersión..... | 39 |
| 3.2.- Caracterización mecánica de los ladrillos de adobe..... | 39 |
| 3.2.1.- Pruebas a compresión..... | 40 |
| 3.2.2.- Pruebas a flexión | 41 |
| 3.2.3.- Pruebas a impacto..... | 42 |
| 3.3.- Pruebas de intemperismo acelerado. | 43 |
| 3.3.1.- Caracterización mecánica de muestras a ciclos de 15 y 30 días. | 44 |
| 3.4.- Análisis fractográficos..... | 45 |
| CAPITULO 3 | 46 |
| RESULTADOS Y DISCUSIONES | 46 |
| 3.1.- Caracterización del suelo | 46 |
| 3.1.1.- Fluorescencia de rayos X | 46 |
| 3.1.2.- Difracción de rayos X | 47 |
| 3.1.3.- TIC-TOC (carbón inorgánico-carbón orgánico) | 50 |
| 3.1.4.- Distribución de tamaño de partícula..... | 52 |
| 3.1.5.- Análisis SEM | 53 |
| 3.1.6.- Ensayo de absorción de agua | 54 |
| 3.1.6.1.- Por capilaridad..... | 54 |
| 3.1.6.2.- Ensayo de humedad..... | 59 |
| 3.1.6.3.- Ensayo de absorción por sumersión..... | 60 |

| | |
|---|----|
| 3.2.- Caracterización mecánica de los ladrillos de adobe..... | 62 |
| 3.2.1.- Pruebas a compresión..... | 62 |
| 3.2.2.- Análisis fractográfico | 69 |
| 3.2.3.- Pruebas a flexión | 72 |
| 3.3.- Pruebas de intemperismo acelerado. | 77 |
| 3.3.1.- Muestras de adobe sometidas a intemperismo a 15 días..... | 79 |
| 3.3.2.- Muestras de adobe sometidas a intemperismo a 30 días..... | 82 |
| 3.4.- Pruebas a impacto Izod | 85 |
| CAPITULO 4 | 91 |
| CONCLUSIONES..... | 91 |
| REFERENCIAS | 94 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1.- a) Mapa de ubicación de la zona arqueológica “La Joya”, b) Sitio arqueológico actual, c) Reconstrucción virtual 3D de la pirámide [1,2]. | 1 |
| Figura 1.2.- Alcances tecnológicos de la arqueología dentro de la Ciencia de Materiales. ... | 3 |
| Figura 1.3.- Proceso típico de manufactura de ladrillos de adobe: a) Preparación y mezclado, b) Mezclado manual, c) Moldeado, d) Vaciado y enrasado, e) Primer secado y f) Desmolde y secado. | 8 |
| Figura 1.4.- Factores involucrados y determinantes para el origen del suelo. | 10 |
| Figura 1.5.- Estabilizadores de origen mineral: a) Cal, b) Cemento, c) Yeso, d) Ceniza volcánica. | 13 |
| Figura 1.6.- Estabilizadores de origen sintético: Emulsiones asfálticas. | 14 |
| Figura 1.7.- Estabilizadores de origen vegetal: a) Aceite de maíz, b) Aceite de linaza. | 14 |
| Figura 1.8.- Estabilizadores de origen vegetal: a) Cascara de arroz, b) Cabuya, c) Aserrín, d) Zacate Pangola. | 16 |
| Figura 1.9.- Prueba a compresión: a) antes, b) después de la prueba. | 19 |
| Figura 1.10.- Tipos de fractura: a) antes de la prueba, b) Fractura frágil (mínimo Δh), c) Fractura plástica, d) Flujo plástico (máximo Δh). | 20 |
| Figura 1.11.- Prueba a tensión (prueba brasileña). | 21 |
| Figura 1.12.- Prueba a flexión. | 22 |
| Figura 1.13.- Prueba a flexión: a) Horizontal de 3 puntos, b) Vertical de 4 puntos. | 22 |
| Figura 1.14.- Ensayo de impacto (Péndulo de Charpy). | 23 |
| Figura 1.15.- Daño significativo en materiales de adobe debido a la meteorización. | 25 |
| Figura 1.16.- Parámetros de la onda acústica detectada por la Técnica EA. | 25 |
| Figura 1.17.- Efecto de los agregados en los parámetros mecánicos de los adobes [12]. | 28 |
| Figura 2.1.- Proceso de elaboración de ladrillos experimentales: a) tamizado, b) picado de las fibras, c) mezcla, d) reposo, e) llenado de moldes, f) enrasado de ladrillos, g) y h) secado y marcado del ladrillo, i) apilado final. | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.2.- Esquema de las muestras de adobe experimental a compresión..... | 40 |
| Figura 2.3.- Prueba a compresión acoplado a emisión acústica. | 41 |
| Figura 2.4.- Vista frontal dimensional de las barras de adobes en flexión..... | 42 |
| Figura 2.5.- Esquema de las muestras de adobe experimental a Impacto. | 42 |
| Figura 2.6.- Reducción de la muestra para la inserción en la máquina de intemperismo acelerado..... | 43 |
| Figura 2.7.- Muestras con reducción y el cambio de posición de los sensores de emisión acústica. | 44 |
| Figura 3.1.- Análisis de Difracción de rayos-X en 4 muestras de suelo. | 48 |
| Figura 3.2.- Análisis de Difracción de rayos-X: identificación de arcillas. | 49 |
| Figura 3.3.- Geometría de las arcillas..... | 50 |
| Figura 3.4.- Distribución del tamaño de partícula de muestra de suelo. | 52 |
| Figura 3.5.- Imágenes SEM de partículas: a) Distribución de partículas del suelo en estudio, b) Partícula en capas. | 53 |
| Figura 3.6.- Diferentes tipos de superficie en las formulaciones de los ladrillos..... | 54 |
| Figura 3.7.- Prueba de absorción en la muestra control de adobe (E)..... | 55 |
| Figura 3.8.- Prueba de absorción en la muestra formulación Impertop (A). | 56 |
| Figura 3.9.- Prueba de absorción en la muestra formulación Impertop/Vinnapas (AV)..... | 56 |
| Figura 3.10.- Prueba de absorción en la muestra formulación aceite de Linaza (L)..... | 57 |
| Figura 3.11.- Prueba de absorción en la muestra formulación aceite de Maiz (M)..... | 58 |
| Figura 3.12.- Prueba de absorción en la muestra formulación linaza y maíz (LM). | 58 |
| Figura 3.13.- Sumersión de a) Muestra E, b) Resto de las formulaciones. | 60 |
| Figura 3.14.- Diagramas esfuerzo-deformación-amplitud obtenidos de la aplicación de ensayos de compresión acoplados a emisión acústica..... | 66 |
| Figura 3.15.- Tipos de fallas en las diferentes formulaciones de adobe..... | 70 |
| Figura 3.16.- Ensayo a flexión de tres puntos acoplado a Emisión Acústica (EA)..... | 72 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.17.- Grietas producidas por el ensayo a flexión de tres puntos..... | 72 |
| Figura 3.18.- Gráficas representativas a) Muestra estándar serie E, b) Muestra serie A aditivo Impertop A, c) Muestra serie AV1 aditivo Impertop/Vinnapas, d) Muestra serie L aditivo chapopote en aceite de linaza, e) Muestra serie M aditivo chapopote disuelto en aceite maíz, f) Muestra serie LM aditivos chapopote disuelto en aceite de maíz y linaza. | 76 |
| Figura 3.19.- Muestras fracturadas transversalmente a) muestra A2, b) muestra AV4. | 77 |
| Figura 3.20.- Muestras con humedad y fractura transversal presentada durante los ciclos de intemperismo. | 78 |
| Figura 3.21.- Muestra experimental de serie LM con humedad en sus perfiles..... | 78 |
| Figura 3.22.- Muestras a secar para ser ensayadas en flexión..... | 79 |
| Figura 3.23.- Gráficas representativas sometidas bajo intemperismo a 15 días a) Muestra estándar serie E, b) Muestra serie A aditivo Impertop A, c) Muestra serie AV1 aditivo Impertop/Vinnapas, d) Muestra serie L aditivo chapopote en aceite de linaza, e) Muestra serie M aditivo chapopote disuelto en aceite maíz, f) Muestra serie LM aditivos chapopote disuelto en aceite de maíz y linaza. | 81 |
| Figura 3.24.- Gráficas representativas sometidas bajo intemperismo a 30 días a) Muestra serie A aditivo Impertop, b) Muestra serie AV aditivo Impertop/Vinnapas c) Muestra serie L aditivo chapopote en aceite de linaza, d) Muestra serie M aditivo chapopote disuelto en aceite maíz, e) Muestra serie LM aditivos chapopote disuelto en aceite de maíz y linaza..... | 84 |
| Figura 3.25.- Energía absorbida y resistencia para muestras serie “A”. | 86 |
| Figura 3.26.- Energía absorbida y resistencia para muestras “AV”. | 87 |
| Figura 3.27.- Energía absorbida y resistencia para muestras “L”. | 88 |
| Figura 3.28.- Energía absorbida y resistencia para muestras “M”. | 89 |
| Figura 3.29.- Energía absorbida y resistencia para muestras “LM”. | 90 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1.- Adobes experimentales con aditivos sintéticos poliméricos..... | 31 |
| Tabla 2.2.- Procedimiento para la obtención de las muestras de adobes experimentales. ... | 33 |
| Tabla 3.1.- Análisis de elementos mayores por Fluorescencia de rayos-X..... | 46 |
| Tabla 3.2.- Análisis de elementos traza por Fluorescencia de rayos-X..... | 47 |
| Tabla 3.3.- Obtención del Carbono Total (TC) | 51 |
| Tabla 3.4.- Obtención del Carbono Inorgánico (TIC)..... | 51 |
| Tabla 3.5.- Humedad de las formulaciones de adobes. | 59 |
| Tabla 3.6.- Absorción en (grs) de las formulaciones de adobes..... | 61 |
| Tabla 3.7.- Valores de resistencia a la compresión para las diferentes formulaciones de las muestras de adobe..... | 63 |
| Tabla 3.8.- Parámetros mecánicos de los ensayos a flexión..... | 74 |
| Tabla 3.9.- Ensayos de flexión condiciones de intemperismo acelerado a 15 días..... | 80 |
| Tabla 3.10.- Ensayos de flexión condiciones de intemperismo acelerado a 30 días..... | 83 |

RESUMEN

En 2012, el Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM, inició un programa de estudios fisicoquímicos mediante la extracción de residuos aglutinantes en 14 muestras de rellenos, adobes, pisos y columnas, fechadas entre 200-400 d.C., obtenidas de excavaciones en edificios arquitectónicos de terrenos monumentales del sitio arqueológico La Joya, Veracruz, México, ubicado en la planicie costera del Golfo en un ambiente de trópico húmedo. El interés por identificar un ligante orgánico deriva de la observación de que la conservación de las edificaciones es mejor de lo esperado, considerando únicamente la composición mineral de los materiales de construcción, donde predominan las arcillas expansivas del tipo Montmorillonita, lo que lleva a suponer la presencia de un componente con efectos consolidantes e impermeabilizantes. La importancia de identificar el aglutinante presente en la arquitectura prehispánica radica no solo en entender qué hizo posible que una tradición constructiva de tierra cruda prevaleciera miles de años en un ambiente de trópico húmedo, tema relevante para la historia de la tecnología, sino también por las posibilidades que abre en la conservación de restos arqueológicos y su posible aplicación a la construcción moderna.

Hoy en día, la Ciencia de Materiales ha extendido sus logros a casi cualquier campo científico. La arqueología no es la excepción: durante muchos años se creyó que la arqueología y la antropología eran ciencias independientes con sus propias líneas de investigación; sin embargo, la ciencia de los materiales ha demostrado que puede brindar un gran apoyo en la investigación analítica en arqueología y que las técnicas tradicionales de caracterización de materiales se aplican significativamente en arqueología para comprender no solo la forma de vida de la civilización antigua, sino también para identificar cómo interactuaban con su entorno para lograr edificios, pinturas, herramientas, etc. Uno de esos temas es la tecnología utilizada por las civilizaciones precolombinas para fabricar materiales constructivos utilizando los elementos que tenían a mano en su entorno inmediato. Esta investigación se enfoca en una tradición constructiva mesoamericana poco conocida: la arquitectura monumental de tierra, originaria de las tierras bajas tropicales de México y perfeccionada por los olmecas.

Las muestras de un sitio del período Clásico en el centro de Veracruz indicaron un alto desempeño mecánico, que los estudios químicos atribuyeron a la presencia de derivados del petróleo. Para reproducir experimentalmente esta antigua tecnología, se fabricaron adobes utilizando diferentes tipos y proporciones de aditivos orgánicos y se probaron mecánicamente en modo de compresión, flexión e impacto. Se acoplaron sensores de emisión acústica a las muestras para analizar la secuencia de falla. Para analizar el efecto del ambiente externo, también se realizaron pruebas de envejecimiento artificial. Con estas pruebas combinadas fue posible evaluar el desempeño de las diferentes mezclas y determinar correlaciones entre los resultados obtenidos con diferentes procedimientos de prueba. Esta investigación fue importante para generar una colaboración interinstitucional esencial que unió dos campos científicos diferentes, como la Ciencia de los Materiales y la Arqueología. Esta alianza estratégica entre la ingeniería y la arqueología fortalece las probabilidades de lograr resultados que puedan ser aplicados para mejorar la vida moderna, en este caso reconstruyendo una tecnología de arquitectura de tierra que proporcione viviendas económicas, sostenibles y bioclimáticas en climas tropicales húmedos.

El objetivo de este trabajo es contribuir al conocimiento formal relacionado con la naturaleza intrínseca y las propiedades fisicoquímicas de uno de los materiales de construcción prehispánicos más utilizados: el adobe. Para ello, se requiere la implementación de técnicas que permitan determinar y caracterizar dichas propiedades. Este trabajo profundizará en el conocimiento acerca de las materias primas utilizadas en el proceso de elaboración de adobes para la construcción y su comparación con los elementos y técnicas utilizadas encontradas en sitios arqueológicos a través de la fabricación y caracterización de adobes manufacturados experimentalmente variando sus componentes naturales, especialmente los que componen el sistema de ligantes del adobe. Para lograr este objetivo se han realizado varios estudios sobre la tecnología constructiva de la arquitectura monumental de tierra mediante el análisis fisicoquímico y mecánico de materiales a base de adobe preparados con técnicas prehispánicas. Con fines comparativos, se han agregado aglutinantes poliméricos naturales y sintéticos durante la fabricación de adobes experimentales.

ABSTRACT

In 2012, the Anthropological Research Institute (UNAM), began a physicochemical study program by extracting binder residues in 14 samples of fillings, adobes, floors and flats, dated from 200-400 AD, obtained from excavations in architectural buildings of monumental land from the La Joya archaeological site, Veracruz, Mexico, located on the Gulf coastal plain in a humid tropic environment. The interest in identifying an organic binder derives from the observation that the conservation of the buildings is better than expected, considering only the mineral composition of the construction materials, where expansive clays of the Montmorillonite type dominate, which leads to suppose the presence of a component with consolidating and waterproofing effects. The importance of identifying the binder present in pre-Hispanic architecture lies not only in understanding what made it possible for a construction tradition of raw earth to prevail for thousands of years in a humid tropical environment, a relevant topic for the history of technology, but also because of the possibilities that it opens in the conservation of archaeological remains and its possible application to modern construction.

Nowadays, Materials Science has spread its achievements to almost any scientific field. Archeology is not the exception: for many years it was believed that archeology and anthropology were independent sciences with their own lines of research; however, materials science has demonstrated it can provide great support in analytical research in archeology and that traditional materials characterization techniques are significantly applied in archeology in order to understand not only the way of life of ancient civilization but also to identify how they interacted with their environment to achieve buildings, paintings, tools, etc. One of those topics is the technology used by Pre-Columbian civilizations to manufacture constructive materials using the elements they had at hand in their immediate surroundings. This research focuses on a little known Mesoamerican building tradition: monumental earthen architecture, originating in the tropical lowlands of Mexico and perfected by the Olmecs. Samples from a Classic period Central Veracruz site indicated a high mechanical performance, that chemical studies attributed to the presence of petroleum derivatives.

In order to experimentally reproduce this ancient technology, adobes were fabricated utilizing different types and proportions of organic additives and mechanically tested in compression, flexural and impact mode. Acoustic emission sensors were coupled to the samples in order to analyze the failure sequence. In order to analyze the effect of external environment, artificial weathering tests were also conducted. With these combined tests it was possible to evaluate the performance of the different mixes and to determine correlations between the results obtained with different testing procedures. This research was significant in bringing about an essential interinstitutional collaboration joining two different scientific fields such as Material Science and Archeology. Such strategic alliance between engineering and archeology strengthens the probabilities of achieving results that can be applied to improve modern day life, in this case reconstructing an earthen architecture technology providing cheap, sustainable and bioclimatic housing in humid tropical climates.

The objective of this work is to contribute to the formal knowledge related to the intrinsic nature and physicochemical properties of one of the most widely used pre-Hispanic construction materials: adobe. For this, the implementation of techniques to determine and characterize such properties is required. This work will deepen the knowledge about the raw materials used in the process of making adobes for construction and its comparison with the elements and techniques used found in archaeological sites through the manufacture and characterization of manufactured experimental adobes varying their natural components, especially those that make up the adobe binder system. In order to achieve this goal, several studies on the construction technology of monumental earth architecture by means of the physicochemical and mechanical analysis of adobe-based materials prepared with pre-Hispanic techniques has been carried out. For comparative purposes, natural and synthetic polymeric binders during the manufacture of experimental adobes have been added.

HIPOTESIS

La adición de aditivos sintéticos y naturales, en diferentes formulaciones, a la manufactura de ladrillos experimentales de tierra (adobes) para sistemas constructivos, tendrá un efecto como agente ligante en la cohesión y consolidación de los componentes térreos mejorando las propiedades mecánicas de estos ladrillos.

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la tecnología constructiva de arquitectura de tierra monumental mediante el análisis fisicoquímico y mecánico de materiales a base de tierra elaborados con técnicas prehispánicas agregando, para fines comparativos, aglutinantes poliméricos sintéticos y naturales en la fabricación de adobes experimentales.

Objetivos Específicos

1. Manufactura de materiales a base de adobes siguiendo la tecnología prehispánica agregándole aditivos poliméricos comerciales (sintéticos) y naturales que actúen como aglomerantes con el objeto de evaluar el efecto cohesivo en su consolidación.
2. Identificación elemental de los componentes de la tierra empleada en la fabricación de los adobes experimentales a través de las técnicas análisis de Fluorescencia de Rayos-X, Difracción de Rayos X (DRX), y TIC-TOC (carbón inorgánico-carbón orgánico) tanto de elementos mayores como de elementos traza.
3. Evaluar las propiedades mecánicas en modo de flexión, compresión, e impacto y comparar el comportamiento mecánico en relación a las diferentes formulaciones del aditivo ligante. Esta comparación abarcará adobes de otros sitios arqueológicos.
4. Identificar los mecanismos de fractura y los eventos mecánicos del material empleando la técnica de Emisión Acústica.
5. Establecer la pertinencia de los ladrillos experimentales y su cumplimiento para aplicaciones potenciales en construcción y en restauración de elementos constructivos de valor arqueológico.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

1.- Sitio arqueológico La Joya y la tecnología mesoamericana

La Joya es una ciudad prehispánica con edificios de tierra, ubicada en la confluencia de los ríos Jamapa y Cotaxtla, en el municipio de Medellín de Bravo, Estado de Veracruz, México (Figura 1.1). Sus coordenadas geográficas son 19°04'00" N 96°09'00" W, siendo su altitud de 7 m. Ambos ríos tienen su origen en las faldas del volcán Pico de Orizaba, y cruzan una estrecha franja de calizas en su camino a la costa, proporcionando abundantes arcillas del tipo expansivo a lo largo de las terrazas aluviales [1,2].

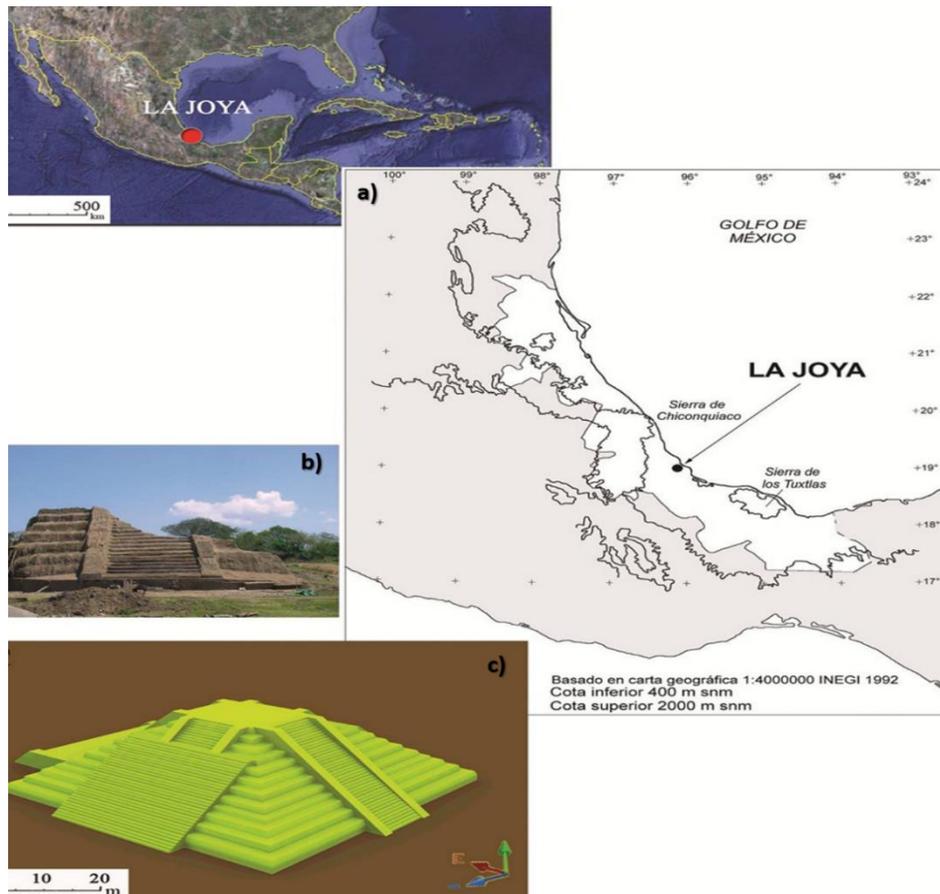


Figura 1.1.- a) Mapa de ubicación de la zona arqueológica “La Joya”, b) Sitio arqueológico actual, c) Reconstrucción virtual 3D de la pirámide [1,2].

El área de tierras bajas tiene una precipitación media anual de alrededor de 1,500 mm, producida sobre todo entre mayo y noviembre (es dos veces mayor en las tierras bajas más al sur, donde están los sitios olmecas). Durante el invierno, vientos huracanados recorren las llanuras costeras. En estas condiciones geomorfológicas y climáticas, la arquitectura de tierra no parecería ser una opción muy prometedora. Sin embargo, la investigación comprueba su viabilidad en un ambiente de trópico húmedo, en condiciones de alta precipitación, proporcionando una importante contribución a la comprensión de la cultura arqueológica regional (cultura de Remojadas o del Centro-Sur de Veracruz).

La secuencia del sitio abarca el primer milenio de nuestra era. El sitio creció a través de cuatro etapas principales de edificación, de 100 a.C. a 700 d.C., y fue abandonado después del año 1000 d.C. Hasta la fecha se han logrado exponer algunas partes conservadas de los edificios mayores, completamente contruidos de tierra (la pirámide principal y dos palacios) que delimitan la plaza principal. Las grandes plataformas fueron contruidas con rellenos estructurados, los edificios (palacios y templos) contruidos encima de estos estaban hechos de adobe con paramentos de tierra. Se ha podido observar el rápido deterioro de las superficies expuestas durante el proceso de excavación arqueológica. Este hecho contrasta con la buena conservación de los acabados antiguos, cada uno de los cuales se ha comprobado que duró decenas, hasta cientos de años en uso, con sólo remozamientos ocasionales. La alta durabilidad de los materiales de tierra de La Joya, a pesar de las adversas condiciones ambientales, contrasta con las características mecánicas débiles generalmente supuestas en materiales de barro, así como su susceptibilidad a meteorización a la cuál estas construcciones arqueológicas han estado sometidas por siglos. Esto originó una investigación acerca de los componentes aglutinantes que les han conferido tales propiedades a los adobes.

La presencia de hidrocarburos fósiles en la costa del Golfo llevó a la hipótesis de que los derivados del petróleo podrían haber estado presentes en su uso para estabilizar las construcciones de barro [3]. Los resultados de los análisis químicos de extractos orgánicos confirmaron que el betún se había añadido a las antiguas muestras de construcción [4].

La importancia de identificar el aporte aglutinante en la época precolombina arquitectura no sólo reside en entender qué ha hecho posible que durante miles de años una tradición de construcción de tierra cruda en un ambiente de trópico húmedo pudiera permanecer en pie, un tema que no sólo es relevante para la historia de la tecnología sino por las posibilidades que abre en la conservación de restos arqueológicos y su potencial aplicación a la construcción moderna [5-7].

Los requerimientos de construcción para la conservación y restauración del patrimonio arquitectónico denotan la necesidad de replicar las técnicas constructivas a través de muestras de ladrillo de barro experimental fabricadas de acuerdo con la evidencia de procedimientos antiguos para evaluar la cohesión del aglomerante con el objeto de mejorar las propiedades mecánicas mediante el uso de modernos agregados compatibles con el sistema constructivo.

En las últimas décadas, se ha presentado un auge entre las capacidades tecnológicas dentro del campo de la Ciencia de Materiales que interactúan directamente con la arqueología (Figura 1.2). Tales alcances se han manifestado en la conformación e impulso de nuevos proyectos cuyo fin es establecer el desarrollo del conocimiento científico.

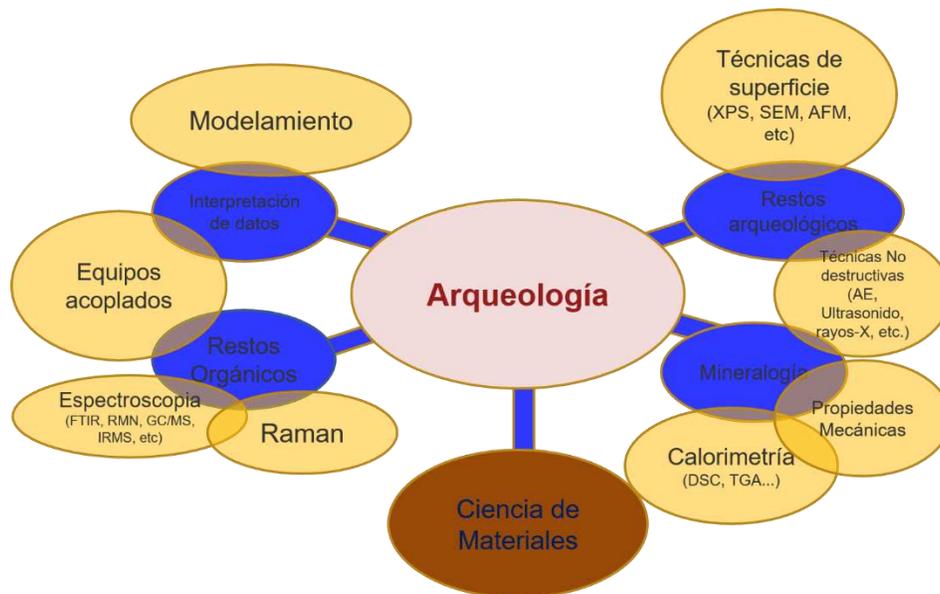


Figura 1.2.- Alcances tecnológicos de la arqueología dentro de la Ciencia de Materiales.

2.- El adobe como elemento constructivo

El uso de la tierra como material de construcción se remonta a los inicios mismos de la humanidad, siendo el barro uno de los primeros materiales que domina para protegerse de las inclemencias del medio ambiente cerrando habitaciones para resguardarse. Los ladrillos de barro fueron los elementos de construcción utilizados para la edificación de las ciudades antiguas y hoy en día se exploran para comprender los patrones en el proceso constructivo. Dichos materiales poseen información valiosa sobre su fabricación y las formas en que se utilizaron y en la aplicación final en las estructuras [8]. La primera evidencia de que la tierra se transformó en un ladrillo fue encontrada en la cuenca superior del Tigris y se remonta al 7500 a. C. [9]. Desde entonces, los ladrillos a base de tierra se han empleado considerablemente a lo largo de la historia creando magnificas estructuras como la Gran Muralla China, templos en Egipto, e innumerables pirámides en Mesoamérica [8,9].

La manufactura y manejo del adobe requiere de un conocimiento de cada uno de sus complementos y de todo el sistema térreo para obtener una aplicación adecuada. Al ser la tierra el principal componente es vital conocer sus propiedades físicas, químicas y biológicas y su relación intrínseca de sus componentes minerales y vegetales. El adobe, como material de construcción, exhibe las ventajas de una tecnología simple acompañada de una mínima inversión, un material cuya aplicación es muy destacada y tiene un desempeño satisfactorio debido a todas las características, propiedades y beneficios que éste proporciona. Sin embargo, el adobe es un material que sufre diversos efectos de degradación (mecánica, meteorización, etc) por afectaciones que son originadas por el medio ambiente y el clima, que comprometen las distintas propiedades físicas y mecánicas de las piezas.

El adobe es una palabra con varios significados, el primero y más común es "ladrillo de lodo secado al sol", el segundo, "formación de lodo", y el tercero es simplemente "ladrillos de lodo". El término de adobe viene del egipcio "thobe" (ladrillo) traducido en árabe "ottob", convertida "adobe" en español y algunas veces llamado "toub" en francés. Una de las grandes ventajas del adobe es la flexibilidad en sus modos de producción y su simplicidad de puesta en obra.

Los ladrillos de adobe quizá son el material manufacturado más antiguo en el área de la construcción, la palabra por sí misma es española, pero proviene de varias palabras del árabe que significan: mezclar o uso sin asperezas [10].

El adobe es un elemento de tierra sin cocer utilizado principalmente para la construcción, el mismo es un bloque macizo de barro, obtenido de la mezcla de tierra arcillosa y arenosa en diferentes proporciones y tamaños, en algunos casos adicionando fibras u otros agregados que sería el elemento estabilizador [1,10-12]. Hoy en día existen diferentes estudios e investigaciones en el campo de la elaboración del adobe, estos para mejorar y garantizar la resistencia del mismo, sugiriendo porcentajes de arena, arcilla, fibra y agua para la mezcla ideal para su elaboración, consiguiendo con ello grandes mejoras en la mezcla. Con el objeto de reforzar o estabilizar los adobes para obtener mejoras en sus propiedades, comúnmente se han agregado aditivos o refuerzos tales como las fibras vegetales o animales, las cuales constituyen unos de sus principales elementos. El uso de aditivos es conocido por fuentes históricas y tradiciones vernáculas, y su efecto ha sido bien atestiguado, como el mucílago de nopal, betún, aceite vegetal, alquitrán, etc. añadidos a la tierra para mejorar la cohesión [13-16].

2.1.- Composición y dosificación para la fabricación del adobe tradicional

El porcentaje y la relación de arcilla y arena del suelo son de gran importancia para el adobe debido a que, si no hay suficiente arcilla en la mezcla no se conseguirá la cohesión necesaria de todas las partículas para soportar las acciones a las que estará sometido, y se desmoronará. Por el contrario, si no hay suficiente arena, el adobe se fisura por retracción de la arcilla durante el proceso de curado. Pero de la misma manera el porcentaje de arcilla, arena, fibra y agua dependerá en gran parte de las propiedades del suelo, del objeto que se quiere construir y de su tamaño [17]. La manufactura de ladrillos de adobe se remonta aproximadamente al año 7000 a. C cuando éstos solían estar en forma de bloques secados al sol. Desde entonces diversas modificaciones se han llevado a cabo a través de los años, sobre todo en la composición y en los procedimientos de fabricación de los ladrillos de barro. Actualmente se fabrican principalmente de arcilla y arena mezclada en proporción adecuada con agregados aglomerantes con el fin de aumentar la cohesión y consolidar el ladrillo [18].

2.2.- Proceso para la elaboración del adobe tradicional

La tierra que se utiliza para este propósito normalmente es conseguida de la misma zona donde se va a edificar; se suele aprovechar la tierra de desbanque o cuando se va a generar el terraplén para la edificación. El proceso consiste en el moldeado del barro, seguido de un proceso de secado, el que se lleva a cabo con el sol. La elaboración de ladrillo de adobe secado al sol, requiere, quizás, de algunos conocimientos especializados, sin embargo, cualquier individuo en el mundo antiguo habría tenido los fundamentos esenciales para fabricarlos. Sin entrar en detalles demasiado técnicos, la fabricación de ladrillos consta de pasos básicos sencillos que no requieren de instrumentación ni procesos especializados [18,53].

Extracción de la tierra

Una de las mejores maneras de escoger un lugar adecuado para la extracción de la tierra y para su posterior elaboración es la selección de la cantera por su coloración, ya que por la experiencia adquirida de muchos de los fabricantes de estos elementos constructivos es poco conveniente la tierra de color oscura, éstos contienen poca arcilla y gran cantidad de materia orgánica, es decir no está lo suficientemente erosionado, lo que no sucede con la tierra de coloración clara.

Remojo de la tierra

Una vez extraída y apilada la tierra en su lugar de elaboración, a ésta se le adiciona agua en una cantidad requerida o hasta conseguir una mezcla húmeda del volumen seco, dando lugar al barro, dejando curar dicha mezcla, es decir reposar al sol por aproximadamente un día, para eliminar excedentes de agua y así conseguir la consistencia adecuada.

Mezclado del barro

La tierra debe ser mezclada, sobre una superficie plana sin vegetación o dentro de un hoyo en la tierra, con suficiente agua como para poder revolverla con la pala. Este proceso también se la puede realizar con un animal de carga ya que el mezclado del barro es un proceso muy pesado. En esta etapa es donde todas las partículas se deben mezclar tanto arcillas como arenas, o en algunos casos se realiza la adición de la paja u otro estabilizante.

Moldeado

Este procedimiento consiste en colocar el material preparado en un molde asentado en el suelo, la mezcla será comprimida perfectamente a mano se procede a retirar el molde (a veces transcurrido de 5 a 10 minutos como máximo). La superficie destinada al moldeado y posteriormente vaciado debe ser una superficie limpia, plana y libre de impurezas.

Vaciado

Una vez colocado la mezcla del material en el molde se procede a desmoldar cada una de las piezas con cuidado, sin dañar las esquinas o alguna superficie, a pesar que esto se puede arreglar con barro, es muy importante que la pieza de adobe salga en buena condición para que adquiera la resistencia necesaria. Una recomendación por parte de los fabricantes para la fácil extracción de las piezas es lavar o humedecer los moldes.

Pre-secado

Consiste en colocar los ladrillos por separados después de desmoldarlos y procurar que todos sus lados se encuentren por cierto tiempo al sol para que el adobe alcance cierta consistencia. El pre-secado se lleva a cabo moviendo el ladrillo por intervalos de tiempo cortos procurado que el secado solar cubra toda el área del material.

Secado

Una vez completado el pre-secado, pueden ser apilados y dejados secar por unas dos semanas al sol, el lugar debe estar cubierto para evitar el contacto con el agua en caso de lluvia. De manera similar al pre-secado, pero en periodos de tiempo más largos, cada pieza se debe voltear para garantizar el completo secado.

Apilado

Una vez secado y transcurrido una o dos semanas, a partir de su elaboración estas se pueden proceder a apilar, si se cuenta con un lugar amplio no requieren ser apiladas si no colocarlas una tras otra de igual manera para garantizar su resistencia.



Figura 1.3.- Proceso típico de manufactura de ladrillos de adobe: a) Preparación y mezclado, b) Mezclado manual, c) Moldeado, d) Vaciado y enrasado, e) Primer secado y f) Desmolde y secado.

2.3.- Ventajas y desventajas de las construcciones con adobe

Las técnicas constructivas basadas en tierra como el adobe, forman parte de la arquitectura vernácula característica de una localidad. Para la mayoría de los pueblos que lo utilizan, significan tecnologías económicas por los recursos empleados para la construcción de las edificaciones; aunado a esto, el factor ambiental es una de las bondades significativas [19]. La construcción de una vivienda con adobe no causa efectos negativos con el medio ambiente. Sus ventajas se extienden al confort, aislamiento acústico, térmico, entre otros. Por otro lado, una de sus desventajas importantes es la baja en su capacidad mecánica para soportar grandes cargas, movimientos sísmicos, etc. Las ventajas y desventajas de la aplicación del adobe en construcción son mencionadas a continuación:

VENTAJAS

Materia prima abundante

La materia prima usada para la elaboración del adobe es abundante ya que esta se extrae directamente de la excavación de la cimentación o desbanques realizados para la construcción.

Demanda energética

Al no necesitar ningún proceso industrializado, el adobe es considerado uno de los materiales más ecológicos para la construcción, es decir el consumo energético es casi nulo, con esto se reduce la huella de carbono en comparación con la elaboración con otros materiales en la actualidad.

Inercia térmica y aislante acústico

Al poseer inercia térmica, ayuda a regularizar las temperaturas ambientales, con ello reduciendo las demandas energéticas necesarias para acondicionar o refrescar el ambiente, de la misma manera al poseer paredes gruesas funcionan como aislantes acústicos que garantizan el confort adecuado en los ambientes.

Proceso en la construcción con adobe

No se requiere de mano de obra calificada ya que es un sistema constructivo tradicional, no se requieren procedimientos complicados ni uso adicional de maquinaria para su ejecución en obra.

DESVENTAJAS

Vulnerabilidad a la humedad

La principal desventaja de este material es la humedad ya que esta tiene gran capacidad de absorción de humedad del suelo por capilaridad de esta manera afecta directamente a la estructura.

Vulnerabilidad a la sismicidad

Las construcciones de adobe debido al peso y altura de la estructura se consideran vulnerables a cualquier movimiento telúrico o sísmico.

Construcción vertical

Con relación al manejo de este material es muy pesado y se requiere de un mayor número de personas para colocarlo en grandes alturas en consecuencia esto es una desventaja para trabajar con grandes alturas.

3.- La tierra

El adobe es un ladrillo secado al aire hecho de una mezcla de tierra colocada en un molde y que contiene una mezcla de arcilla, arena y limo, y que terrenalmente contiene paja o un estabilizador. Siendo la tierra el principal elemento constitutivo del adobe es importante conocer sus propiedades ya que estas afectarán el comportamiento final del material térreo. En México, el uso de la tierra cruda como elemento constructivo se remonta desde tiempos precolombinos, se ha aplicado elaborando sistemas de tierra a través de distintas técnicas y tecnologías que han sido adaptadas según las exigencias y materia prima local que presentaba en su momento la localidad, razón por lo cual, las normas sobre tierra son constantemente estudiadas y actualizadas. Se han establecido cinco factores que dan origen al suelo: material original, clima, organismos, topografía y tiempo (Figura 1.4).

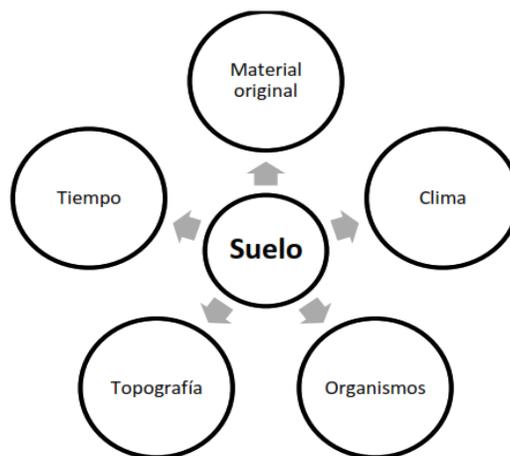


Figura 1.4.- Factores involucrados y determinantes para el origen del suelo.

La materia prima para manufacturar los ladrillos de adobe se encuentra en los suelos, la tierra virgen en las capas superficiales. Las tierras apropiadas para ser utilizadas deben presentar al menos entre 20 y 30% de arcilla, elemento aglutinador de la tierra, y 60% de grava y arena, agregados que le confieren resistencia y estructura al ladrillo. Debido a esto, los suelos de donde la tierra es tomada debe ser cuidadosamente analizada.

Los componentes sólidos de los suelos consisten en materia orgánica e inorgánica. Las partes inorgánicas se forman a partir de roca madre residual y minerales madre como el cuarzo (silicatos), feldespato, mica, cal, yeso, minerales de arcilla, sales solubles en agua, óxidos de aluminio y planchar [11]. Los suelos inorgánicos o minerales se pueden dividir en cuatro tipos principales: grano grueso consistente en grava, arena, limo, y grano ultrafino principalmente arcilla. Algunos de sus componentes se describen a continuación:

Gravas

Son el componente de los suelos más estables en presencia del agua, pero carecen de cohesión secas, por lo que requieren de los limos y las arcillas para formar una estructura estable en los suelos. Son mayores a 2.0 mm.

Arenas gruesas

Son el componente estable y sus propiedades mecánicas no se alteran sensiblemente con el agua. Miden de 2.0 a 0.25 mm.

Arenas finas

Son granos minerales que pasan una malla de 0.5 mm y son retenidas por otra de 0.02 mm. Agregados artificiales (arenas, confitillos, gravas.) Se obtienen de la disgregación mecánica de rocas mayores, como el basalto (trituration, cribado y selección).

Limos

No tienen cohesión por ser secos y con una resistencia a la fricción menor que las arenas, pero en presencia de agua su cohesión aumenta, además de tener variaciones en volumen debido a que se contraen y se expanden. 0.05 a 0.002 mm.

Arcillas

Son el componente que da cohesión a los suelos uniendo a los suelos más gruesos, pero en las arcillas húmedas se presentan cambios muy severos en la estructura del suelo, por su inestabilidad a diferencia de las arenas. Éstas son menores a 0.002 mm.

3.1- Estabilizadores y refuerzos

La tierra necesita de diversos tipos de estabilizadores para la consolidación y permanencia de su estructura en el adobe. Estos agregados le confieren consolidación y cohesión al material final para su mejor desempeño mecánico. Entre estos estabilizadores se encuentran los estabilizadores físicos, los cuales son utilizados para mejorar la composición de la tierra produciendo cambios físicos, obteniendo una adecuada granulometría a través de la incorporación de materiales cohesivos y granulares a la muestra original de la tierra, hay varios métodos. La estabilización química sucede cuando se agregan productos químicos, los cuales reaccionan con los componentes de la tierra buscando cambiar o mejorar algunas características se dice que el cemento y el bitumen como estabilizadores son buenos para barro arcilla sin embargo esta regla no toma en consideración el tipo de arcilla. La estabilización mecánica será aquella que, con la compactación del suelo mediante el uso de prensas mecánicas o manuales, se logra densificar el mismo con la cual aumenta su capacidad portante, cohesión entre sus partículas de barro y mejora su estabilidad obteniendo así suelos menos deformables [11,12].

Por otro lado, los estabilizadores que interactúan con los componentes del suelo suelen clasificarse según su origen mineral, sintético o vegetal.

De origen mineral

Cal: La cal es el resultado de la calcinación de piedras calizas, también conocida como carbonato de calcio. El tipo de cal que se puede conseguir va a depender de la composición de la roca caliza Mejora la permeabilidad del producto, además mejora la resistencia a la compresión (Figura 1.5a).

Cemento: Es material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas. las cuales confieren la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto, el cemento al ser un conglomerante hidráulico es utilizado en la conformación de hormigones debido a su durabilidad, capacidad aglutinante y baja permeabilidad. El cemento optimiza las propiedades de permeabilidad y compresión de los bloques de tierra razón por la cual se lo considera excelente material (Figura 1.5b).

Yeso: El yeso es un material blando y soluble en agua, razón por la cual no es recomendado el empleo al exterior. Debido a su facilidad de deshidratación parcial a bajas temperaturas es un producto apto para la construcción. En la actualidad se emplea para fabricar tabiques, bóvedas, enlucidos, pavimentos estucos, molduras, etc. (Figura 1.5c).

Productos puzolánicos: La puzolana o ceniza volcánica es un material silíceo-aluminoso generalmente de origen natural, al igual que el pómez o pumita que también son consideradas como materiales puzolánicos naturales disponibles en nuestro medio (Figura 1.5d).

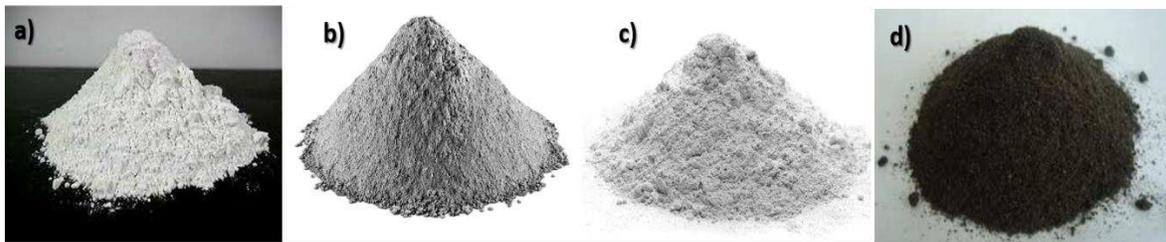


Figura 1.5.- Estabilizadores de origen mineral: a) Cal, b) Cemento, c) Yeso, d) Ceniza volcánica.

De origen sintético

Productos asfálticos: Los productos “bituminosos son aquellos que poseen características de unión, se consideran como materiales pertenecientes a esta categoría los que contienen en su composición asfaltos naturales, betunes asfálticos de penetración, betunes asfálticos de oxidación, alquitranes o breas. Los materiales bituminosos procedentes del petróleo son conocidos como asfaltos, betunes asfálticos o bitumen (Figura 1.6).



Figura 1.6.- Estabilizadores de origen sintético: Emulsiones asfálticas.

De origen vegetal

Aceite de maíz: El aceite de maíz se extrae del germen del maíz, y su uso principal es para cocinar. También es un ingrediente clave de la margarina y otros alimentos procesados. Además de servir como un aceite no tan ideal para cocinar, el aceite de maíz tiene varios usos industriales, como una adición al jabón, pomada, pintura, tinta, textiles e insecticidas. También en ocasiones funciona como un portador para las moléculas de medicamentos en productos farmacéuticos. El aceite de maíz contiene 12.7 % de grasas monoinsaturadas, 58.7% de grasas poliinsaturadas y 24.2 % de grasas saturadas (Figura 1.7a).

Aceite de linaza: El uso de estas resinas se da en el sector de la industria entre otras para la elaboración de barnices para pinturas con el fin de mejorar las características de impermeabilización de la misma. El aceite de linaza confiere propiedades impermeabilizantes a la mezcla de tierra y mejora la resistencia a compresión. Al optimizar las propiedades de compresión y permeabilidad de los bloques de tierra se lo considera muy bueno (Figura 1.7b).



Figura 1.7.- Estabilizadores de origen vegetal: a) Aceite de maíz, b) Aceite de linaza.

Los agregados o estabilizantes se adicionan a la tierra en forma de barro durante la mezcla para manufacturar los adobes. A través de estos elementos la tierra se consolida aumentando su cohesión y resistencia ya que algunos estabilizadores actúan como refuerzos en el material formando un composito.

Cascara de arroz: Conocida también como “pajilla” es un producto de origen vegetal, el mismo se considera un desecho de la producción del arroz. La composición química de la cáscara de arroz es similar al de la madera, contiene compuestos como la celulosa, lignina, resinas y una alta proporción de sílice (18%). Se considera bueno, ya que mejora la resistencia a la compresión de manera mínima, y la permeabilidad del barro (Figura 1.8a).

Cabuya: La cabuya es una fibra vegetal obtenida mediante la explotación del denominado penco, las hojas de esta planta son gruesas y carnosas, pueden alcanzar hasta 4 m de diámetro donde almacenan gran cantidad de agua. Esta planta entre los 7 y 10 años de vida emite una roseta de hasta 10 m de altura. Al ser una fibra vegetal se conoce que las mismas al mezclarse con tierra ayudan a mejorar las condiciones de retracción de las piezas. Así mismo ya se mencionó que el uso de esta fibra podría mejorar la resistencia a compresión del bloque de tierra, razón por la cual se le cataloga muy bueno (Figura 1.8b).

Aserrín: Son partículas o residuos que se obtienen cuando piezas de madera se someten a cortes mediante máquinas manuales o eléctricas. Este estabilizante al ser fibras tiene los mismos efectos que la cabuya (Figura 1.8c).

Zacate Pangola: Es un pasto con la inflorescencia digitada (con ramas que parecen espigas y no se ramifican más, con las espiguillas adpresas al raquis), sin aristas, espinas o cerdas, a veces con varios verticilos, las espiguillas en pares, que se desprenden enteras (incluyendo las glumas), con un lema extra que parece una gluma y representa una flor infértil, cada espiguilla con una sola flor fértil, y la primera gluma muy pequeña (Figura 1.8d) [12, 13].

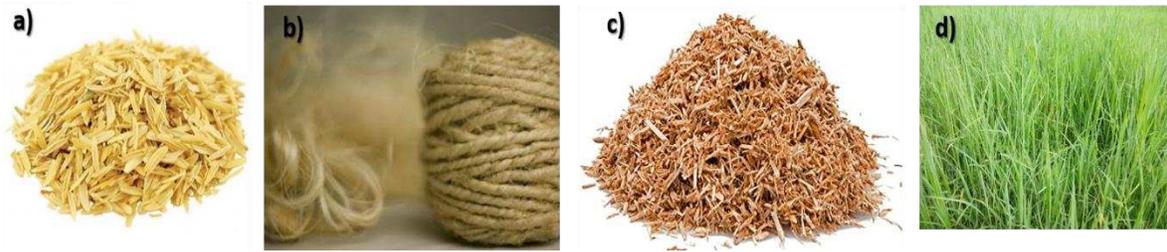


Figura 1.8.- Estabilizadores de origen vegetal: a) Cascara de arroz, b) Cabuya, c) Aserrín, d) Zacate Pangola.

4.- Propiedades mecánicas de adobes

La tierra es cada vez más valorada como material de construcción. Dado el creciente interés por este antiguo material, y ante la falta de un marco legal muchos países intentan normalizar su uso para resolver los problemas actuales derivados de la ausencia de una normativa que permita el uso de las técnicas de construcción con tierra cruda [20-22]

En el campo de aplicación de la edificación con tierra son muchos los países que en los últimos años trabajan en la normalización destacan Colombia (2005) y España (2008), con la publicación de nuevas normas; Chile, Ecuador, México y Nicaragua, desarrollando futuras normas; o Perú mejorando documentos ya existentes. Es por ello, que surge la importancia de caracterizar los adobes de una manera lo más completa posible, ya que estos materiales no solamente están influidos por un tipo de carga sino también por una combinación de ellas (Flexión y Compresión). Es importante mencionar que estos materiales no solo están sujetos a cargas, sino que tienen que funcionar en un medio relativamente agresivo, pues su principal aplicación es a la intemperie.

Los suelos cambian significativamente en su consistencia y constitución elemental según el clima, el relieve y la naturaleza geológica, por lo que sus propiedades varían considerablemente. Además, las propiedades de un suelo evolucionan según la organización de sus partículas durante el proceso sedimentario y la profundidad a la que se extrajo. De esta manera se observa una gran diversidad de suelos que pueden ser utilizados como materia prima para fabricar materiales de construcción no industriales [23].

Tomando en cuenta lo anterior, es indiscutible que la calidad de adobes depende en gran medida de la composición física y química del material, de su composición mineralógica y del proceso de fabricación [24]. Existe una gran variedad de literatura sobre el impacto de agregados sobre las propiedades físicas y mecánicas de ladrillos de tierra comprimida, pero la información es limitada en cuanto al análisis de la microestructura ligada a sus características físicas y a su comportamiento mecánico del edificio.

El material de refuerzo más empleado, y quizás el más estudiado, en los sistemas constructivos a base de tierra como los adobes, es la fibra natural entre éste la paja. La paja es una fibra natural ampliamente extendida en todo el mundo y se puede cosechar y recolectar de una manera simple. La adición de fibras en los materiales de adobes es aún debatida, las opiniones de diferentes autores divergen; algunos destacan que podría prevenir el agrietamiento, unos más indican que la degradación de las fibras puede conferir una disminución en la resistencia mecánica de los bloques de adobe [25].

El agregado natural afecta de manera directa el comportamiento mecánico final del adobe. Por ejemplo, Bouhicha et al. [26] realizaron pruebas mecánicas en modo de compresión uniaxial en materiales provenientes de cuatro suelos diferentes reforzado con fibra de paja encontrando que la resistencia a la compresión aumentó en un 10-20% con fracciones de fibra de hasta 1.5% disminuyendo hasta un 40% a partir de entonces. Sin embargo, Yetgin et al. [27] realizó pruebas similares de cuatro suelos reforzados con hasta 3.84% de fibra de paja sin notar aumento significativo en la fuerza compresiva concluyendo que las fibras no deberían de agregarse por encima del 0.05% en peso.

Algunos autores han empleado incluso estiércol de vaca en sistemas en adobes con el objetivo de incrementar su consolidación y por ende propiedades mecánicas. Millogo et al [28] menciona que el estiércol de vaca contiene fibras vegetales como componente principal que exhiben una superficie rugosa, lo que mejoraría la adherencia entre estas fibras y la tierra en adobes lo que podría tener un efecto positivo en las características físicas y mecánicas. Encontraron que con una adición máxima del 3% las resistencias a compresión y a flexión se incrementaron 2.1 MPa a 2.8 MPa y de 0.55 MPa a 0.75 MPa respectivamente.

4.1.- Comportamiento mecánico

Al pasar por cada fase del ciclo de vida, el material de construcción necesita para cumplir con los requisitos de construcción sostenible. Estos requisitos se describen a través de parámetros relevantes que se determinan a través de procedimientos de prueba estandarizados. Por ejemplo, un material de construcción necesita tener suficiente resistencia a la compresión y a la flexión para ser adecuado para soportar la carga. El cumplimiento de los criterios de prueba garantiza que las cualidades requeridas para una determinada fase del ciclo de vida han sido alcanzadas. Sólo entonces el material de construcción o elemento constructivo será apto para su uso.

Los valores de resistencia mecánica a compresión mencionados en las referencias bibliográficas mencionan intervalos de entre 0.6 y 8.3 MPa, sin embargo, los valores más frecuentes de resistencia en adobes se enfocan en intervalos de entre 0.8 y 3.5 MPa [26]. Algunos autores incluso dan valores frecuentes de entre 0.49 a 4.9 MPa [29]. Estos valores no solo de la cantidad y tipo de arcilla sino también de la distribución granulométrica del limo, arena y agregados gruesos, así como del método de preparación y compactación [29-31].

La resistencia a la compresión de ladrillos de barro (adobe) reforzados con fibra (paja) es mayor que los adobes tradicionales; por lo tanto, los reforzados son más resistentes a los movimientos telúricos por que la presencia de fibras en los ladrillos de adobe proporciona flexibilidad y consolidación a las estructuras. Para determinar si un material térreo es adecuado para la construcción, se ha tomado como criterio que tales materiales deben tener una resistencia a la compresión de 1 N/mm^2 (1 MPa) o en algunos países como Australia solicitan un promedio de 2 N/mm^2 (2 MPa). Otras recomendaciones específicas establecen distintos criterios, teniendo en cuenta no sólo la compresión resistencia sino también resistencia a la flexión.

La norma peruana para adobes propone una resistencia a la compresión mínima de 1.2 N/mm^2 (1.2 MPa) y una resistencia mínima a la flexión de 0.4 N/mm^2 (0.4 MPa) (específicamente para áreas sísmicas). Por su parte, la norma española propone entre 0.75 N/mm^2 (0.75 MPa) para adobes de alta resistencia a la compresión [32].

4.1.1.- Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión C_s de un material de construcción de tierra se expresa generalmente como el esfuerzo que conduce a la falla del material causada por una fuerza F actuando verticalmente sobre la sección de carga transversal A .

$$C_s = \frac{F}{A} (N/mm^2)$$

De la manera más general, la resistencia a la compresión en seco C_s se determina usando un mínimo de tres especímenes por prueba. Los especímenes se fabrican en el laboratorio con la ayuda de moldes cúbicos de acero con una longitud de borde de 20 cm. La dirección de la carga aplicada durante la prueba debe ser idéntica a la dirección del trabajo de compactación aplicado durante la producción de los especímenes (apilamiento). Se coloca la muestra en los platos de la máquina y se aplica carga a la muestra seca en una prensa hasta que ocurra la falla (Figura 1.9).



Figura 1.9.- Prueba a compresión: a) antes, b) después de la prueba [11].

Después de que la carga final se ha alcanzado, el espécimen exhibe un patrón de falla que es típico de una expansión lateral no confinada: en lugar de comprimirse, la muestra se desplaza a ángulos de 45° con respecto al eje longitudinal provocado por una rotura por esfuerzo cortante (Figura 1.10). Este patrón de falla es típico de los materiales frágiles que tienen una resistencia al corte mucho menor que la resistencia a la compresión.

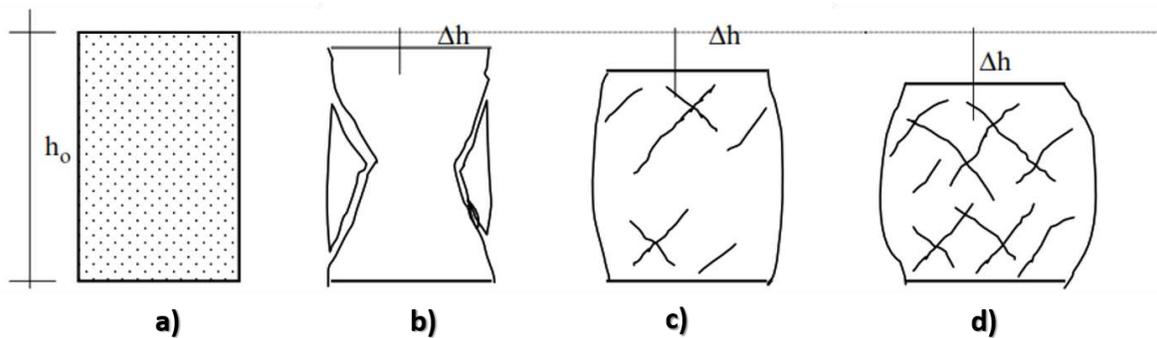


Figura 1.10.- Tipos de fractura: a) antes de la prueba, b) Fractura frágil (mínimo Δh), c) Fractura plástica, d) Flujo plástico (máximo Δh) [11].

Respecto al comportamiento de deformación bajo carga externa los ladrillos de adobe deben exhibir un mínimo módulo de elasticidad (E) de 750 N/mm^2 (750 MPa). Generalmente los ladrillos de adobe que presentan resistencia a la compresión de $\geq 2 \text{ MPa}$ cumplen este requisito.

4.1.2.- Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción T_s de un material de construcción de tierra generalmente se puede expresar como la tensión determinada en un ensayo de tracción como el cociente de la cantidad fuerza máxima de tensión F sobre la sección transversal A .

$$T_s = \frac{F}{A} (\text{N/mm}^2)$$

En base a su fuerza cohesiva, estos materiales a base de tierra también poseen resistencia a la tracción. Sin embargo, en comparación con su resistencia a la compresión, es baja y, por lo tanto, comúnmente no se incluyen en los cálculos para elementos de construcción que experimenta carga durante su aplicación. Para este caso, la fuerza cohesiva es comparable a la fuerza de tracción axial.

Para la determinación indirecta de la resistencia a la tracción de materiales con tendencias de fractura frágil tales como la roca sólida, arcillas puras firmes, margas, así como algunos suelos ricos en arcilla, la prueba de resistencia a la tracción por división (también conocida como la prueba brasileña) se puede realizar con el apoyo de muestras cilíndricas (Figura 1.11).

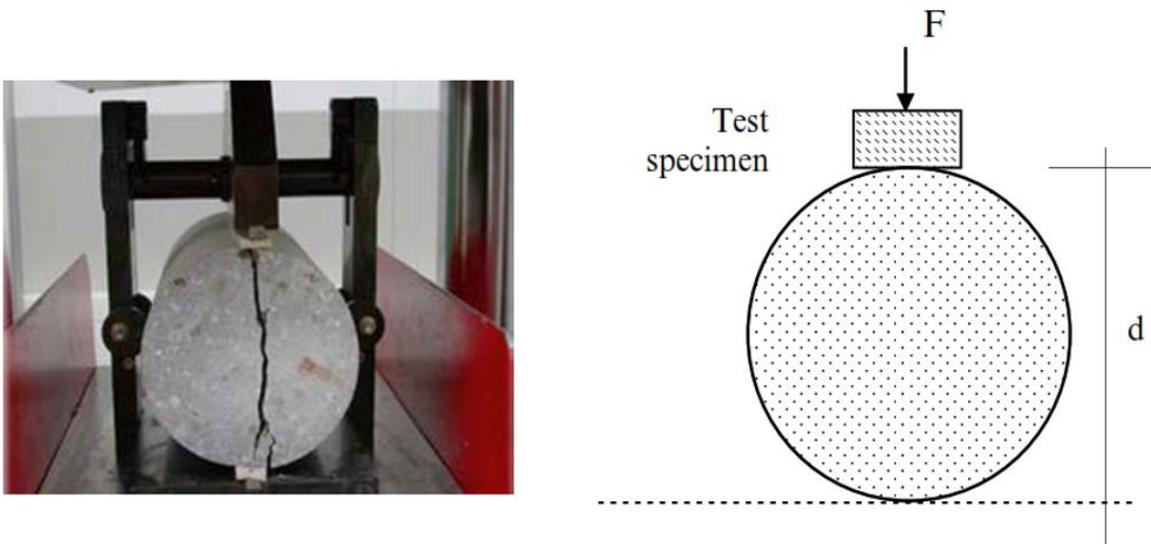


Figura 1.11.- Prueba a tensión (prueba brasileña) [11].

Es claro que para cualquier material con aplicación en la construcción la resistencia a la tracción (esfuerzos de tensión) directa del elemento contractivo carece de importancia mecánica porque las estructuras de tierra no deben estar bajo tensión.

4.1.3.- Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión F_s se activa en los materiales de construcción de tierra cuando las cargas se aplican perpendiculares al plano haciendo que el elemento de construcción actúe como un panel. Indica cuánta carga se debe aplicar para romper un material de construcción al ser doblado.

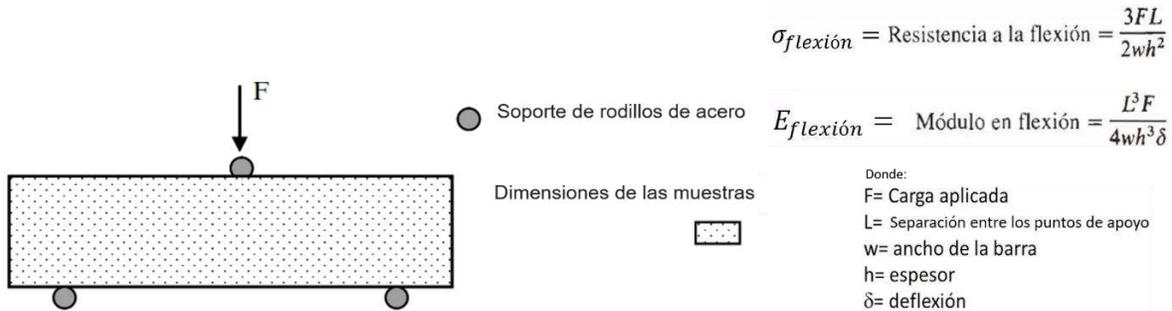


Figura 1.12.- Prueba a flexión.

Las muestras empleadas para determinar la resistencia a la flexión de la tierra se preparan de la misma manera que para el ensayo de resistencia a la compresión en seco. Ambas pruebas, incluso, se pueden combinar en una serie de experimentos. Los valores promedios de la resistencia a la flexión de las muestras de tierra según se encuentren en el rango de $F_s = 0.36\text{--}0.63 \text{ N/mm}^2$ (MPa). Es notable indicar que los valores más altos corresponden a muestras con agregados de fibra.

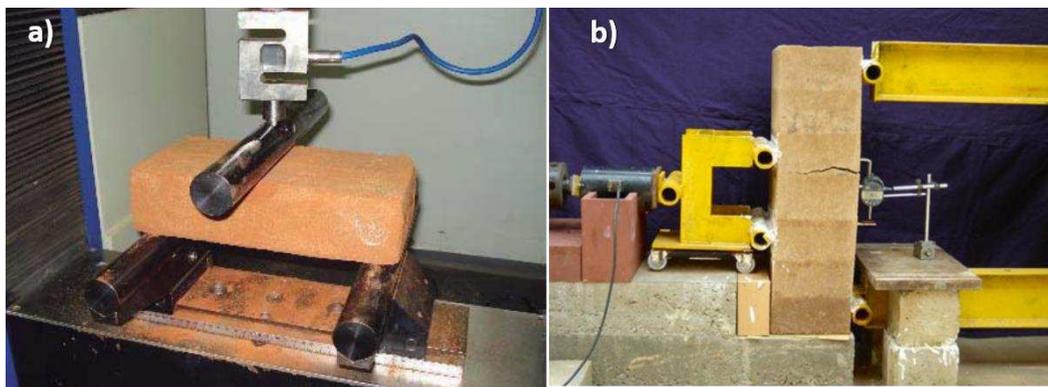


Figura 1.13.- Prueba a flexión: a) Horizontal de 3 puntos, b) Vertical de 4 puntos [11].

4.1.4.- Resistencia al Impacto

Las pruebas mecánicas pertenecen al grupo de pruebas mecánicas dinámicas. Los ensayos de impacto se utilizan para la determinación del comportamiento de un material a velocidades de deformación más altas. Los Péndulos clásicos determinan la energía absorbida en el impacto por una probeta estandarizada, midiendo la altura de elevación del martillo del Péndulo tras el impacto (Figura 1.14). Generalmente el ensayo de impacto consiste dejar caer un pesado péndulo, el cual a su paso golpea una probeta que tiene forma paralelepípedo ubicada en la base de la máquina. La probeta se rompe en un solo golpe.

Los principales parámetros que influyen en el ensayo.

$$\Delta Ep = mg (h_o - h_f)$$

En donde: Ep : energía potencial gravitacional, m corresponde a masa, g es gravedad, h_o refiere a la altura inicial y h_f a la altura final

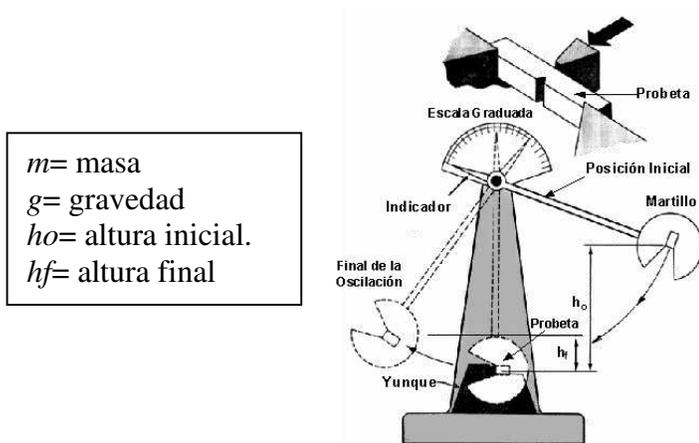


Figura 1.14.- Ensayo de impacto (Péndulo de Charpy).

Los sistemas de tipo pendular, como el péndulo Charpy utilizan la fuerza gravitatoria para acelerar una masa e impactar sobre la probeta. Esta técnica se encuadra en las velocidades medias de deformación. A través de esta técnica experimental es posible obtener una medida cualitativa de la energía de fractura, la historia de fuerzas aplicadas y el desplazamiento del punto de aplicación de la carga, permitiendo con estos datos determinar la tenacidad de fractura.

4.2.- Meteorización de adobes

Todos los materiales son susceptibles de meteorización. Los materiales pétreos, como lo es en el caso de los adobes sufren de alteraciones, cuando se encuentran sometidas a las acciones de los agentes atmosféricos, estos agentes producen cambios en los materiales a diversas velocidades y con ellos influyen en sus propiedades disminuyéndolas. Estos procesos son conocidos como meteorización, el cual se encuentra definido como fragmentación física (desintegración) y alteración química (descomposición) de las rocas de la superficie terrestre, o cerca de ella. Esto sucede cuando los Materiales no están en equilibrio con la temperatura, la presión y la humedad en la interface atmosfera-litofera.

Existen ciertos factores que se encuentran presentes en la meteorización de cualquier material, los cuales son el clima, el material, la actividad biológica, la topografía y el tiempo; de estos factores el tiempo es el único que se manifiesta como variable única y absoluta. La meteorización suele considerarse como un proceso lento, pero de efectos muy notorios debido al tiempo que esta lleva actuando. Los factores de alteración principales se encuentran vinculados con los procesos de meteorización creando con ello fenómenos encargados de la alteración de la meteorización.

En la actualidad numerosas construcciones de adobe presentan una amplia gama de fenómenos de meteorización que deben ser estudiados e identificados para proponer intervenciones capaces de resolver estos problemas, garantizando la supervivencia de estas arquitecturas antiguas [33]. La erosión de la superficie de la pared en estructuras comunes es generalmente considerado inofensivo, sin embargo, cuando presentan agrietamientos que ponen en peligro la estructura, se considera un evento de daño significativo (Figura 1.15). La mayoría de los estudios existentes acerca del efecto negativo de la meteorización en adobes se han centrado en los ladrillos rojos y han logrado resultados considerables en cuanto a la influencia de los factores y mecanismos de meteorización; como la impregnación de agua durante la lluvia estaciones y la evaporación del agua durante las estaciones secas, las composiciones minerales de arcilla cruda y la evolución mineralógica y textural durante el proceso de cocción, la física y mecánica, así como el comportamiento a la intemperie [34].



Figura 1.15.- Daño significativo en materiales de adobe debido a la meteorización [33].

5.- Técnica No Destructiva de Emisión Acústica

La técnica de Emisión Acústica (EA) es una técnica no destructiva comúnmente usada para detectar y localizar fallas en estructuras y componentes cargados mecánicamente (Figura 1.16). Esta técnica se basa en la detección de ondas elásticas producidas por la aparición o crecimiento de un defecto en el material y la conservación de estas a señales eléctricas, las cuales se digitalizan y almacenan para su posterior análisis a través de sus parámetros característicos, en donde el umbral corresponde al nivel de detección deseado para evitar señales que no son de interés en la inspección [34].

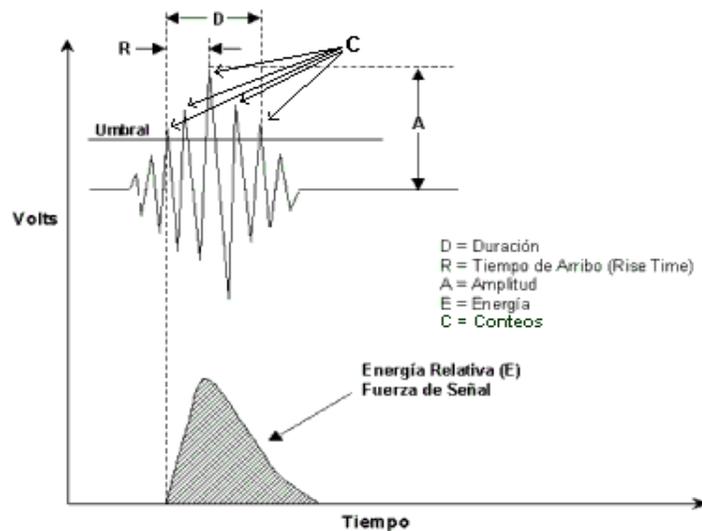


Figura 1.16.- Parámetros de la onda acústica detectada por la Técnica EA.

El fenómeno que denominado emisión acústica (EA) es producido como consecuencia de la liberación de energía elástica almacenada en el interior de un material cuando este está sometido a cierto nivel de esfuerzos. Dichos esfuerzos pueden ser provocados al aplicar cargas, otros estímulos o unas condiciones ambientales severas y pueden producir cambios en la estructura interna del material, como el crecimiento de grietas internas, deformación local plástica, corrosión o cambios de fase. Esta energía se propaga a través del material en forma de ondas elásticas y puede ser captada mediante sensores sensibles a dichas ondas. Como resumen, la observación de dichas ondas permitiría llegar a detectar fallos internos en el material y predecir un posible modo de fallo del equipo o activo, realizando así un eficaz mantenimiento predictivo [34].

Los parámetros representativos de una señal acústica son:

Amplitud máxima: Es el valor máximo del voltaje de un evento aislado. Es fundamental, ya que está relacionado con la magnitud del propio evento. Puede variar entre pocos microvoltios y varios voltios. Generalmente es expresado en decibeles de emisión acústica (dB).

Cuentas/golpes/eventos/ringdown counts (N): Es el número de veces que se supera el umbral. Se le llama también golpes porque es el resultado de las ondas que golpean el sensor. Es la técnica más antigua y simple para cuantificar la actividad de emisión acústica. El inconveniente es que las cuentas dependen de la resonancia del elemento transformador.

Velocidad de emisión acústica. Es una medida de la EA muy utilizada, definida como el número de cuentas o sucesos por unidad de tiempo.

Energía (E)/MARSE (Measured Area of the Rectified Signal Envelope), algunas veces conocida como cuentas de energía: es definida como el área media bajo el envolvente (área bajo la curva) de la señal rectificadas, y su valor es proporcional a la energía real de la onda de emisión acústica y a la vez, es representativa de la amplitud y la duración de la señal.

Duración: es el tiempo transcurrido entre la primera y la última señal que sobre pasa el umbral.

Tiempo de levante: es el tiempo transcurrido entre la primera señal que sobrepasa el umbral y la señal que presenta un pico máximo.

Tiempo de llegada. Es el tiempo absoluto que transcurre desde el inicio del ensayo hasta que aparece la primera señal de descubrimiento de un defecto y que puede ser captado por los sensores establecidos.

En adición, numerosos estudios han demostrado que el análisis de EA, en combinación con pruebas mecánicas y observaciones microscópicas, es una herramienta valiosa para la comprensión de la acumulación de daños en materiales compuestos. Específicamente, el proceso de falla inicia como el daño cohesivo de la matriz, la cual prosigue con la falla interfacial y termina con la fractura de la fibra.

En particular, algunos autores han mostrado que ciertos intervalos de amplitud de EA están relacionados con diferentes mecanismos de daño específico.

30-58 dB: daño de la matriz (microgrietas en la matriz, coalescencia de microgrietas, fricción matriz-matriz).

59-66 dB: desunión interfacial (fibra/matriz, manejo de fibra/matriz).

67-80 dB: fricción fibra/matriz y fibra/fibra.

81-100: ruptura de fibra y manejo de fibras.

Sin embargo, tales asignaciones pueden ser controversiales, específicamente para amplitudes intermedias y modos complejos de carga [34,35]. Básicamente proporciona información tal como: “cuando” (tiempo, parámetro de carga externa), “cuánto” (proporción), “intensidad” (amplitud, energía) y “donde” (localización de las fuentes de EA), ocurren las ondas de energía mecánica que producen los procesos de daño en diversos tipos de materiales estructurales. Si existe un desarrollo del defecto en el cuerpo, la emisión acústica revelará su existencia durante su crecimiento. Esta es una de las principales ventajas de la emisión acústica “monitoreo en tiempo real”.

5.1- Emisión Acústica aplicado a adobes

Son limitadas las referencias donde se emplea la técnica de emisión acústica en materiales basados en adobes. Sin embargo, se ha logrado monitorear elementos de adobe reforzados con fibras cortas distribuidos aleatoriamente o simples (con sensor AE y detector de deformación) en elementos de adobe de mampostería bajo carga de compresión uniaxial para predecir la situación en la curva de tensión-deformación [36,37] donde la tensión máxima y su deformación correspondiente, el punto de tensión y deformación con el módulo elástico máximo se predijeron con éxito.

Es conocido que los efectos y las propiedades físicas y mecánicas de los adobes, considerados dentro del espectro de los materiales compuestos, están sujetos a diversos factores como la naturaleza del suelo y los agregados. Por lo tanto, las propiedades van a variar dependiendo del tipo de agregado y su fracción volumétrica en el sistema térreo (Figura 1.17). Algunas de estas propiedades se reflejarán en franca mejora mientras que otras podrían sufrir una disminución. Este comportamiento mecánico, dependiente de la composición de los adobes, puede ser identificado por la técnica de emisión acústica en la secuencia del daño de los adobes durante las pruebas mecánicas (tensión, compresión, flexión, etc.) donde se obtendrán valores de inicio, propagación y desarrollo del proceso de fractura.

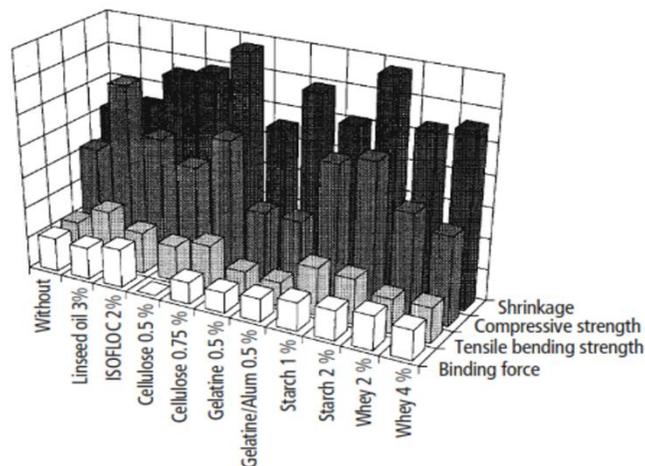


Figura 1.17.- Efecto de los agregados en los parámetros mecánicos de los adobes [12].

CAPITULO 2

METODOLOGIA

1.- Sitio arqueológico La Joya

La investigación arqueológica en La Joya se ha llevado a cabo desde 2004 como parte de un proyecto para comprender las antiguas técnicas de construcción realizadas en Mesoamérica. Las investigaciones han abarcado la petrografía de minerales, textura, composición química (FRX) y fracción de arcilla (DRX) los cuales fueron determinados para una serie representativa de muestras constructivas [38]. Los resultados preliminares del análisis de muestras arqueológicas indicaron la existencia en los adobes del sitio de una solución tecnológica que sería considerado inadecuado por los modernos estándares, ya que se encontraron pequeñas cantidades de aditivo bituminoso a un suelo compuesto principalmente de fracción fina (generalmente en exceso del 70%).

Los adobes que conforman el sitio La Joya han perdurado por siglos demostrando que la receta pre-colombina tuvo éxito durante este tiempo. Por lo tanto, se estableció como propósito de este estudio aplicar un protocolo estándar de propiedades mecánicas en ladrillos experimentales manufacturados de manera lo más similar posible a las muestras arqueológicas reales.

2.- Elaboración de ladrillos experimentales de adobe

Los materiales utilizados para la realización de esta investigación, se encuentran manufacturados por el Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM, estos materiales son muestras experimentales de barro reforzados con fibras naturales; los cuales están elaborados con lodo colado, paja picada y un material añadido o aditivo para su mejoramiento, en diversas proporciones.

La técnica de elaboración de los adobes experimentales sigue el proceso prehispánico desarrollado por la Cultura de Remojadas, que se asentó en el área del golfo de México, limitada por los ríos Antigua y Cotaxtla, al norte y al sur, respectivamente, en el centro de Veracruz, cuyo sitio arqueológico la Joya, es un sitio prehispánico construido con tierra: sistemas constructivos y pruebas de preservación en trópico húmedo.

Los diversos adobes fueron elaborados con los siguientes materiales:

Paja picada: Fibra natural de zacate pangola (*Digitaria eriantha*).

Tierra cruda: Tierra franca obtenida de fuentes locales de La Joya, Mpio. de Medellín de Bravo, Edo de Veracruz.

Con el propósito de evaluar el desempeño del proceso antiguo y de compararlo de acuerdo con los modernos protocolos estandarizados, se fabricaron ladrillos de barro experimentales en moldes de diferentes tamaños para ensayos de compresión (40 × 20 × 10 cm, tamaño de ladrillo moderno, 20 × 20 × 5 cm, 5 × 5 × 5 cm). Todos usan una mezcla básica de tierra de suelo local, sin arena añadida, pero con hierba picada (añadida en 30% v/v). El primer juego se hizo sin aditivo como control. Los subsecuentes ladrillos experimentales se fabricaron empleando varios tipos de aditivos.

2.1.- Serie experimental de ladrillos de adobe

Las muestras de adobes experimentales se clasificaron según la adición de un aditivo cohesivo, sintético o natural, de acuerdo a una formulación a base. Los aditivos son los siguientes: *Impertop A (COMEX)*, una emulsión asfáltica a base de agua comercial de consistencia pastosa, reforzada con fibras y con rellenos minerales; *Vinnapas 5044 N* (Wacker Chemie AG), un polvo polimérico dispersable a base de acetato de vinilo y etileno; y *betún (o asfalto)*, es decir, la fracción pesada de petróleo naturalmente disponible en la superficie, disuelto en aceite de linaza y maíz para obtener una mejor mezcla con el sedimento. Estos aditivos fueron completamente mezclados junto con el sistema arcilloso en concentraciones de 1, 2, 4, 6 y 8 % v/v. Las diferentes formulaciones de las muestras de los ladrillos experimentales se etiquetaron como se indica en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1.- Adobes experimentales con aditivos sintéticos poliméricos.

| Designación de la composición de las muestras. | |
|--|--|
| Muestra | Descripción de las muestras |
| E | Lodo 28.5 L, Paja 6 L |
| A1 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, <u>Impertop A1</u> % v/v |
| A2 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, <u>Impertop A2</u> % v/v |
| A4 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, <u>Impertop A4</u> % v/v |
| A6 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, <u>Impertop A6</u> % v/v |
| A8 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, <u>Impertop A8</u> % v/v |
| AV1 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, <u>Impertop A1</u> % v/v + <u>Vinnapas</u> |
| AV2 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, <u>Impertop A2</u> % v/v + <u>Vinnapas</u> |
| AV4 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, <u>Impertop A4</u> % v/v + <u>Vinnapas</u> |
| AV6 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, <u>Impertop A6</u> % v/v + <u>Vinnapas</u> |
| AV8 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, <u>Impertop A8</u> % v/v + <u>Vinnapas</u> |
| L1 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de linaza 1 % v/v |
| L2 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de linaza 2 % v/v |
| L4 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de linaza 4 % v/v |
| L6 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de linaza 6 % v/v |
| L8 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de linaza 8 % v/v |
| M1 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de maíz 1 % v/v |
| M2 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de maíz 2 % v/v |
| M4 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de maíz 4 % v/v |
| M6 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de maíz 6 % v/v |
| M8 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de maíz 8 % v/v |
| LM1 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de linaza y maíz 1 % v/v |
| LM2 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de linaza y maíz 2 % v/v |
| LM4 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de linaza y maíz 4 % v/v |
| LM6 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de linaza y maíz 6 % v/v |
| LM8 | Lodo 28.5 L, Paja 6 L, Chapopote disuelto en aceite de linaza y maíz 8 % v/v |

2.2.- Procedimiento de fabricación

Para la producción de estos adobes se utilizó tierra extraída del interior del sitio arqueológico. Durante el primer día se aflojó la tierra y se preparó con agua y se dejó reposar. El segundo día, el barro fue mezclado nuevamente con la cantidad requerida de agua hasta que se obtiene una mezcla plástica densa homogénea. Entonces, el equivalente a 28.5 litros de lodo (barro) se tamizó en una criba de 1 cm y luego en una de 0.5 cm. Después de esto, 6 litros de hierba Pangola tamizada, picada a 3-5 cm de longitud, fue adicionado. Las materias primas se mezclaron hasta obtener una consistencia plástica con agua. La textura correcta se establece de manera empírica (conocimiento empírico) por el ladrillero profesional quien apoyo en la elaboración de los ladrillos experimentales. El molde se colocó en el piso, y una cantidad adecuada mezcla de arcilla/agua se vertió dentro.

La mezcla fue compactada a manos desnuda en los moldes de diferentes tamaños, y la superficie de los bloques fue nivelada con una regla. Los ladrillos se depositaron al aire libre y a la luz directa del sol para que se seque minuciosamente. Después de algunas horas de secado, todas las muestras fueron marcados con su código de serie en la parte superior por incisión con una herramienta puntiaguda, para identificarlos y fijarlos su orientación. Los ladrillos de barro más grandes ($40 \times 20 \times 10$ cm y $20 \times 20 \times 5$ cm) se desmoldaron inmediatamente y se dejaron secar durante 15 días. Los moldes más pequeños fueron previamente engrasados y dejados reposar para su secado en el mismo molde durante 1 o 2 días. A diferencia del proceso de mezclado del barro en la fabricación de los adobes tradicionales, ésta se realizó con la adición y dosificación del estabilizante en la proporción antes mencionada dentro de un recipiente para conseguir proporciones exactas y así garantizar mejores resultados durante el mezclado. Los productos finales tenían textura y consistencia de grano similar. Las fibras fueron distribuidas uniformemente dentro de la matriz del material.



Figura 2.1.- Proceso de elaboración de ladrillos experimentales: a) tamizado, b) picado de las fibras, c) mezcla, d) reposo, e) llenado de moldes, f) engrasado de ladrillos, g) y h) secado y marcado del ladrillo, i) apilado final.

Durante el proceso de secado, las muestras presentaron grietas originadas por la contracción que fueron selladas aún frescos rellenando las grietas con mezcla de suelo y condensando con una espátula; al final, se secaron sin volver a formar grietas. Estos ladrillos experimentales de barro se almacenaron posteriormente durante 21 días a la sombra en una temperatura ambiente constante (promedio de 24°C) antes de ser trasladados a los laboratorios para realizar las diferentes pruebas después de al menos 28 días de secado.

En resumen, las muestras de adobes experimentales tienen un proceso de elaboración, el cual consta de una serie de pasos fragmentados en 3 días, estos pasos se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2.- Procedimiento para la obtención de las muestras de adobes experimentales.

| 1er día | |
|---------|--|
| 1 | Punzar la tierra del banco y remojarla con agua |
| 2 | Batir la mezcla, hasta formar fango y retirando pedacería |
| 2do día | |
| 1 | Batir la mezcla, agregando la cantidad de agua requerida |
| 2 | El fango creado, se refina con una malla metálica grande |
| 3 | Mezcla 1.5 cubeta (28.5 L) de fango con 1.5 galón (6 L) de paja |
| 4 | Embadurnar la vaselina en los moldes pequeños y grandes |
| 5 | Verter la mezcla en los moldes, logrando una distribución uniforme en ellos, evitando dejar espacios en las esquinas |
| 6 | Dejar secar las muestras al intemperismo |
| 3er día | |
| 1 | Desmoldar las muestras de los moldes |
| 2 | Lavar los moldes, retirando las impurezas |

3.- Metodología y caracterización

Para caracterizar formalmente las muestras de adobe se utilizaron métodos analíticos aceptados por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo, así como por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials). Estos métodos incluyen análisis físicos y químicos de rutina, complementados con análisis selecto, entre ellos: i) determinación cuantitativa del tamaño de partícula, ii) análisis de microscopía electrónica de barrido SEM, iii) difracción por rayos X y iv) fluorescencia de rayos X. Las muestras a estudiar se caracterizan por presentar, entre otras, las siguientes variables de orden cualitativo y cuantitativo: i) domina una matriz de textura franca; ii) predomina una densidad aparente alta; iii) consistencia estable; iv) retención de agua moderada; vii) reacción alcalina predominante, etc. Es posible, suponer que estas características les confirieran a los adobes a analizar las propiedades físicas y de calidad aceptable como material de construcción.

Se estudiaron adobes elaborados, basados en técnicas prehispánicas modificando variables intrínsecas tales la naturaleza y concentración de aditivos naturales y sintéticos. Los resultados experimentales fueron comparados contra los resultados obtenidos de adobes prehispánicos de centros arqueológicos ubicados en la región oriente de México tales como La Joya en el Estado de Veracruz.

3.1.- Caracterización del suelo

3.1.1.- Fluorescencia de rayos X

La técnica de Fluorescencia de Rayos X se basa en el estudio de las emisiones de fluorescencia generadas después de la excitación de una muestra mediante una fuente de rayos X. La radiación incide sobre la muestra excitando los átomos presentes en la misma, que emiten a su vez radiación característica denominada fluorescencia de rayos X. Esta radiación, convenientemente colimada, incide sobre un cristal analizador (con espaciado interatómico d) que la difracta en un ángulo (θ) dependiente de su longitud de onda (λ) por la ley de Bragg ($\text{sen } \theta = n\lambda/2d$).

Un detector que puede moverse sobre un determinado intervalo de dicho ángulo mide el valor de la intensidad de radiación en un ángulo determinado y por tanto para una longitud de onda específica, que es función lineal de la concentración del elemento en la muestra que produce tal radiación de fluorescencia. Esta técnica proporciona información cualitativa y cuantitativa de una muestra. Estas pruebas fueron realizadas en el Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Los estudios fueron realizados en el espectrómetro secuencial de rayos X (Siemens SRS 3000) equipado con tubo de rodio y ventana de berilio de 125 μ , utilizado en la determinación de elementos mayores (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P) y elementos traza (Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Th y Pb) de muestras de rocas, minerales, sedimentos y suelos. Los errores estimados en las determinaciones son menores a 1% en elementos mayores y menores a 4% en elementos traza.

Para el análisis se introduce la muestra en polvo, el cual es imprescindible un tamaño homogéneo de partícula, entre 10-20 μ . Se deposita la cantidad suficiente de muestra para cubrir un porta muestras de 27 mm de diámetro (1 hora) o al menos cubrir un porta muestras de 6 mm de diámetro (1.5 horas). Los resultados lo arrojan a través del software analítico SuperQ. Para el caso de elementos mayores, la muestra fue preparada en base seca y fundida con Borato-Tetraborato de Litio (8 g. de fundente y 0.4 g de muestra). La Pérdida por Calcinación (P x C) se determina calcinando la muestra a 950°C durante 1 hora. En el caso del análisis de elementos traza, se preparó una tableta con 5 g de muestra y 1.6 g de cera-C en micropolvo. Los análisis fueron realizados en un espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X *RIGAKU ZSX Primus II*, calibrado con Materiales de Referencia Certificados.

3.1.2.- Difracción de rayos X

La Difracción de Rayos X está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación. Los Rayos X tienen longitudes de onda de Angstroms, del mismo orden que las distancias interatómicas de los componentes de las redes cristalinas.

Al ser irradiados sobre la muestra a analizar, los Rayos X se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas. El método analítico del Polvo al Azar o de Debye-Scherrer consiste en irradiar con Rayos X sobre una muestra formada por multitud de cristales colocados al azar en todas las direcciones posibles. Para ello es aplicable la Ley de Bragg: $n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$, en la que “d” es la distancia entre los planos interatómicos que producen la difracción. Estas pruebas fueron realizadas en el Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Esta técnica se utilizó para la identificación de arcillas en fracciones orientadas. Se pesaron 15 g de muestra sin moler y se colocaron en tubos para centrifuga, primero fueron agitadas y posteriormente lavadas con agua destilada y centrifugadas varias veces. Luego se prepararon las fracciones orientadas por triplicado de cada muestra: una fue analizada sin ningún tratamiento, la segunda fue tratada con etilén-glicol y la tercera fue calcinada a 550 °C durante 1 hora. Finalmente se corrieron los difractogramas de estas fracciones orientadas en el intervalo de 4-35° 2θ. Los análisis fueron llevados a cabo en el Difractómetro automático Shimadzu XRD-6000 equipado con un goniómetro vertical y puede escanear por θ o 2θ. Cuenta con un portamuestras automático para cinco muestras, monocromador, filtro de Ni, tubo de cobre de foco normal y software para tratamiento de los datos.

3.1.3.- TIC-TOC (carbón inorgánico-carbón orgánico)

Estas pruebas fueron llevadas a cabo en el Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. El contenido total de carbono orgánico (TOC) en materiales térreos, es un parámetro importante para comprender el ciclo de elementos de los suelos y los sedimentos. El carbono orgánico aparece a través de la descomposición de los residuos vegetales y animales y actúa como la principal fuente de nutrientes para los microorganismos y las plantas. El análisis TOC, por lo tanto, proporciona información esencial sobre la actividad microbiológica y la materia orgánica para caracterizar y evaluar el suelo y los sedimentos. Existen dos tipos de carbono presentes en la naturaleza: carbono orgánico y carbono inorgánico. El carbono orgánico (TOC) está unido a hidrogeno u oxígeno para formar compuestos orgánicos, así como el carbono inorgánico (IC) forma parte de la estructura básica de los compuestos inorgánicos. La relación se da entre la expresión $TOC = TC - IC$.

La muestra se combustiona a altas temperaturas, para formar dióxido de carbono. El gas portador conteniendo el dióxido de carbono y otros productos de combustión son enfriados y deshidratados de llegar a la celda del detector de NDIR (infrarrojo no dispersivo). El área del pico es proporcional a la concentración de carbono total (TC) o de carbono inorgánico (IC).

El carbono orgánico y el carbono inorgánico (CaCO_3) se midieron en muestras de adobes utilizando un analizador sólido HiperTocde la marca Thermo Scientific. La abundancia de materia orgánica se mide estimado la perdida por ignición a 550°C . Carbono orgánico total (COT; o *TOC* por su nombre en inglés, *total organic carbon*) es la cantidad de carbono unido a un compuesto orgánico. Se mide por la cantidad de dióxido de carbono que se genera al oxidar la materia orgánica en condiciones especiales. Un análisis típico del TOC mide tanto el carbono total (TC) presente como el carbono inorgánico total (TIC). Restando el Carbono total del Carbono inorgánico total obtenemos el Carbono orgánico total.

Es probable que el contenido de materiales finos, principalmente arcillas silicatadas, como montmorillonita, y materiales alofánicos afecten el nivel de oxidación del C debido a la formación de microagregados estables que protegen la materia orgánica. Es por ello que para asegurar la mayor recuperación del CO se utilizó en las muestras de adobe, un grado de molienda del suelo tal que pase por un tamiz de 0.5mm.

3.1.4.- Distribución de tamaño de partícula

El análisis de distribución de tamaño de partícula se llevó a cabo utilizando un analizador láser Coulter LS100 con capacidad para medir de 0.1 a 1.000 μm , empleando una fuente de luz con un diodo láser de 5 mW con una longitud de onda de 750 nm. Una suspensión líquida a base de agua desionizada se preparó dentro de una celda con aproximadamente 5 mg de una muestra sólida pulverizada y fue colocado bajo agitación ultrasónica durante la medición. El equipo fue programado para llevar a cabo tres corridas por cada medición que estaba llevando a cabo en 5 muestras diferentes tomadas del ladrillo de adobe sin tratar (sin aditivo) “E”.

3.1.5.- Análisis SEM

El análisis de superficies (SEM) se llevó a cabo en un microscopio electrónico JEOL JSM-6360LV operado a 10 KV a diferentes magnificaciones para analizar la morfología y estructura del suelo. La distancia a la superficie de la muestra se ajustó a 10 mm y una aceleración de voltaje de 10 y 20 kV fue utilizado. Las piezas analizadas fueron previamente metalizadas con una fina capa de oro, aplicando la técnica de depósito por pulverización catódica.

3.1.6.- Ensayo de absorción de agua

3.1.6.1.- Por Capilaridad

Las muestras de adobe, de geometría cúbica (5cm³), fueron sometidas al desplazamiento por capilaridad del agua tomando medidas de su avance dentro del sistema de tierra. La muestra cúbica se colocó en un recipiente que tenía una película de 2 mm de agua potable, lo que permitió que la base de la muestra estuviera en contacto con el agua durante 10 min. Al final de la prueba, la difusión capilar se mide directamente en la muestra.

3.1.6.2.- Ensayo de Humedad

Las muestras cúbicas de adobes (5cm³) permanecieron a temperatura ambiente durante 48 hrs en el laboratorio con el objeto de que capten la humedad del ambiente controlado. Posteriormente, se llevaron a peso constante e inmediatamente se depositaron dentro de una estufa de convección para la eliminación de la humedad durante 24 hrs a una temperatura de 100 °C. Al finalizar el proceso de secado las muestras se colocaron en un desecador y se llevaron a peso hasta obtener un valor constante. Para obtener el % de humedad se emplea la siguiente fórmula:

$$H = \frac{Ph - Pd}{Pd} * 100$$

H: Humedad

Ph: Peso húmedo

Pd: Peso de secado

3.1.6.3.- Ensayo de absorción por sumersión

En este test, la muestra cubica se posiciona sobre una base de 1 cm de espesor que se encuentra dentro de un recipiente, posteriormente se vierte agua en cantidad suficiente para mantener la muestra totalmente sumergida y permanece inmersa durante 24 hrs. Después, la muestra se retira y se coloca sobre papel absorbente con el objeto de retirar el excedente de agua para inmediatamente tomar la medida de su peso saturado. A continuación, la muestra se lleva a secado en estufa de convección a 100 °C durante 24 hrs. Finalmente, se obtiene el peso constante en seco de las muestras de adobe. Para obtener el % de absorción se emplea la siguiente fórmula:

$$Abs = \frac{Ps - Pd}{Pd} * 100$$

Abs: Absorción del material

Ps: Peso saturado

Pd: Peso de secado

3.2.- Caracterización mecánica de los ladrillos de adobe

Los ladrillos experimentales con sus diversas formulaciones fueron sometidos a la caracterización de sus propiedades mecánicas bajo modo de compresión, flexión e impacto. Es importante notar que tanto las pruebas mecánicas a compresión y flexión, las muestras de los adobes se juntaron acoplado a piezosensores de emisión acústica para obtener las respectivas señales en tiempo real y de esta manera identificar la secuencia, progreso y desarrollo del daño. El equipo de emisión acústica fue acoplado a la geometría de las muestras de los ladrillos experimentales, cubo y barras para compresión y flexión respectivamente.

Para la detección de señales acústicas en ambas pruebas se utilizaron dos transductores piezoeléctricos miniatura tipo PICO fijado en la superficie del espécimen, usando grasa de silicón como acoplante acústico. Las señales de EA detectadas fueron amplificadas por un preamplificador (ganancia: 40 dB) y filtradas por un filtro con un intervalo de 20 kHz a 1200 kHz. El nivel de umbral (*threshold*) fijado fue de 30 dB (31.62 μV). Todas las señales acústicas y sus parámetros asociados fueron registrados y analizados por un analizador EA MICRO 11 PCI-2.

3.2.1.- Pruebas a compresión

En la actualidad, un control técnico estandarizado relacionadas con las pruebas mecánicas de adobe son limitadas ya que tales materiales se comportan en función de su mineralogía y composición elemental. Otros países han desarrollado pruebas normativas para la construcción de tierra, pero esto todavía no es el caso de México. Además, algunas metodologías son discutibles. Debido a la heterogeneidad de los materiales de la tierra, cada región posee variaciones en la forma de los ladrillos y el proceso de fabricación es diferente. Para ello, la metodología más ampliamente adoptada es la prueba de carga directa de los especímenes [39].

Las muestras generalmente se prueban en la dirección en que los ladrillos de barro se colocarán durante la construcción. La fuerza compresión uniaxial se obtiene como F/A , donde F es el máximo de la carga aplicada, y A es el área de la sección transversal de la muestra. Por otro lado, la deformación se calcula por diferencia del desplazamiento Como exhibido en la ecuación:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L - L_0}{L}$$

Donde L es la longitud del espécimen inicial paralela a la dirección de carga, ΔL es el desplazamiento de L y ε_0 es la deformación uniforme del material previamente a la fractura total inherente al comportamiento mecánico de la muestra. Los ladrillos de barro fueron cortados para obtener 10 muestras cúbicas de aproximadamente 40 mm^3 de cada formulación, y una serie de pruebas compresión uniaxial fueron llevados a cabo en cada una de ellas.

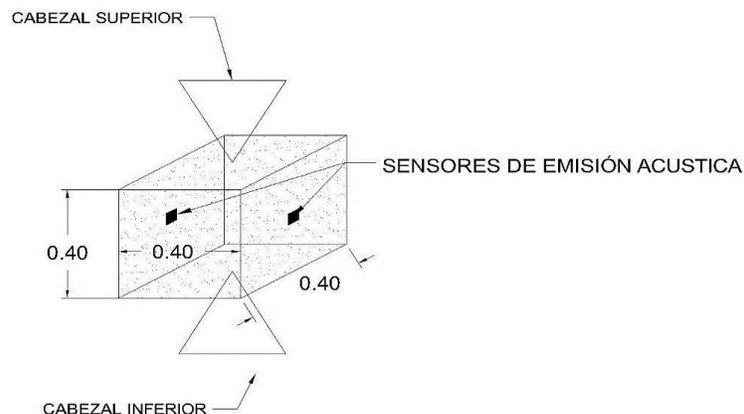


Figura 2.2.- Esquema de las muestras de adobe experimental a compresión.

Las superficies superior e inferior de las muestras experimentales fueron alisado por abrasión para permitir una distribución uniforme de la carga durante las pruebas. Las muestras cúbicas de adobe se colocaron en la máquina universal y se acoplaron dos sensores de emisión acústica a la superficie para capturar las señales de energía liberadas durante los eventos de daño en el material. Los sensores se colocaron en las caras laterales de la muestra del cubo empleando cinta de teflón para adherirlas. Para las pruebas a compresión se utilizó una máquina de pruebas universal Shimadzu AG-I 100 kN. La carga se aplicó imponiendo un desplazamiento vertical a una velocidad constante de 2 mm/min hasta la deformación de la muestra.

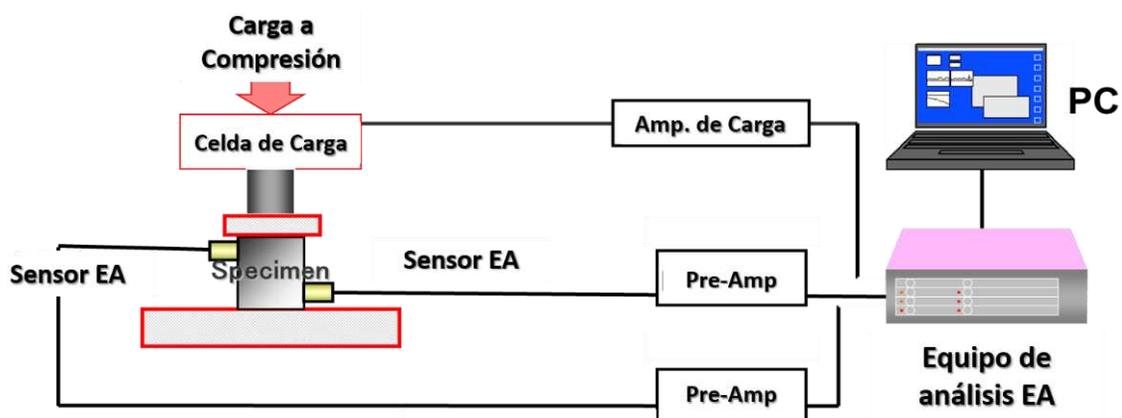


Figura 2.3.- Prueba a compresión acoplado a emisión acústica.

3.2.2.- Pruebas a flexión

La caracterización de los materiales bajo carga de flexión fue realizada en la modalidad de tres puntos. Las muestras fueron sometidas a ensayos individuales en la máquina universal de pruebas Shimadzu en acoplamiento con la técnica de emisión acústica. Para proceder con la ejecución de las pruebas, fue primordial determinar inicialmente las distancias en las cuales se iba a posicionar los puntos de apoyo del dispositivo del equipo sobre las muestras; con ello se consideraron las dimensiones de las barras para también colocar los sensores acústicos y evitar el contacto de éstos con los puntos de apoyo de la máquina universal. Las muestras, en geometría de barra, fueron colocadas en posición horizontal con dos puntos de apoyo y distancias aproximada entre aristas laterales de 10.34 mm, con un cabezal con movimiento vertical posicionado en la parte media superior de los adobes muestra.

Este cabezal en movimiento aplica una carga sobre la muestra para provocar fractura sobre el material, y para ello obtener los esfuerzos resultantes en las muestras; la velocidad del cabezal es de 0.5 mm/min. Los sensores acústicos fueron colocados a una distancia de 20 mm en la zona inferior de las muestras, para ello se utilizó cinta de teflón sobre los sensores para adherirlo a las barras y con ello evitar la caída libre de los sensores.

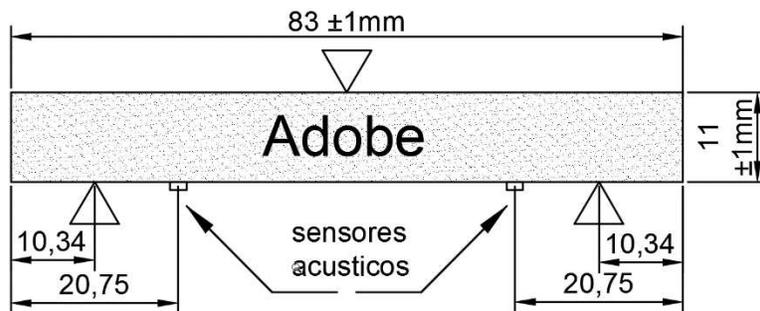


Figura 2.4.- Vista frontal dimensional de las barras de adobes en flexión.

3.2.3.- Pruebas a impacto

Para la prueba de impacto se cortaron 5 barras por cada formulación de los ladrillos experimentales con las dimensiones que se presentan en la Figura 2.5. Cabe mencionar que para este tipo de pruebas se suele hacer una entalladura angular (muesca) en forma de “v” sin embargo a este material no se le realizó tal proceso previo a la caracterización para evitar que se fracture ya que es un material frágil y al hacerle dicha entalladura perdía resistencia.

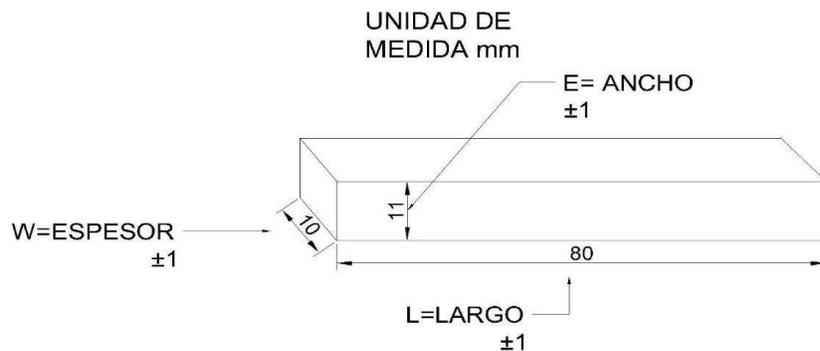


Figura 2.5.- Esquema de las muestras de adobe experimental a Impacto.

Una vez obtenida las barras de adobe se obtuvieron los valores de la sección transversal (ancho y espesor) y se alimentaron los datos al equipo para programar el impactómetro, así como también se calibró la energía cinética del péndulo soltándolo 5 veces de manera libre permitiéndole el balanceo completo. La norma que se utilizará para esta prueba será la de IZOD ASTM D 256. De igual forma se empleará el péndulo de 0.5 joules.

3.3.- Pruebas de intemperismo acelerado.

Las pruebas de intemperismo acelerado se llevan a cabo para identificar los efectos de la meteorización sobre muestras de materiales con el objeto de evaluar el deterioro físico y mecánico provocado por factores ambientales simulados. Las muestras obtenidas de los ladrillos experimentales fueron sometidos a ciclos de 4 horas de condensación por 4 horas de radiación. El primer set permaneció en el equipo durante 15 días, el segundo set durante un periodo de 30 días.

Debido a que los moldes para colocar las muestras en el interior de las máquinas son más reducidos que éstas, tuvieron que ser reducidas a lo largo para poder ser colocadas y con ello logren acoplarse a los moldes. Las muestras fueron reducidas por medio de lija de agua fina de grano 180, para evitar que estas se descompongan físicamente u obtengan una fractura antes de ser sometidas a las pruebas mecánicas; Estas se redujeron 5 mm aproximadamente obteniendo como resultado unas dimensiones de 78 ± 1 mm de largo (luz) como lo muestra la Figura 2.6.

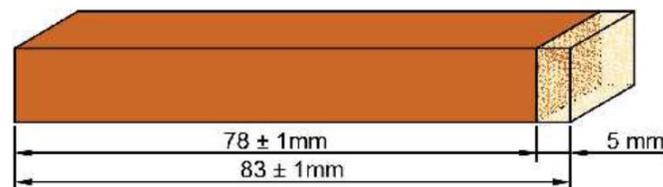


Figura 2.6.- Reducción de la muestra para la inserción en la máquina de intemperismo acelerado.

El retiro de las primeras muestras se realizó después de los 15 días de haber sido sometidos al intemperismo acelerado y con ello estas fueron colocadas en un desecador para retirar el exceso de humedad.

El retiro de las siguientes muestras fue realizado a los 30 días después de haber sido sometidas, de igual manera, éstas fueron colocadas en un desecador para eliminar el exceso de humedad en ellas.

3.3.1.- Caracterización mecánica de muestras a ciclos de 15 y 30 días.

Estas pruebas de caracterización se realizaron a las muestras sometidas con anterioridad a pruebas de intemperismo acelerado, en primera instancia se realizaron las pruebas al primer lote retirado el cual fueron 19 muestras (15 días) y por consecuente se realizaron las pruebas a las 18 muestras restantes del segundo lote (30 días).

Las pruebas de caracterización realizadas fueron similares a las primeras pruebas de flexión a tres puntos. Estas pruebas fueron realizadas en la misma máquina universal Shimadzu, y acompañando las pruebas con el mismo equipo de emisión acústica. Estas muestras en comparación de las primeras pruebas de flexión sufrieron cambios en los datos de acuerdo con la reducción aplicada al ser sometidas a intemperismo, y con ello el cambio de posición en los sensores de emisión acústica. Los datos modificados en particular fueron las dimensiones de las muestras en lo largo (Luz) de ellas con valor de 78 mm, y por consiguiente la modificación de la posición de los sensores de emisión acústica colocados en las dos paredes que conforman el ancho (Fondo) de las muestras como lo muestra la Figura 2.7. Las condiciones de las pruebas fueron las mismas que los materiales normales con el objeto de realizar un análisis comparativo de propiedades mecánicas a 0, 15 y 30 días.

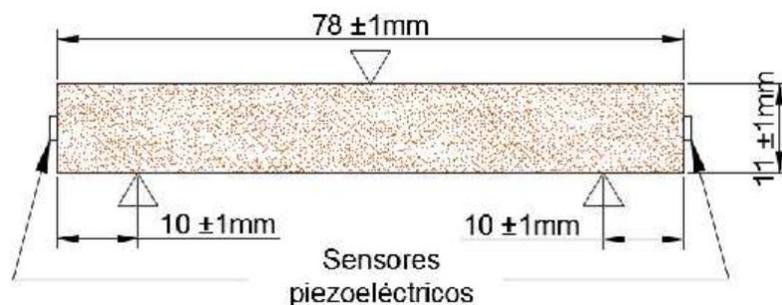


Figura 2.7.- Muestras con reducción y el cambio de posición de los sensores de emisión acústica.

3.4.- Análisis fractográficos

Después de las pruebas mecánicas se analizaron las formas de fractura y daño sufridos por las muestras en cada una de las modalidades a compresión y a flexión. Esta evaluación se realizó comparativamente para establecer los efectos de las diferentes formulaciones de los agregados, sintético y natural, en la cohesión y consolidación de los ladrillos de adobe.

CAPITULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1.- Caracterización del suelo

3.1.1.- Fluorescencia de rayos X

Los resultados del análisis químico cuantitativo de elementos principales y oligoelementos por fluorescencia de rayos X de nueve muestras de suelo se presentan en las Tablas 3.1 y 3.2 respectivamente [59]. Este suelo es representativo del mismo utilizado para fabricar el lodo experimental ladrillos. Los componentes elementales identificados son muy similares a las encontradas en las muestras arqueológicas originales, como podría esperarse [38] consistente en aluminosilicatos, feldespatos y minerales característica de la región. Confirmación de la existencia de estos elementos apoyará los resultados de difracción de rayos X en la identificación de arcillas y compuestos de tierra encontrados en el suelo utilizado en la fabricación de lodos arqueológicos y los ladrillos experimentales. En general, los minerales detectados por difracción de rayos X en este estudio son, en México, comunes en los suelos de origen volcánico.

Tabla 3.1.- Análisis de elementos mayores por Fluorescencia de rayos-X [59].

| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ t | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | P x C | Suma |
|----|------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------|-------|
| | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % |
| 01 | 58.16 | 1.01 | 18.54 | 7.14 | 0.12 | 1.71 | 3.53 | 2.57 | 1.27 | 0.33 | 5.22 | 99.61 |
| 02 | 65.59 | 1.47 | 13.49 | 7.59 | 0.11 | 1.51 | 2.81 | 2.39 | 1.6 | 0.21 | 3.02 | 99.77 |
| 03 | 65.22 | 1.12 | 13.51 | 6.23 | 0.11 | 1.90 | 4.01 | 2.29 | 1.57 | 0.77 | 3.04 | 99.79 |
| 04 | 60.93 | 1.11 | 16.86 | 7.08 | 0.12 | 1.66 | 2.99 | 2.27 | 1.39 | 0.32 | 5.02 | 99.77 |
| 05 | 58.16 | 1.11 | 18.53 | 7.24 | 0.15 | 1.58 | 3.32 | 2.37 | 1.28 | 0.42 | 5.58 | 99.74 |
| 06 | 59.65 | 1.06 | 17.59 | 7.09 | 0.12 | 1.88 | 3.65 | 2.56 | 1.32 | 0.39 | 4.46 | 99.79 |
| 07 | 57.77 | 1.03 | 19.02 | 7.02 | 0.12 | 1.76 | 3.55 | 2.53 | 1.23 | 0.30 | 5.49 | 99.84 |
| 08 | 57.37 | 0.97 | 19.14 | 6.956 | 0.14 | 1.75 | 3.76 | 2.61 | 1.26 | 0.38 | 5.44 | 99.74 |
| 09 | 57.99 | 1.11 | 18.61 | 7.375 | 0.13 | 1.78 | 3.49 | 2.49 | 1.27 | 0.341 | 5.28 | 99.87 |

En cuanto al CaO, cabe mencionar que, aunque su presencia (%) es moderadamente baja (Tabla 3.1); este componente del suelo es significativo ya que este material beneficia a los sistemas constructivos de tierra como estabilizador para mejorar la resistencia mecánica [5].

Tabla 3.2.- Análisis de elementos traza por Fluorescencia de rayos-X [59].

| | Rb | Sr | Ba | Y | Zr | Nb | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Th | Pb |
|----|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| 01 | 38 | 467 | 706 | 20 | 218 | 7 | 137 | 111 | 18 | 34 | 25 | 87 | 8 | 14 |
| 02 | 47 | 370 | 679 | 18 | 326 | 12 | 160 | 191 | 19 | 30 | 17 | 77 | 6 | 11 |
| 03 | 49 | 393 | 624 | 24 | 290 | 12 | 124 | 76 | 17 | 29 | 17 | 67 | 8 | 11 |
| 04 | 42 | 372 | 690 | 20 | 240 | 10 | 144 | 119 | 17 | 34 | 21 | 80 | 8 | 13 |
| 05 | 37 | 413 | 702 | 21 | 247 | 9 | 150 | 101 | 17 | 35 | 24 | 82 | 8 | 14 |
| 06 | 37 | 450 | 677 | 20 | 252 | 8 | 138 | 93 | 18 | 33 | 22 | 83 | 7 | 14 |
| 07 | 33 | 456 | 718 | 20 | 223 | 8 | 139 | 105 | 16 | 34 | 24 | 77 | 8 | 12 |
| 08 | 34 | 491 | 737 | 20 | 212 | 6 | 127 | 73 | 17 | 33 | 27 | 87 | 7 | 14 |
| 09 | 35 | 435 | 692 | 20 | 243 | 8 | 146 | 110 | 19 | 35 | 23 | 83 | 8 | 15 |

Se estima que la pérdida de volátiles por calcinación (PxC) en todas las muestras estudiadas es baja ($\approx 5\%$), y esto podría estar relacionado con la pequeña presencia de materia orgánica material como se observa en las mediciones de TOC.

3.1.2.- Difracción de rayos X

Las nueve muestras de suelos fueron analizadas en el difractómetro de rayos X con el objeto de contribuir en la identificación de los componentes principales de los materiales térreos empleados para la fabricación de aquellos [60]. Se analizaron los picos obtenidos resultado de la cristalinidad exhibida por los compuestos que conforman las muestras. los resultados con los componentes identificados junto a los difractogramas se presentan en la Figura 3.1.

Todas las muestras analizadas indicaron una concentración significativa de cuarzo y feldespatos. Estos resultados se encuentran apoyados con las altas concentraciones de SiO₂ y Al₂O₃ de la Tabla 3.1. En menores concentraciones se identificaron principalmente minerales tales como la cristobalita, calcita, augita y paragonita.

De la misma manera se identificaron arcillas del tipo montmorillonita $((\text{Na,Ca})_{0.3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O})$ como la Esmectita y la Halloysita.

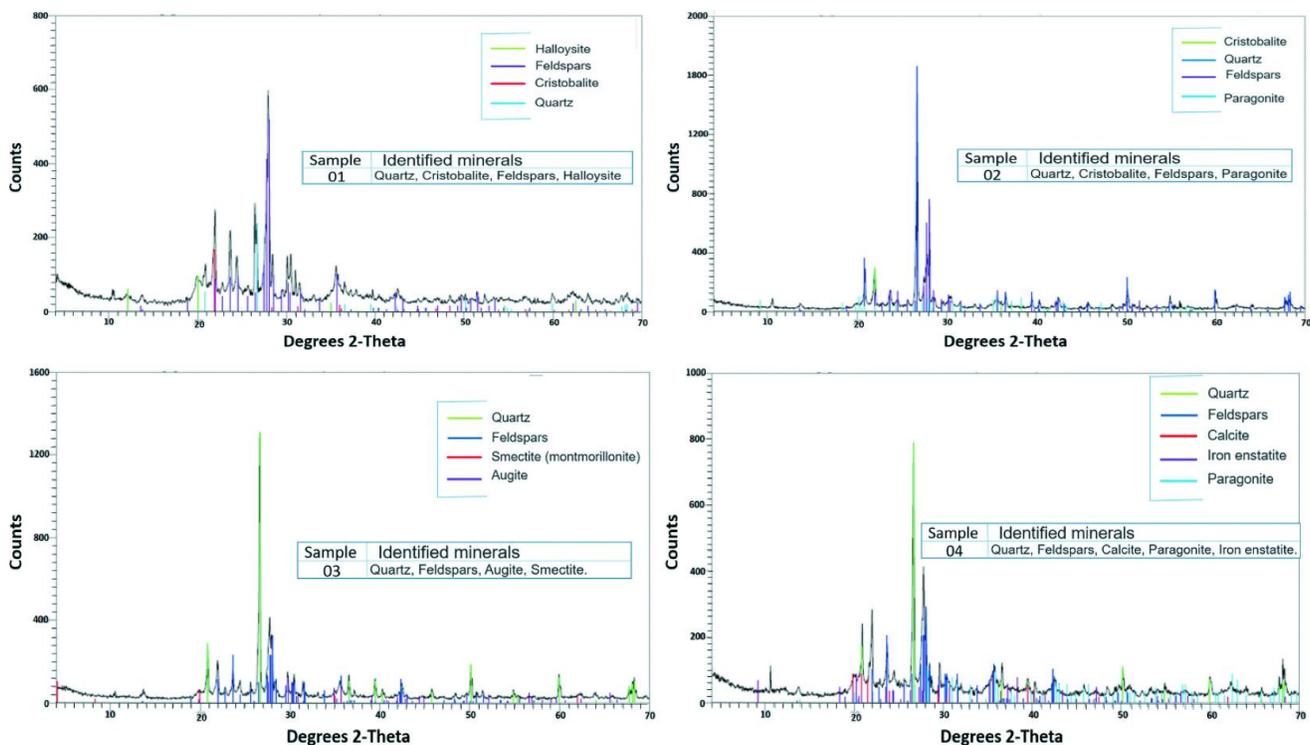


Figura 3.1.- Análisis de Difracción de rayos-X en 4 muestras de suelo [60].

La identificación de arcillas en fracciones orientadas fue analizada por triplicado de cada muestra: una fue analizada sin ningún tratamiento, la segunda fue tratada con etilén-glicol y la tercera fue calcinada a 550°C durante 1 hora. Finalmente se corrieron los difractogramas de estas fracciones orientadas en el intervalo de $4-35^{\circ} 2\theta$. Los resultados de los difractogramas se encuentran en la Figura 3.2 que ilustra los difractogramas de rayos-X (en polvo) de la arcilla natural. Con respecto a la esmectita, se observa la primera banda a valores de espaciado basal alrededor de $\sim 14.5\text{\AA}$ que se mantiene después tratamiento con etilén-glicol con un desplazamiento a 17\AA , pero desaparece después de calcinar a 550°C . Para el caso de la halloysita sus bandas aparecen inicialmente a $\sim 7.3\text{\AA}$ y se mantiene en este valor aun después del tratamiento con etilén-glicol sufriendo un desplazamiento menor a 10\AA después de la calcinación.

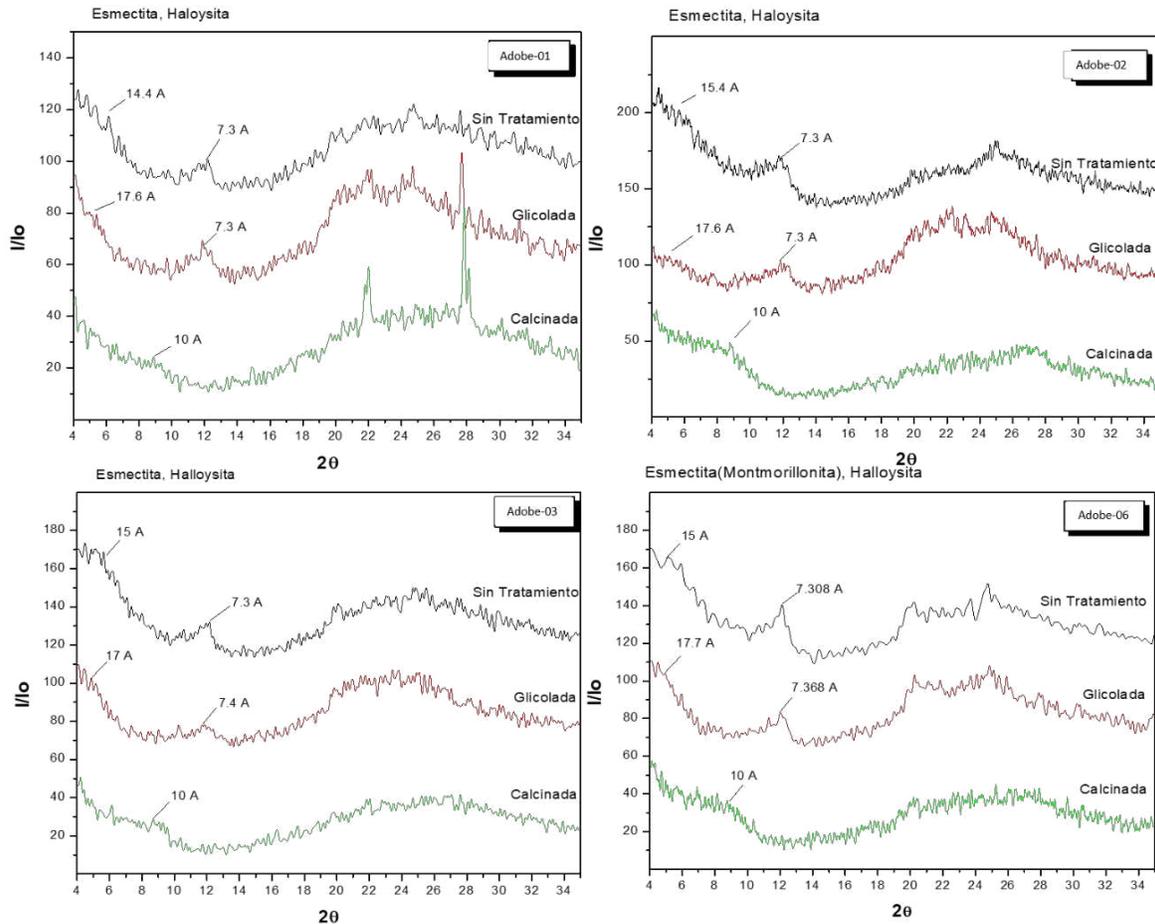


Figura 3.2.- Análisis de Difracción de rayos-X: identificación de arcillas [60].

Este aumento en el espaciamento basal en el caso de la esmectita (montmorillonita) de $\sim 14.5 \text{ \AA}$ a $\sim 17 \text{ \AA}$ es una indicación de que las capas de los materiales están separadas por pilares de Al. Se puede apreciar que las otras bandas correspondientes a la estructura de la montmorillonita se mantienen confirmando que las capas no sufren modificaciones durante el proceso. Las estructuras cristalinas de las arcillas identificadas entre los componentes del suelo exhiben geometrías bien definidas que influyen en los resultados del espaciamento basal. Mientras que la esmectita tiene una geometría más compleja formada por láminas, la halloysita es de naturaleza lineal [40-42].

Por lo tanto, las arcillas presentes en las muestras de adobe se componen principalmente de esmectita y halloysita. En algunas muestras, la esmectita se encuentra en cantidades muy pequeñas.

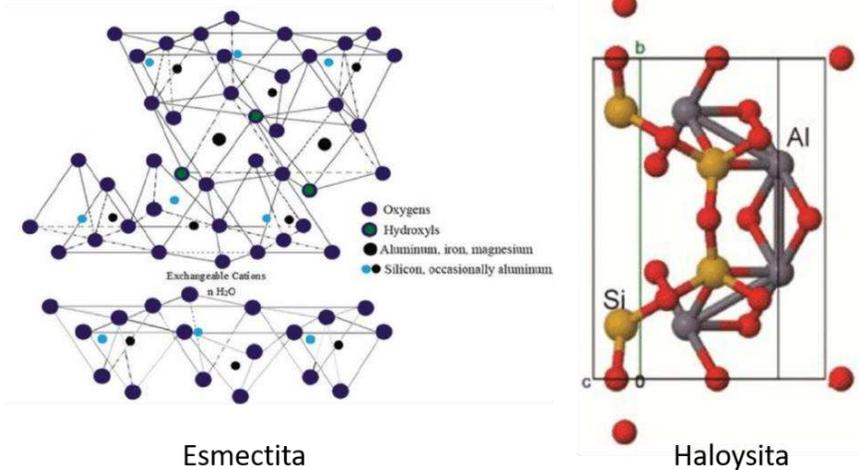


Figura 3.3.- Geometría de las arcillas.

3.1.3.- TIC-TOC (carbón inorgánico-carbón orgánico)

Generalmente se establece que el suelo para ser utilizado en las construcciones de tierra debe estar libre de materia orgánica y otras sustancias ajenas al suelo, como basura, nocivas material, etc. que puedan actuar como contaminantes. Por ejemplo, el suelo que contiene sales como los sulfatos puede interferir con el ajuste del aglutinante. Por lo tanto, los suelos orgánicos no son adecuados ya que incluyen contenido material de un tipo que podría descomponerse dentro del ladrillo [43,44]. La detección de TOC es una medida esencial de caracterización de todo sitio ya que su presencia o ausencia pueden decididamente influenciar en cómo los compuestos químicos reaccionarán en el suelo o sedimento y por lo tanto tener efectos indeseables en el ambiente y en los procesos de fabricación de elementos constructivos a base de tierra.

La obtención de los valores del contenido de carbono total (TC) y carbono inorgánico total (TIC) exhibido por las muestras de suelos se presenta en las Tablas 3.3 y 3.4. A partir de estos valores de TC, por medio de la sustracción $TOC = TC - TIC$ se obtienen los valores del carbono orgánico e inorgánico. Las mediciones se realizaron por duplicado, y la media fue obtenida de ambos valores. Dos muestras representativas son presentadas [60].

Tabla 3.3.- Obtención del Carbono Total (TC)

| Nr. | Name | Type | Size | Unit. Conc. Unit | Area | Pos. | Dil. | Dens. |
|-----|------------|--------|---------|---------------------|------|------|------|-------|
| 1 | BLANCO | blank | 50 mg | 0 % (WW) | 2.2 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | ME 55A | sample | 10.3 mg | 0.54 % (WW) | 70.6 | 2 | 1 | 1 |
| 3 | ME 29 | sample | 12.9 mg | 0.44 % (WW) | 71.6 | 3 | 1 | 1 |
| 4 | ME 55A (2) | sample | 10.3 mg | 0.48 % (WW) | 62.4 | 4 | 1 | 1 |
| 5 | ME 29 (2) | sample | 10.5 mg | 0.41 % (WW) | 52.6 | 5 | 1 | 1 |

$$\text{TC Me55} = (0.54 + 0.48) / 2 = 0.51\%$$

$$\text{TC Me29} = (0.44 + 0.41) / 2 = 0.43\%$$

Tabla 3.4.- Obtención del Carbono Inorgánico (TIC)

| Nr. | Name | Type | Size | Unit. Conc. Unit | Area | Pos. | Dil. | Dens. |
|-----|------------|--------|---------|---------------------|------|------|------|-------|
| 1 | BLANCO | blank | 50 mg | 0 % (WW) | -0.3 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | ME 55A | sample | 12 mg | 0.31 % (WW) | 2.9 | 4 | 1 | 1 |
| 3 | ME 29 | sample | 18.3 mg | 0.2 % (WW) | 0.4 | 5 | 1 | 1 |
| 4 | ME 55A (2) | sample | 24.4 mg | 0.15 % (WW) | 0.8 | 6 | 1 | 1 |
| 5 | ME 29 (2) | sample | 15.1 mg | 0.24 % (WW) | 0.2 | 7 | 1 | 1 |

$$\text{TIC Me55} = (0.31 + 0.15) / 2 = 0.23\%$$

$$\text{TIC Me29} = (0.20 + 0.24) / 2 = 0.22\%$$

Por lo tanto: Cálculo de carbono orgánico (TOC)

$$\text{TOC Me55} = \text{TC} - \text{TIC} = 0.51 - 0.23 = 0.28\%$$

$$\text{TOC Me29} = \text{TC} - \text{TIC} = 0.43 - 0.22 = 0.21\%$$

En consecuencia, se establece que el Total del contenido de Carbono Orgánico en ambas muestras es de 0.2% a 0.3% respectivamente. Altos valores de TOC pueden deberse a fuentes de carbono de origen natural (derivados de la descomposición de plantas y animales) o como resultado de la contaminación por actividades antropogénicas. Además, un TOC bajo puede confirmar la ausencia de productos químicos orgánicos potencialmente dañinos [45]. Alto y bajo se utilizan relativamente en este contexto para distinguir el % de TOC en los suelos del área de estudio; de lo contrario, en general, los valores de TOC son bajos.

Ekosse et al [56], cuantificaron el carbono orgánico total (TOC) presente en diversos suelos estableciendo que los valores obtenidos en muestras de suelo tanto del sitio de estudio como del área de control oscilaron entre 0 % en peso y 7.91 %.

Valores de TOC arriba del 6% son considerados dañinos en materiales constructivos a base de tierra [56]. Las muestras de ladrillos de barro analizadas de La Joya exhiben bajos valores de materia orgánica en comparación con los ladrillos de barro de Zethé y Sabina Grandes sitios arqueológicos en el centro de México [42].

3.1.4.- Distribución de tamaño de partícula

La distribución del tamaño de las partículas del suelo es de gran importancia, y es considerado como parámetro físico esencial en los suelos que puede ser empleado para identificar la génesis del suelo en cuestión, clasificarlo o para definir la textura para los propósitos de construcción Independientemente de sus características mineralógicas y conformaciones químicas, el tamaño de partícula está relacionado con la distribución fundamental de partículas de suelo de diferentes tamaños [5].

La Figura 3.4 exhibe la distribución del tamaño de partículas para muestras de suelo representativas de 5 muestras diferentes obtenidas del ladrillo experimental “E” sin tratar. Dos grupos principales de tamaños se identifican: el primero, alrededor de 5 μm , indican que es un suelo fino de arena limosa mientras que el segundo grupo se encontró alrededor de 25 μm y podrían representar principalmente partículas arcillosas.

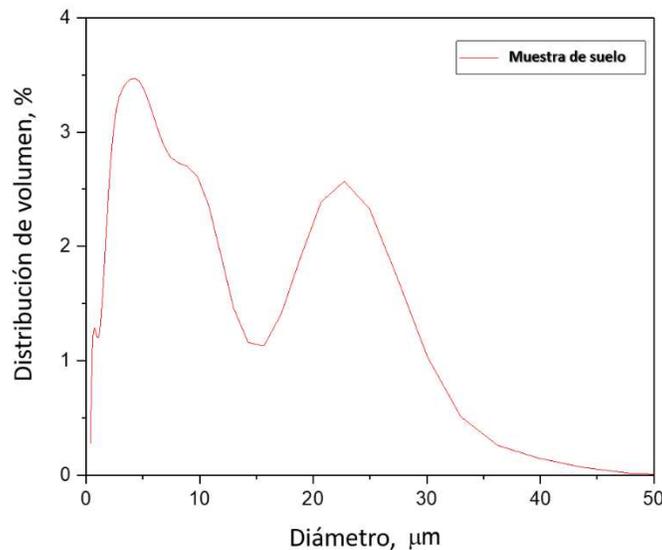


Figura 3.4.- Distribución del tamaño de partícula de muestra de suelo.

3.1.5.- Análisis SEM

Como complemento a la caracterización de la distribución del tamaño de partícula, analizaron las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM). Las imágenes SEM exhibidas en la Figura 3.5 presentan muestras de limo y arcilla de tamaño que atraviesan el tamiz No. 350. Partículas que exhiben tamaños variados entre 2 y 10 μm se aprecian rodeados por la menor presencia de partículas de mayor tamaño (Figura 3.5a). Por otra parte, las partículas que se observan en la Figura 3.5b exhiben una morfología similar a las arcillas estratificadas.

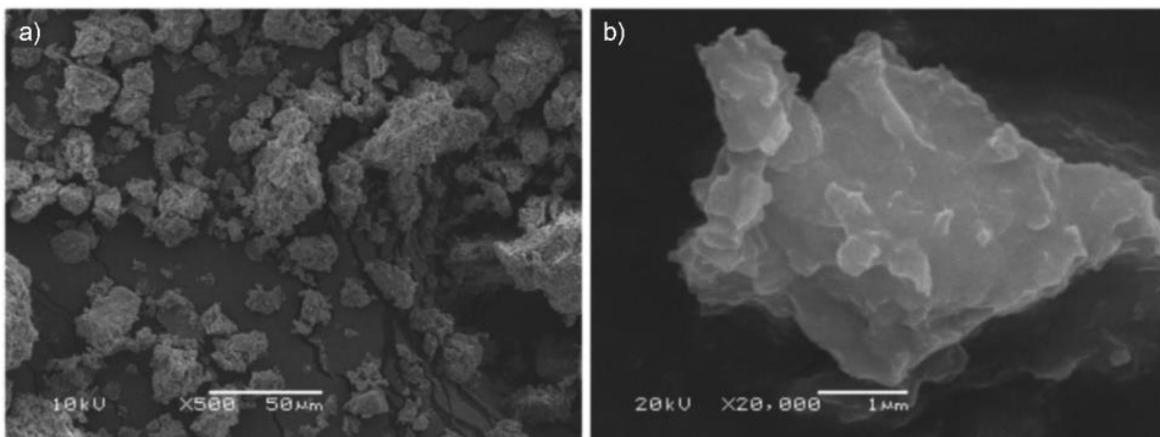


Figura 3.5.- Imágenes SEM de partículas: a) Distribución de partículas del suelo en estudio, b) Partícula en capas.

Para complementar la información se llevó a cabo un análisis empleando un microscopio óptico digital de 1600x para observar la superficie de los adobes (Figura 3.6). Para observar la estructura y por tanto sus propiedades, se refleja la morfología del material en cada imagen tomando diversas zonas: CS-Cara superior, CI-Cara inferior, CLL-Cara lateral longitudinal y CLT-Cara lateral transversal. Así, se aprecia la superficie de las muestras con grietas, cortes geométricos indicando que el material presentaría un comportamiento mecánico gobernado por la consistencia de las muestras de adobe relacionado con su estructura. Se observó que en la superficie de los materiales se levantan las fibras naturales o fibrillas con facilidad, al igual partículas de tierra de mayor tamaño, la adherencia del sistema terreo es posible estimarla por medio del tacto sobre la superficie.

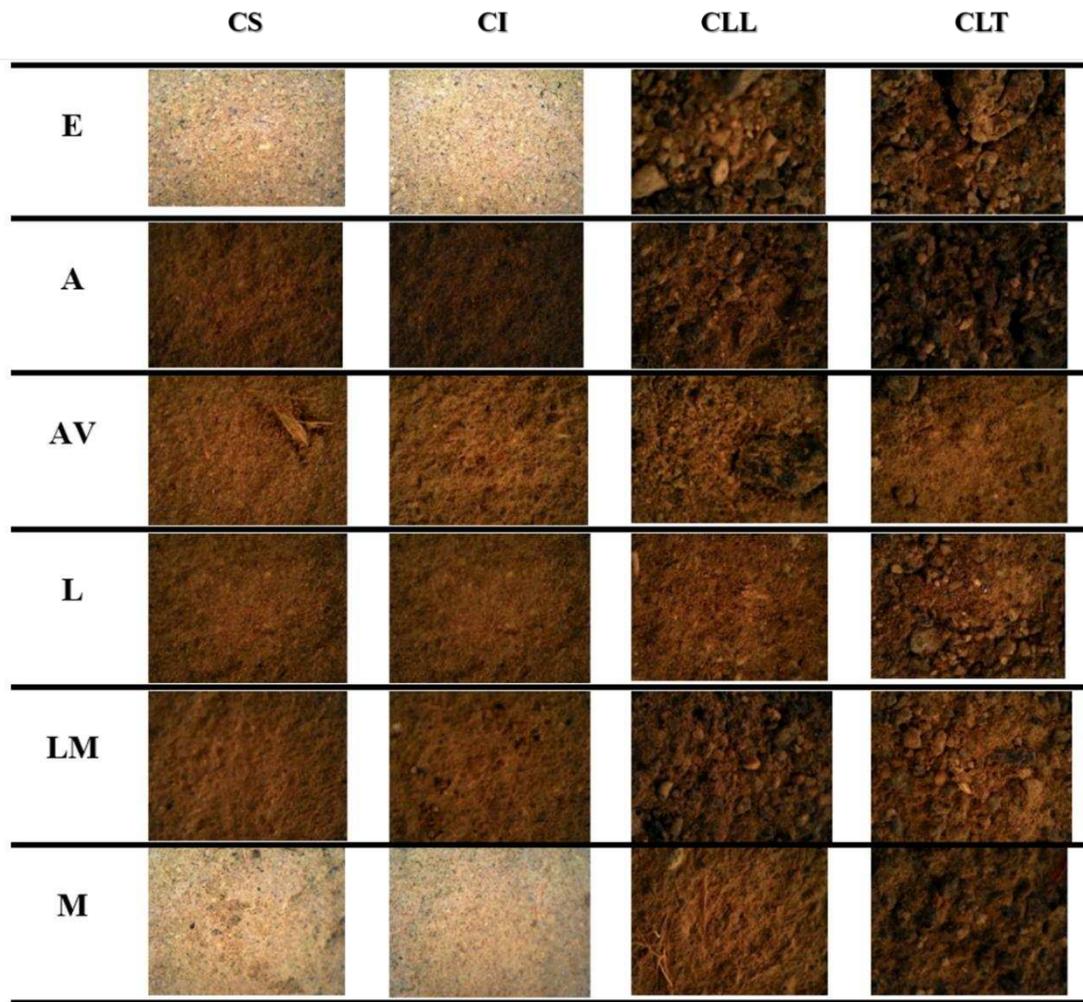


Figura 3.6.- Diferentes tipos de superficie en las formulaciones de los ladrillos: CS-Cara superior, CI-Cara inferior, CLL-Cara lateral longitudinal y CLT-Cara lateral transversal.

3.1.6.- Ensayo de absorción de agua

3.1.6.1.- Por capilaridad

Aun cuando la tierra empleada para fabricar elementos constructivos de tierra cumpla con las condiciones establecidas en las normas y estándares en cuanto a materia orgánica, sales solubles, la granulometría, la plasticidad el tipo de arcilla, etc, estas condiciones por si solas no serán suficientes para asegurar su aplicación en este ámbito. Es posible que los materiales térreos presenten excelentes propiedades mecánicas tales como la resistencia a compresión y que se encuentren tipificados bajo los estándares, sin embargo, los ensayos de absorción podrían indicar que sin aditivos agregados al sistema térreo para mejorar la cohesión no sería posible ser utilizado por su alto grado de absorción [46].

Las muestras, de geometrías cúbicas, fueron sometidas al desplazamiento por capilaridad de agua tomando las medidas de su avance dentro del sistema de tierra. Al finalizar la prueba de ascenso capilar (contacto de la base del adobe con una película de agua de 2 mm de altura durante 10 minutos), fue posible observar un ascenso capilar del agua en una altura aproximada de 3.5 cm para el adobe convencional, es decir, la muestra sin aditivos (E) (Figura 3.7).



Figura 3.7.- Prueba de absorción en la muestra control de adobe (E).

Comparado con el resto de las formulaciones, la muestra control tuvo el mayor ascenso capilar presentando ligero daño en su estructura como desprendimiento de partículas de tierra. A diferencia de las muestras tipo A las cuales contienen aditivos, éstas presentan un mejoramiento en cuanto a la impermeabilidad a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo como se observa en la Figura 3.8. La muestra A1 presenta un ascenso capilar de 1.9 cm, A2 de 1 cm, A4 de 0.5 cm, A6 de 0.4 cm, y la A8 de 0.2 cm.

Las muestras de tipo AV presentan un comportamiento similar a las muestras A en cuanto al ascenso capilar, con un leve mejoramiento en cuanto a su impermeabilidad a porcentajes menores de los aditivos como es el caso de la muestra AV al 1% con un ascenso capilar de 1 cm y a medida que se incrementa el porcentaje de aditivos este ascenso capilar va disminuyendo hasta llegar a 0.2 cm con el porcentaje del 8% de aditivos agregados a la formulación como se presenta en la Figura 3.9.

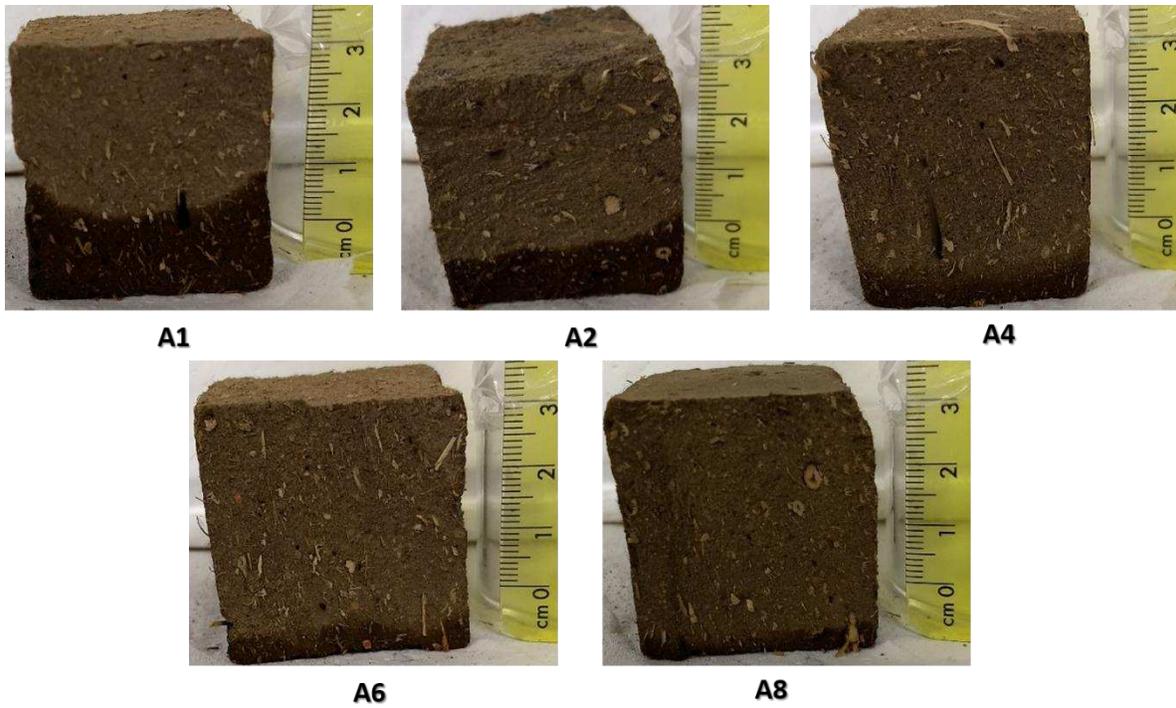


Figura 3.8.- Prueba de absorción en la muestra formulación Impertop (A).

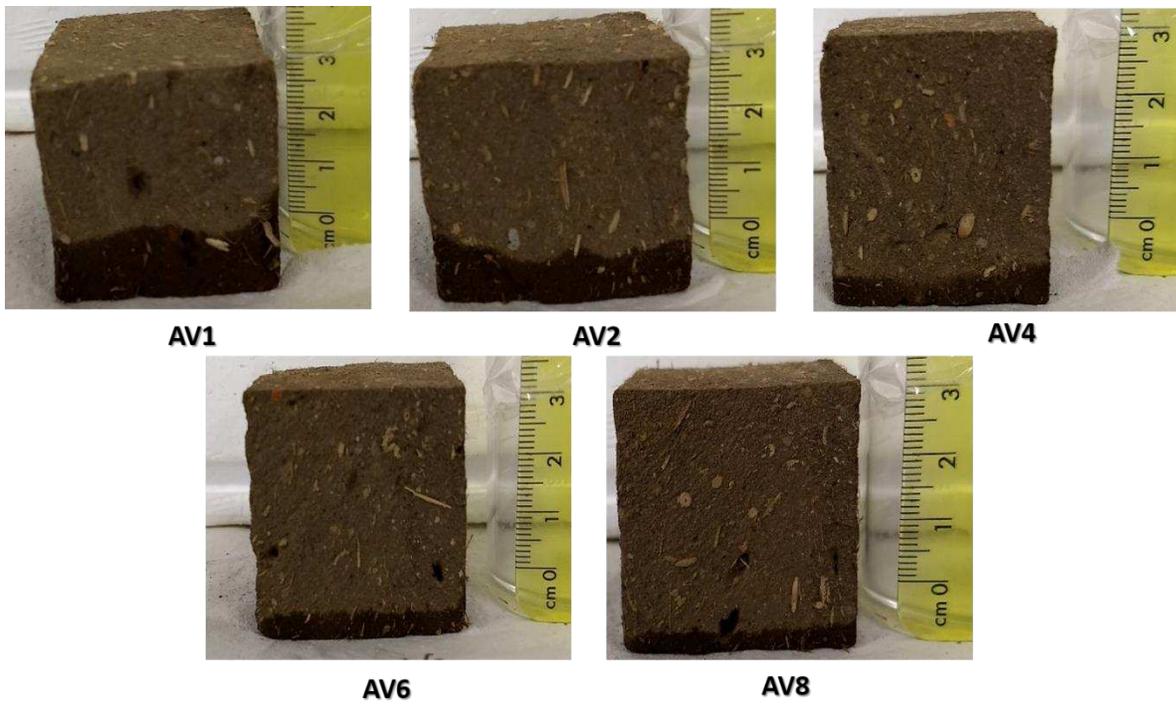


Figura 3.9.- Prueba de absorción en la muestra formulación Impertop/Vinnapas (AV).

Las muestras con aceite de linaza (L) presentan un comportamiento similar a las muestras de tipo A y AV. En donde se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo en la formulación estas se van haciendo más impermeables, evitando el ascenso del agua en las muestras (Figura 3.10).

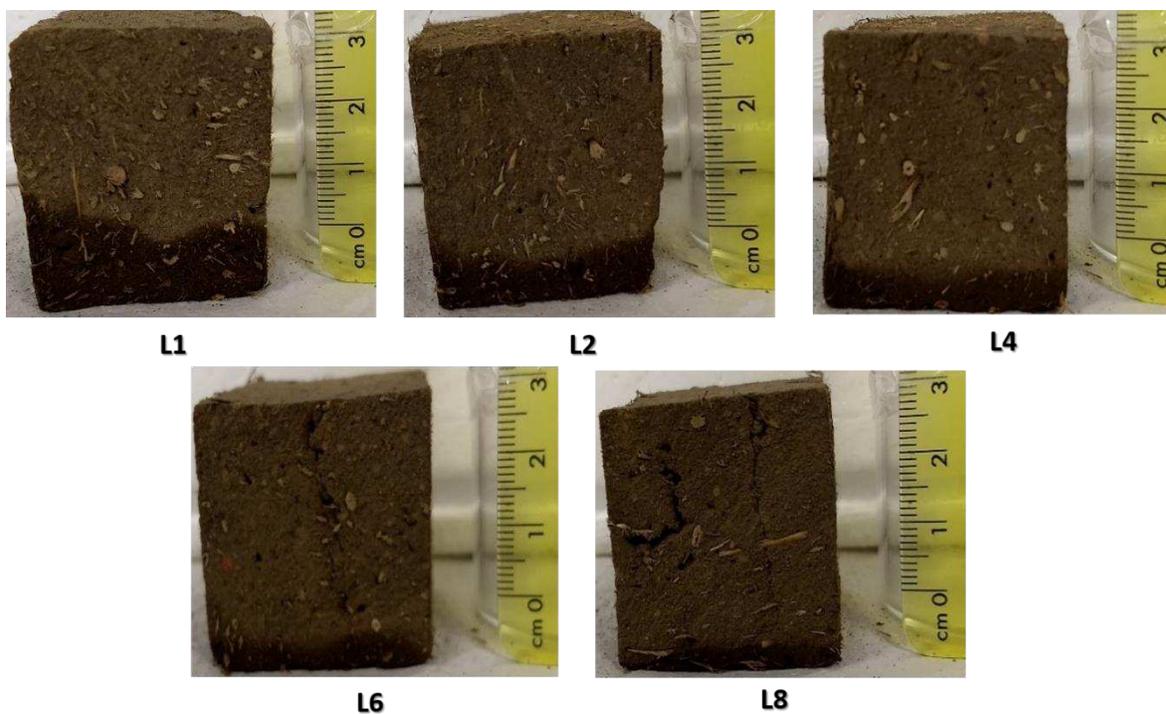


Figura 3.10.- Prueba de absorción en la muestra formulación aceite de Linaza (L).

Las muestras con aceite de maíz (M) presentan ascensos de capilaridad con la misma tendencia observada en la muestra control, lo que podría considerarse que el aceite de maíz no está recubriendo correctamente las partículas de tierra o que el aceite de maíz no tiene la capacidad de impermeabilizar el material para protegerlo al entrar en contacto el agua con el adobe, tal como se observa en la Figura 3.11. En esta formulación, no se aprecia un mejoramiento al agregar mayores porcentajes de aceite de maíz como se observa al 1% con un ascenso capilar 3cm y se mantiene en 2.5 cm en los porcentajes de 2, 4, 6 y 8% respectivamente.

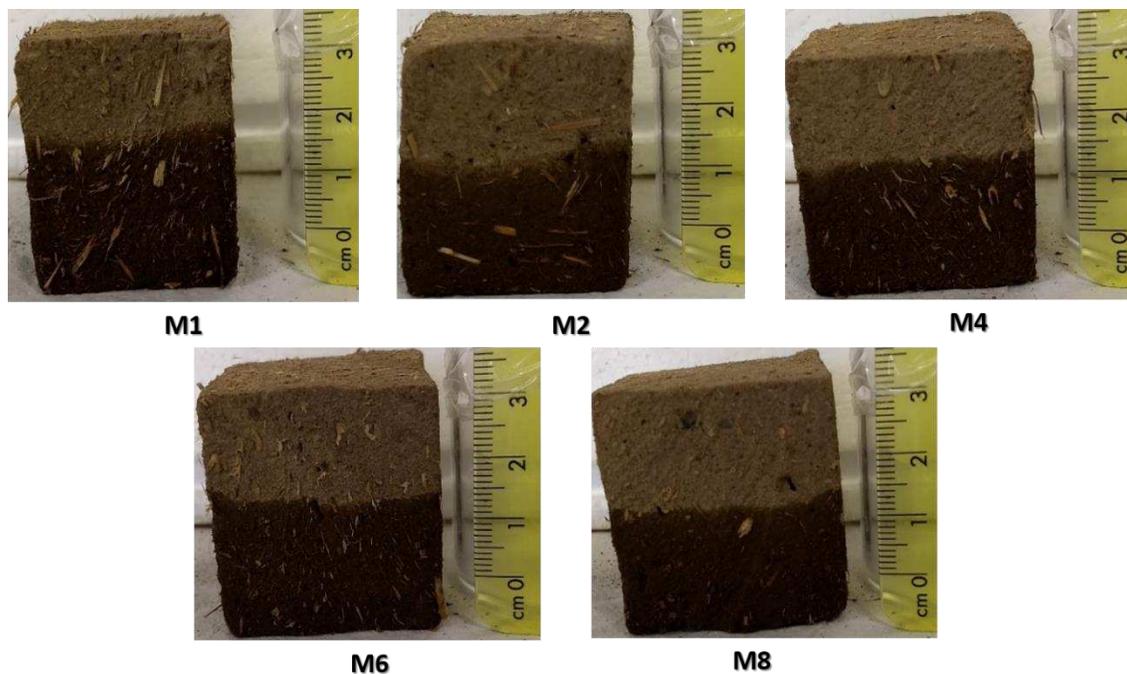


Figura 3.11.- Prueba de absorción en la muestra formulación aceite de Maiz (M).

Finalmente, las formulaciones con aceite de linaza y aceite de maíz (LM) presentan altos niveles de ascenso por capilaridad con valores 2.2 cm al 1% y se mantiene a 1.5 cm en los porcentajes 2, 4, 6, y 8% respectivamente (Figura 3.12).

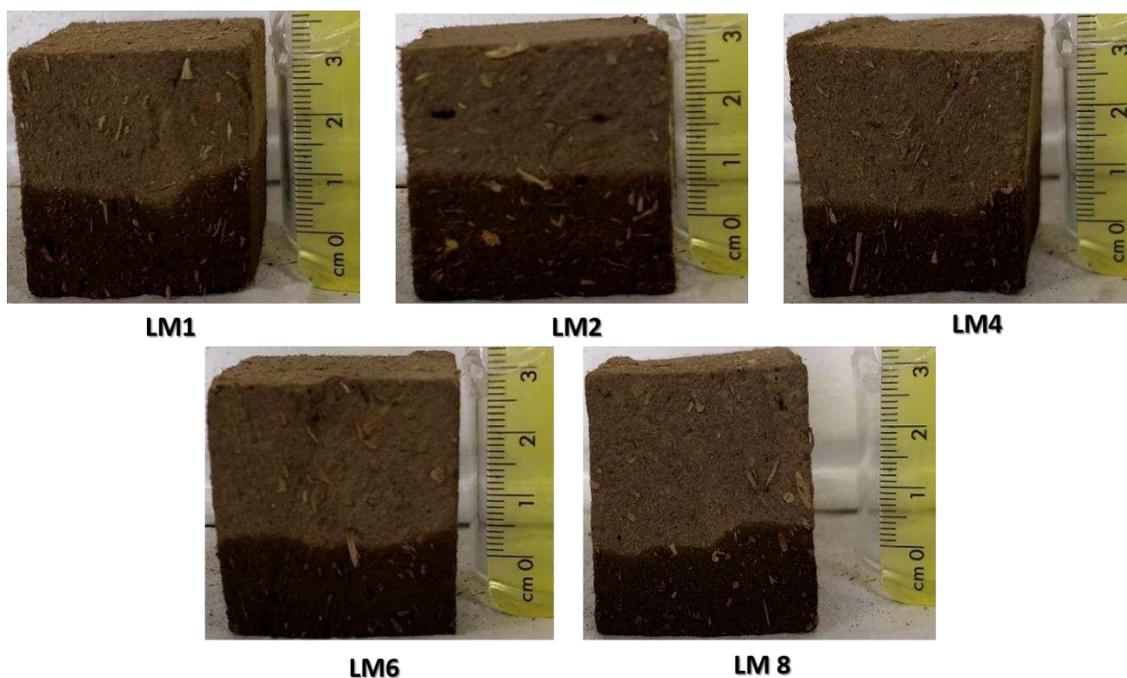


Figura 3.12.- Prueba de absorción en la muestra formulación linaza y maíz (LM).

3.1.6.2.- Ensayo de humedad

Este ensayo de humedad en las muestras, permite identificar la cantidad de agua que éstas contienen en su estado normal a temperatura ambiente sin cambiar su estructura o sus propiedades mecánicas y en base a estos resultados observar, con las pruebas de absorción, como es que cambian las propiedades del material al absorber un porcentaje mayor al ya determinado (Tabla 3.5).

Tabla 3.5.- Humedad de las formulaciones de adobes.

| Muestras | Peso en seco (grs) | Peso saturado (grs) | Capacidad de humedad (%) |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| E | 103.76 | 106.71 | 2.84 |
| A1 | 114.14 | 117.18 | 2.66 |
| A2 | 116.62 | 119.71 | 2.65 |
| A4 | 115.01 | 117.87 | 2.49 |
| A6 | 116.24 | 119.12 | 2.48 |
| A8 | 106.79 | 109.33 | 2.38 |
| AV1 | 104.97 | 107.75 | 2.65 |
| AV2 | 105.96 | 108.54 | 2.43 |
| AV4 | 100.64 | 103.20 | 2.54 |
| AV6 | 114.06 | 116.79 | 2.39 |
| AV8 | 103.67 | 106.12 | 2.36 |
| L1 | 108.97 | 111.89 | 2.67 |
| L2 | 103.26 | 105.85 | 2.51 |
| L4 | 99.07 | 101.42 | 2.37 |
| L6 | 100.71 | 102.97 | 2.25 |
| L8 | 98.92 | 101.21 | 2.32 |
| M1 | 100.32 | 102.53 | 2.21 |
| M2 | 101.29 | 103.43 | 2.11 |
| M4 | 108.39 | 110.47 | 1.92 |
| M6 | 103.79 | 105.61 | 1.74 |
| M8 | 103.56 | 105.41 | 1.78 |
| LM1 | 108.44 | 111.41 | 2.74 |
| LM2 | 105.42 | 107.91 | 2.36 |
| LM4 | 97.05 | 99.11 | 2.19 |
| LM6 | 99.43 | 101.41 | 1.99 |
| LM8 | 98.81 | 100.62 | 1.83 |

3.1.6.3.- Ensayo de absorción por sumersión

El ensayo de absorción por sumersión simula la inundación durante las precipitaciones pluviales. La Tabla 3.6 presenta los resultados del ensayo en donde las muestras se sumergieron completamente durante 1 hora a un recipiente conteniendo agua. La muestra de adobe control E que no contenía ningún tipo de aditivo exhibió daños severos, perdiendo su estructura presentando una consistencia lodosa mientras que el agua se tornó color marrón tal y como se observa en la Figura 3.13. Para el caso de las muestras de ladrillos experimentales con aditivos como son las de tipo A, AV, L, M, LM, éstas presentan un comportamiento estable en cuanto a su estructura al término de la prueba sin presentar deformaciones o daño significativo (Figura 3.13b).

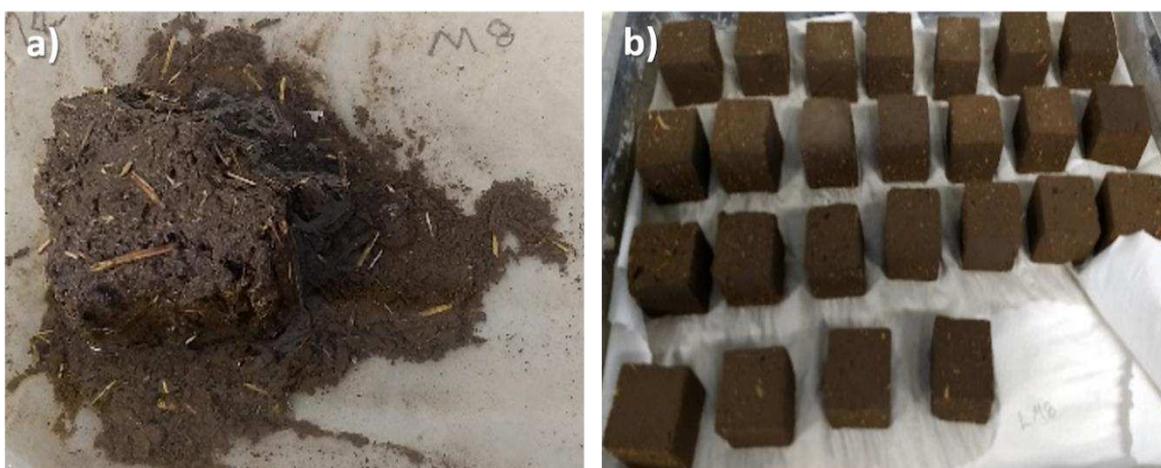


Figura 3.13.- Sumersión de a) Muestra E, b) Resto de las formulaciones.

Las muestras A, AV, L, M, LM, se podían agarrar sin que se fueran a fracturar o presentar deformación en la superficie por la fuerza que se ejerce al sujetarlas ya que exhibían muy buena consolidación. En la Tabla 3.6 se muestran los resultados de la cantidad de agua que absorbieron cada formulación después de estar sumergido. Se observa que las formulaciones con A, AV y L presentan porcentajes similares en su capacidad de absorción de agua, es notable que al 1% de aditivo se obtienen mayores porcentajes de agua en las muestras y a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo la capacidad de absorción decrece como se aprecia a 8% donde la cantidad de agua en la muestra es de tan solo el 3%.

Tabla 3.6.- Absorción en (grs) de las formulaciones de adobes.

| Muestras | Peso en seso (grs) | Peso saturado (grs) | Capacidad de absorción (%) |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| E | - | - | - |
| A1 | 114.14 | 131.88 | 15.54 |
| A2 | 116.62 | 131.17 | 12.46 |
| A4 | 115.01 | 120.79 | 5.02 |
| A6 | 116.22 | 120.95 | 4.06 |
| A8 | 106.79 | 110.21 | 3.20 |
| AV1 | 104.97 | 118.33 | 12.73 |
| AV2 | 105.96 | 112.78 | 6.43 |
| AV4 | 100.64 | 105.40 | 4.73 |
| AV6 | 114.06 | 118.50 | 3.89 |
| AV8 | 103.67 | 106.88 | 3.09 |
| L1 | 108.97 | 116.69 | 7.08 |
| L2 | 103.26 | 108.19 | 4.78 |
| L4 | 99.07 | 103.07 | 4.03 |
| L6 | 100.71 | 104.10 | 3.37 |
| L8 | 98.92 | 102.85 | 3.98 |
| M1 | 100.33 | 119.16 | 18.76 |
| M2 | 101.29 | 119.44 | 17.91 |
| M4 | 108.39 | 126.02 | 16.26 |
| M6 | 103.79 | 119.57 | 15.20 |
| M8 | 103.56 | 118.73 | 14.64 |
| LM1 | 108.44 | 129.28 | 19.21 |
| LM2 | 105.42 | 124.82 | 18.39 |
| LM4 | 97.05 | 113.64 | 17.08 |
| LM6 | 99.43 | 116.72 | 17.38 |
| LM8 | 98.81 | 115.46 | 16.84 |

Las formulaciones M y LM presentaron valores mayores a diferencia de las formulaciones anteriores, siendo que al 1% se obtuvo una capacidad de absorción de alrededor de 19% de agua, sin embargo, no se observa un cambio significativo a medida que se incrementa el porcentaje de aditivos ya que en las formulaciones del 2% al 8% los valores de la capacidad de absorción de agua oscilan entre 15 y 18% invariablemente.

Los adobes convencionales pueden sufrir daño interno como la desintegración parcial o total del sistema de tierra durante las pruebas de absorción. Las muestras de ladrillos experimentales con aditivos sintéticos o naturales se comportaron adecuadamente en la prueba manteniendo su estructura y consistencia firme y sin perder consistencia por degradación del agua. Los resultados obtenidos indican que los aditivos actuaron en el sistema recubriendo las partículas de tierra como una película impermeable minimizando los efectos generados por la absorción y la adsorción del agua. Por lo tanto, se verifica que un adobe estabilizado con polímeros de origen sintético y natural produce una mejora en su resistencia al agua.

3.2.- Caracterización mecánica de los ladrillos de adobe

3.2.1.- Pruebas a compresión

Las mediciones de parámetros mecánicos compresivos se vuelven significativos porque, por lo general, la arquitectura el diseño no implica tensiones de tracción en materiales de tierra. La resistencia a la compresión de la construcción en materiales en seco fabricados con tierra como bloques de tierra y tierra compactada generalmente difieren de 5 a 50 Kg/cm² (0,49–4,9 MPa). Este valor no sólo depende de la cantidad y tipo de arcilla sino también en la granulometría distribución de los componentes del suelo, así como el método de preparación y compactación [11,12]. La siguiente secuencia de valores mostrada en la Tabla 3.7 exhibe los resultados numéricos, en promedio, de los parámetros mecánicos del lodo experimental ladrillos sometidos a fuerzas de compresión externas en sus diversas formulaciones.

En primer lugar, es destacable que los valores de resistencia a la compresión no varían significativamente entre cada muestra y no depende de la composición. Sin embargo, el módulo de Young (E) que mide la resistencia a ser deformado elásticamente es mayor en todas las series con aditivos adicionales (comerciales y naturales) en comparación con la muestra de control “E” (sin aditivos).

Tabla 3.7.- Valores de resistencia a la compresión para las diferentes formulaciones de las muestras de adobe.

| Muestras | PROPIEDADES MECÁNICAS | | | |
|----------|-----------------------|--|----------------------------------|-------------------------|
| | Carga Máxima | Resistencia a la compresión (σ) | Deformación Total (ϵ) | Módulo Elástico (E) |
| | N | MPa | % | MPa |
| E | 400 | 1.98 | 2.50 | 120.14 |
| A1 | 3890 | 1.98 | 5.75 | 573.73 |
| A2 | 3009 | 1.49 | 6.00 | 437.03 |
| A4 | 2760 | 1.37 | 10.00 | 230.73 |
| A6 | 2940 | 1.46 | 8.00 | 360.39 |
| A8 | 2490 | 1.23 | 7.00 | 443.96 |
| AV1 | 4007.6 | 1.98 | 7.75 | 370.19 |
| AV2 | 4006.9 | 1.98 | 4.75 | 557.04 |
| AV4 | 4004.37 | 1.98 | 5.00 | 489.14 |
| AV6 | 3680 | 1.82 | 10.00 | 412.52 |
| AV8 | 3812.03 | 1.89 | 7.75 | 393.79 |
| L1 | 2382 | 1.76 | 9.50 | 270.49 |
| L2 | 2471.25 | 1.20 | 9.00 | 340.71 |
| L4 | 3292.5 | 1.62 | 11.50 | 335.33 |
| L6 | 2272.34 | 1.12 | 8.00 | 345.19 |
| L8 | 3643.5 | 1.80 | 10.50 | 492.94 |
| LM1 | 2317.5 | 1.14 | 10.00 | 366.03 |
| LM2 | 1962.5 | 0.96 | 10.00 | 209.93 |
| LM4 | 1892.97 | 0.93 | 9.50 | 240.44 |
| LM6 | 2379.53 | 1.18 | 9.25 | 350.54 |
| LM8 | 2670.31 | 1.32 | 8.50 | 308.55 |
| M1 | 3648.12 | 1.82 | 9.50 | 454.65 |
| M2 | 2985.16 | 1.47 | 10.00 | 156.28 |
| M4 | 1907.66 | 0.94 | 12.00 | 368.63 |
| M6 | 411.41 | 0.20 | 3.00 | 188.26 |
| M8 | 1365.16 | 0.67 | 12.00 | 101.81 |

El módulo de Young es probablemente uno de los parámetros mecánicos más inciertos de los materiales de barro [31]. Está claro que, comúnmente, la relación esfuerzo-deformación en los materiales de tierra es inelástica y no lineal, que el criterio para la determinación es complejo, y que los resultados experimentales pueden ser variables. A partir de las curvas de comportamiento esfuerzo-deformación, se registró la resistencia a la compresión resultante de la prueba de compresión.

El módulo de Young también fue evaluado a partir de las curvas de esfuerzo-deformación para niveles bajos de estrés aproximadamente entre el 5% y el 10% del esfuerzo de la muestra.

La dispersión de los parámetros experimentales obtenidos entre las muestras de la misma serie fue mínima y es posible atribuirlo a la falta de homogeneidad inherente y la aleatoriedad de los ladrillos de barro, que también son mecánicamente condicionados a diversos factores de fabricación. Sin embargo, en los adobes cuyas series incluyen aditivos comerciales (etiquetados como "A" y "AV") se observaron valores de rigidez más altos, lo que indica que estos aditivos confieren esta característica al material.

Anteriores análisis realizados por Daneels y Guerrero-Baca [38] sobre propiedades mecánicas en muestras reales de adobe de construcciones arqueológicas de La Joya revelaron las estrategias de construcción a través de la excavación arqueológica. Descubrieron que el promedio resistencia a la compresión, en base a 18 muestras de ambas capas de piso y pared tiene un promedio de 2.35 MPa, pero con un amplio rango de variación, de 0.78 a 3.08 MPa en paredes (5 muestras) y de 0,26 a 7,58 MPa en suelos (13 muestras). También estimaron que la menor resistencia en algunos pisos pueden ser una posible consecuencia del diferencial meteorización. Esto sugiere que los antiguos constructores tenían mejores procedimientos fabricación. En comparación con otros investigadores, los ladrillos de lodo experimentales analizados en esta investigación exhibieron los resultados esperados para los sistemas constructivos vernáculos.

Arroyo-Matus et al [47] caracterizaron las propiedades mecánicas de adobe (ladrillos de barro) representativo de casas de la zona sur de México. Ellos encontraron que tales adobes, en general, presentan valores muy bajos de resistencia a la compresión en promedio de 1.10 MPa, mientras que el módulo de elasticidad promedio de los materiales de la región analizada fue de 312 MPa. Varum et al. [48] obtuvieron los parámetros mecánicos de ladrillos de barro recogidos en estructuras existentes de Aveiro, Portugal encontrando una resistencia a la compresión entre 0,70 y 2,15 MPa y módulo de Young entre 87 y 448 MPa.

Saroza et al [49] fabricaron ladrillos de barro según diferentes formulaciones usando varios suelos arcillosos de Villa Clara, Cuba, obteniendo valores de resistencia a la compresión de entre 1 y 1,5 MPa. La caracterización in situ de ladrillos de barro arqueológicos de Turkmenistán también se ha llevado a cabo para identificar las propiedades mecánicas en compresión. Se demostró que los valores de esfuerzo eran levemente dispersos, con un valor promedio de 1.04 MPa y un módulo de Young (E) de 215,6 MPa [50].

Como se mencionó anteriormente, los materiales de tierra como los ladrillos de barro son materiales compuestos heterogéneos cuyo comportamiento mecánico es totalmente influenciado por sus procesos de compactación y fraguado, composición, y por la naturaleza de la carga en la construcción. Éstos comúnmente no siguen rigurosamente la ley de Hooke ya que no exhiben un comportamiento perfectamente elástico. En consecuencia, la forma de la curva tensión-deformación es muy compleja.

Al analizar la prueba de compresión de todos los ladrillos de barro experimentales se observó que las muestras exhibieron variaciones considerables en correlación con sus valores de la capacidad de carga última en la compresión y en su capacidad de deformación debido a su inherente heterogeneidad. Todas las pruebas evaluadas se realizaron hasta que el esfuerzo a la compresión disminuyó al nivel de esfuerzo residual después de apareció una línea de descenso posterior al máximo en la curva de esfuerzo-deformación. Algunas curvas no mostraban datos posteriores al pico máximo ya que fue eliminado por el software indicando que, en ese punto, se produjo la fractura. La Figura 3.14 presenta las curvas de esfuerzo-deformación-amplitud de muestras representativas de los ladrillos analizados bajo esfuerzos de compresión. A continuación, se detallan las observaciones por cada grupo:

Ladrillos de barro con emulsión asfáltica comercial (Variedad A).

Las curvas esfuerzo-deformación-amplitud de los adobes con emulsión asfáltica comercial (variedad “A”) en comparación con la muestra control “E” sin aditivo se presentan en la (Figura 3.14A).

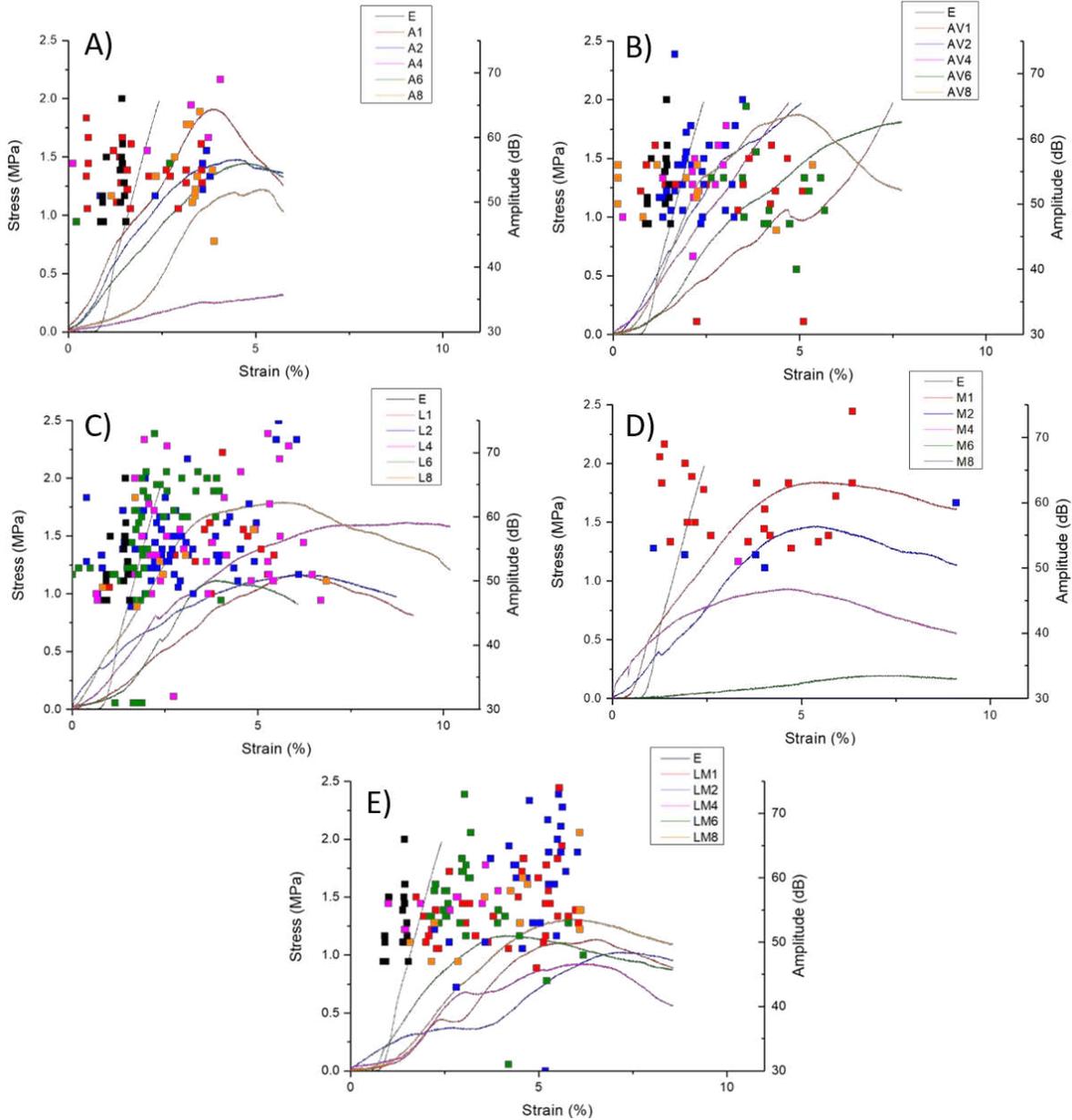


Figura 3.14.- Diagramas esfuerzo-deformación-amplitud obtenidos de la aplicación de ensayos de compresión acoplados a emisión acústica.

Todos los especímenes se sometieron considerablemente a altas deformaciones inelásticas que la muestra de control, la cual mantuvo su capacidad para soportar cargas de compresión. El comportamiento mecánico de la muestra de control parece ser rígido, con una zona elástica muy pronunciada libre de deformación plástica.

Por su parte, los adobes de la variedad “A” muestran una aparente disminución en su resistencia a la compresión (σ) cuando se aumenta la fracción de aditivo. Sin embargo, la deformación muestra un ligero aumento de la misma tendencia en las últimas tres formulaciones (A4, A6 y A8). Este efecto podría ser una plastificación conferida a los adobes por el aumento de la concentración de la emulsión asfáltica. Las señales de emisión acústica definen el mecanismo de fractura de los materiales. Las señales de baja amplitud están relacionadas con la compresión de los espacios intersticiales en los adobes. Cuando los poros se comprimen, emiten señales elásticas de baja intensidad y amplitud que eventualmente, cuando el esfuerzo externo de la compresión continúa, emiten ondas de una naturaleza de mayor energía generando una mayor intensidad y amplitud, correlacionándolos con daños significativos tales como agrietamiento. En las curvas de la serie “A” se aprecia una mayor densidad de señales EA percibidas en las que se muestran los eventos significativos y secuenciales del desarrollo de daños que conllevan en última instancia a la causa de la fractura catastrófica. Los sensores de emisión acústica detectaron señales en amplitudes alrededor de 50 dB relacionados con daños significativos dentro del material comúnmente observado antes de la fractura total.

Ladrillos de barro con emulsión asfáltica comercial más polímero de vinilo (Variedad AV).

La Figura 3.14B exhibe las curvas de esfuerzo-deformación-amplitud para ladrillos de barro con emulsión asfáltica comercial y adicional aditivo de vinilo (variedad etiquetada como “AV”). El comportamiento mecánico en comparación con el ladrillo de barro de control “E” sin aditivo se presenta. Para esta formulación, el aditivo de vinilo adicional parece proporcionar un efecto positivo (desde un punto de vista mecánico) con un valor de resistencia a la compresión (σ) más uniforme de aproximadamente unos 2 MPa en comparación con la variedad “A”. La capacidad de deformación se observa con mejores rendimientos en las formulaciones de muestras AV6 y AV8. Las señales acústicas son consistentes en la evolución del daño que aparece en amplitudes entre 40 y 60 dB correspondiente a la generación de fallas internas significativas como grietas durante el proceso compresión. Las ondas elásticas detectadas a más baja intensidad con amplitudes inferiores a 30 dB corresponden a la formación de microfisuras y a la fricción entre las paredes internas del material y su refuerzo constituyentes.

Ladrillos de barro con betún diluido en aceite de linaza (Variedad L).

El agregado natural proporciona al adobe propiedades similares a las observadas en la variedad “A” (emulsión asfáltica comercial). El valor del esfuerzo compresivo (σ) es generalmente cercano a 1.5 MPa, pero la deformación tiende a ser ligeramente mayor a valores cercanos a 10% de deformación con excepción de la observada en la formulación L6, que exhibió una deformación mucho menor cuando se fractura a aproximadamente 1.2 MPa. Cabe señalar, a diferencia de las muestras experimentales anteriores que contienen aditivos comerciales (“A” y “AV”) que, en la variedad L, se produce una densidad mucho mayor de señales acústicas en las zonas de mayor concentración de daños, con intensidades entre 40 y 60 dB (Figura 3.14C). Este efecto es muy probable que sea causado por el betún que cuando se combina con el barro y los componentes del ladrillo (tierra y fibras), consolida el sistema, provocando un mayor número de grietas que se producen con el aumento de la aplicación del esfuerzo a compresión.

Ladrillos de barro con betún diluido en aceite de maíz (Variedad M).

La Figura 3.14D presenta la curva de esfuerzo-deformación-amplitud de los adobes enmendadas con betún diluido en aceite de maíz (variedad “M”). Para esta formulación se observó que el betún disuelto en aceite de maíz confería buen comportamiento mecánico a bajas formulaciones (M1); sin embargo, la tendencia fue a disminuir estas propiedades cuando el contenido de aceite aumentó en la formulación de ladrillos de barro. No fue posible establecer un comportamiento mecánico uniforme para compresión en las muestras M6 y M8 ya que se fracturaron rápidamente a la primera señal de daño, generalmente causado por una grieta interna. Las señales acústicas fueron detectadas en baja cantidad exhibiendo pocos eventos mecánicos ciertamente relacionados con alta liberación de energía producida por un daño significativo previo a la fractura.

Ladrillos de barro con betún diluido en aceite de linaza y maíz en proporción 1:1 (Variedad LM).

El sistema del betún en dilución de aceite de linaza/maíz parece estabilizar el comportamiento de la curva de los adobes evaluados (Figura 3.14E).

En las primeras tres formulaciones, una excelente tenacidad (capacidad plástica) de tendencia similar (aproximadamente 10% de deformación) se exhibe a lo largo con 1 MPa de resistencia a la compresión (σ). Con el aumento del porcentaje de aditivo, en formulaciones LM6 y LM8, la deformación es levemente reducida, pero el esfuerzo máximo aumenta en la misma manera. Así como el aumento en densidad de señal acústica se observó en la serie “L”, la tendencia en “LM” parece seguir la misma pauta. Esta es una indicación de que la adición de linaza al alquitrán favorece la cohesión interna aumentando el número de eventos mecánicos en los adobes, es decir, un mayor desarrollo del daño se genera a través de la formación de grietas que producen energías de intensidad entre 40 y 60 dB.

3.2.2.- Análisis fractográfico

En general, la aplicación gradual de la carga de compresión sobre muestras experimentales de adobe induce deformaciones inelásticas longitudinal y transversal dentro del sistema del material procedente de microfisuras que da paso a la generación de grietas de mayor tamaño en el costado lateral de los adobes provocando el colapso.

Los ladrillos de barro experimentales fabricados sin contener aditivo, etiquetado "E" (control muestra), han fallado sin demostrar señales de fractura externas significantes. Estas muestras, al no tener más adherentes, tienden a fallar más uniformemente. Solo cuando la carga de compresión fue llevada más allá después de los primeros signos de daño, el ladrillo experimentó grietas y fractura externa. La Figura 3.15A muestra las muestras fracturadas de los adobes serie “A” (Emulsión asfáltica comercial Impertop®). Las muestras de baja formulación (%) tienden a crear una combinación de agrietamiento transversal y longitudinal, mientras que las muestras de mayor concentración (“A6” y “A8”) exhibieron una mayor cantidad de grietas longitudinales y diagonales en los lados laterales de los especímenes. Los adobes serie “AV” presentados en la Figura 3.15B contienen Vinnapas® 5044 además del emulsionante asfáltico. Estos agregados comerciales rigidizan los ladrillos, que presentaban preferentemente fisuración lateral generado por los concentradores de esfuerzos presentes en las esquinas de la muestra cúbica.

En cuanto a las series “A” y “AV”, éstas revelaron una redistribución de las fuerzas internas dentro de la matriz de tierra debido a una mejora en cohesión interna del ladrillo. Como resultado, después de la finalización de las pruebas de compresión, el material no se había desintegrado completamente. En cambio, la cohesión interna mantuvo unidas partes significativas de la matriz de tierra, retrasando así la falla. A pesar del hecho de que los laterales de los ladrillos experimental de barro sufrieron algunos daños, su núcleo central aparentemente permaneció lo suficientemente entero y no perdió coherencia. Además, no se observó que ninguna fractura ocurriera en las fibras de paja; sólo la pérdida de vínculo en la interfase entre las fibras y la tierra se notaba cerca de las grietas.

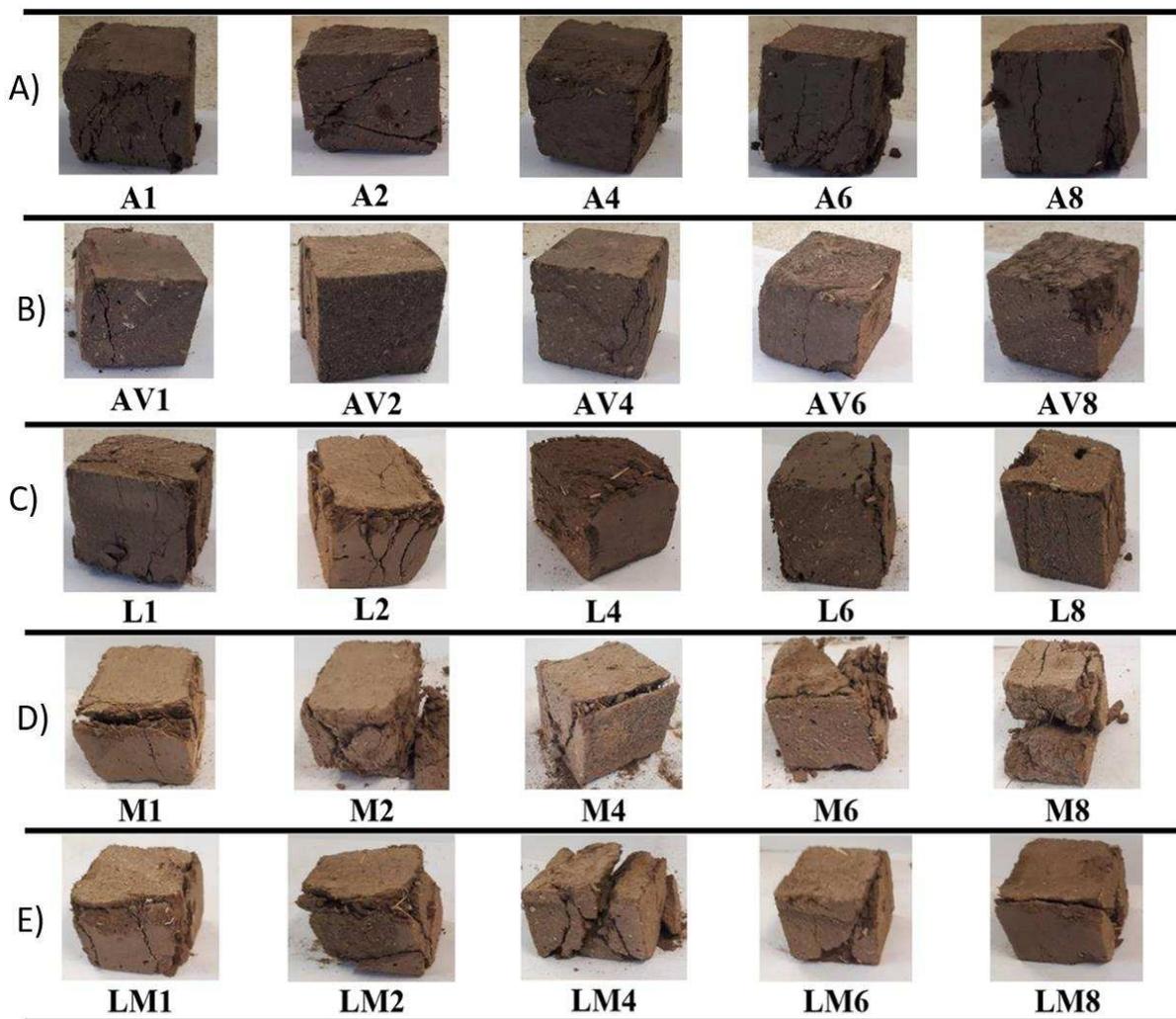


Figura 3.15.- Tipos de fallas en las diferentes formulaciones de adobe

Las probetas cúbicas fabricadas con betún diluido en aceite de linaza (Variedad L) se muestran en la Figura 3.15C. Estos sufrieron mayor deformación con importantes fracturas finales incluyendo pulverización. Las grietas inicialmente se desarrollaron en paralelo y los esfuerzos cortantes causaron su crecimiento hasta que el material se fracturó. Finalmente, los ladrillos experimentales de barro serie “M” y “LM” (Figuras 3.15D y 3.15E) exhibieron tendencias similares a las observado en los modos de fractura de la serie “L”. Un desarrollo de daño severo cuya particularidad es la generación de grietas significativas que progresan en diferentes direcciones que generalmente depende de la geometría interna del ladrillo (huecos, intersticios, impurezas, dirección del reforzamiento fibrosos, etc.).

El análisis fractográfico de adobes en fallas por compresión ha sido estudiado previamente [31] en el que los autores examinan el comportamiento mecánico de muestras de adobe en ensayos de compresión en función de la orientación de la muestra. Establecen que la orientación de las partículas de arcilla juega un papel importante al formar microestructuras planas que pueden dar lugar a propiedades anisótropicas.

Independientemente de la formulación de la muestra, se observó un comportamiento mecánico a compresión que ocurre en tres etapas principales. La existencia de defectos internos y discontinuidades en muestras de ladrillos de barro son compactado durante la primera aplicación de la carga lo que lleva a un incremento de tensión bajo durante la primera fase. Este evento mecánico se lleva a cabo para un sistema más rígido, y el material exhibe un comportamiento lineal elástico. En la segunda etapa, cerca de la carga máxima, aparece una fase no lineal que indica acumulación del daño y posterior degradación en las muestras.

Finalmente, la última etapa implica una disminución en la resistencia a la compresión producida por el desarrollo de daños significativos en forma de varias grietas que aparecen lateralmente en las muestras. Se concluye que el ladrillo de barro no es un material homogéneo que puede mostrar un cierto grado de anisotropía y así afectar el desarrollo de grietas y modos de fallas cuando es aplastado en compresión.

3.2.3.- Pruebas a flexión

El análisis de los ensayos mecánicos ejecutados sobre las barras obtenidas de los ladrillos experimentales de adobes en todas sus formulaciones se realizó en un dispositivo denominado de 3 puntos acoplado a la máquina universal Shimadzu. Tales ensayos se llevaron a cabo con las muestras en posición horizontal sobre dos cabezales como apoyos fijos y un cabezal en movimiento, el cual ejerce una carga puntual en dirección vertical sobre un punto medio de la cara superior de cada una de las muestras incidiendo sobre las muestras dos momentos flexionantes.

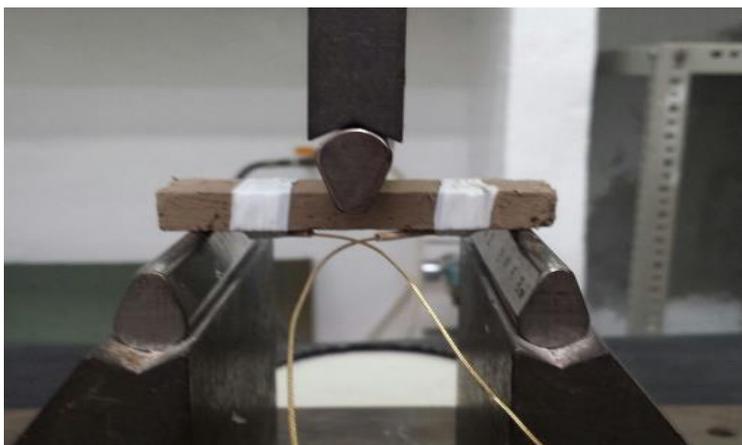


Figura 3.16.- Ensayo a flexión de tres puntos acoplado a Emisión Acústica (EA).

Las muestras al encontrarse sometidas a la carga puntual de flexión, de modo que la tensión máxima es aplicada sobre el centro de ellas, se provocan fracturas en la zona de tensión, estas grietas se presentan desde la cara inferior (Luz inferior) aumentando su desplazamiento entre los poros e imperfecciones hasta la cara superior de la barra (Luz superior).



Figura 3.17.- Grietas producidas por el ensayo a flexión de tres puntos.

La Tabla 3.8 representa los resultados de los parámetros mecánicos obtenidos de los ensayos de flexión a tres puntos donde se aprecia la denominación de todas las muestras en condiciones normales. Las propiedades mecánicas con mayor importancia son la carga máxima a la rotura en Newtons (N) a la cual, las muestras se encuentran sometidas durante el ensayo, la deformación máxima o de ruptura que las muestras presentan al aplicarse carga sobre cada una de ellas representado en porcentaje (%), el esfuerzo máximo que las muestras exhiben estando en la deformación plástica representado en MPa y por último la representación del módulo elástico (E) obtenido de la constante de proporcionalidad entre la deformación elástica y el esfuerzo uniaxial representada en la pendiente de la parte recta en cada una de las muestras por medio del diagrama esfuerzo-deformación.

De acuerdo con la Tabla 3.8 la muestra serie E (sin aditivos) exterioriza un esfuerzo máximo de 0.45 MPa la cual de acuerdo con la norma E.080 propone una resistencia a la flexión de 0.4 MPa para un adobe, por lo tanto, la muestra E cumple con ese requisito siendo un modelo en su propiedad mecánica para la determinación de las propiedades de las demás muestras. Esta muestra alcanza un módulo elástico de 1.8 MPa siendo de una rigidez media para este tipo de muestras con una deformación del 0.31% por el cual el comportamiento plástico es muy bajo.

Las muestras serie A presentan una resistencia a la ruptura mayor a la muestra E, esto debido a la influencia del aditivo Impertop A. Otra característica notoria es la rigidez de las muestras la cual es mayor cuando el contenido del aditivo es menor en su composición, por otra parte, presentan una deformación máxima menor a la muestra E con excepción de la muestra A8. La muestra A6 presentó fractura al ser montada en la máquina universal previo a realizar el ensayo. Al igual que las muestras serie A, las muestras serie AV presentan una rigidez mayor a las muestras E con el módulo elástico por arriba de la muestra antes mencionada, la carga máxima recibida por parte de las muestras es elevada, la resistencia a la ruptura exhibida por esta serie, en promedio, es mayor que las series anteriores, la muestra AV6 también presentó dificultades durante su montura al dispositivo y presentó fractura previa a realizar el ensayo.

Tabla 3.8.- Parámetros mecánicos de los ensayos a flexión.

| Muestras | Propiedades Mecánicas | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| | Carga Máxima | Deformación Máxima | Esfuerzo Máximo | Módulo Elástico |
| | N | % | MPa | MPa |
| E | 16.56 | 0.31 | 0.45 | 1.81 |
| Muestras serie A | | | | |
| A1 | 21.72 | 0.2 | 0.58 | 3.37 |
| A2 | 32.66 | 0.13 | 1.45 | 9.21 |
| A4 | 20.63 | 0.19 | 0.49 | 2.52 |
| A6 | - | - | - | - |
| A8 | 18.12 | 0.42 | 0.56 | 1.2 |
| Muestras serie AV | | | | |
| AV1 | 18.59 | 0.26 | 0.50 | 2.18 |
| AV2 | 45.63 | 0.61 | 1.09 | 1.83 |
| AV4 | 37.66 | 0.23 | 1.05 | 4.08 |
| AV6 | - | - | - | - |
| AV8 | 39.69 | 0.42 | 1.02 | 2.47 |
| Muestras serie L | | | | |
| L1 | 14.53 | 0.16 | 0.33 | 2.78 |
| L2 | 18.28 | 0.28 | 0.47 | 2.02 |
| L4 | 11.25 | 0.11 | 0.14 | 2.27 |
| L6 | 18.12 | 0.33 | 0.51 | 1.64 |
| L8 | 12.66 | 0.22 | 0.34 | 1.94 |
| Muestras serie M | | | | |
| M1 | 9.97 | 0.22 | 0.25 | 1.63 |
| M2 | 11.41 | 0.53 | 0.28 | 0.58 |
| M4 | 17.34 | 0.19 | 0.33 | 0.99 |
| M6 | 16.41 | 0.22 | 0.35 | 1.74 |
| M8 | 10.78 | 0.24 | 0.27 | 1.28 |
| Muestras serie LM | | | | |
| LM1 | 16.25 | 0.38 | 0.44 | 1.47 |
| LM2 | 4.63 | 0.03 | 0.14 | 3.99 |
| LM4 | 7.97 | 0.15 | 0.21 | 2.05 |
| LM6 | 11.87 | 0.18 | 0.33 | 2.03 |
| LM8 | 18.91 | 0.39 | 0.66 | 0.59 |

De acuerdo con los datos obtenidos de la serie L, las muestras L2 y L6 presentan propiedades similares a las requeridas, mientras el resto de las muestras presentan propiedades por debajo. En la relación de la rigidez mantienen una rigidez media, esto al recibir una carga máxima menor y presentar una deformación mínima. Las muestras de la serie M obtienen una resistencia muy baja a la fuerza aplicada, ocasionando una ruptura prematura con unas cargas máximas pequeñas. La muestra M2 presenta una deformación mayor a las otras muestras, con ello, la relación de la rigidez se encuentra muy baja para esta muestra en específico. Los datos obtenidos para la serie LM demuestran que las muestras soportan cargas pequeñas, con excepción de las muestras LM1 y LM8 las cuales se mantienen en el rango de esfuerzo requerido para la construcción. Con la recopilación de los datos obtenidos de los ensayos de flexión, se procedió a la construcción de las gráficas esfuerzo-deformación para identificar el comportamiento de cada una de las muestras y con estos resultados se determinaron los valores presentados en la Tabla 3.8. Las señales de emisión acústica fueron recopiladas junto con los datos de los ensayos de flexión, para posteriormente estos graficarlos en conjunto de la deformación para mantener una relación entre la deformación unitaria de cada una de las muestras con la liberación de energía en cada uno los eventos (fisuras internas) presentados durante el ensayo de flexión.

Algunas de las gráficas representativas de cada muestra de las formulaciones ensayadas se encuentran exhibidas en la Figura 3.18. En comparación de las gráficas presentadas en la Figura 3.18, las muestras E, AV1 y L8 que corresponden a las Figuras 3.18a), c) y d) respectivamente, presentan un pequeño esfuerzo al aplicarse la carga sin obtener deformación alguna, mientras que la muestra M2, Figura e), presenta deformación inicial sin oponer un esfuerzo a la carga aplicada. El comportamiento de las gráficas en las muestras E y L8, Figuras 3.18a) y d) respectivamente, mantienen un comportamiento semejante con una cadencia de esfuerzo constante respecto a la deformación que estas presentan; Mientras que las muestras AV1, M2 y LM6, Figuras 3.18c), e) y f) respectivamente presentan un pico, donde la caída del esfuerzo es repentina desde el esfuerzo máximo obtenido hasta lograr mantenerse en caída constante conforme a la deformación.

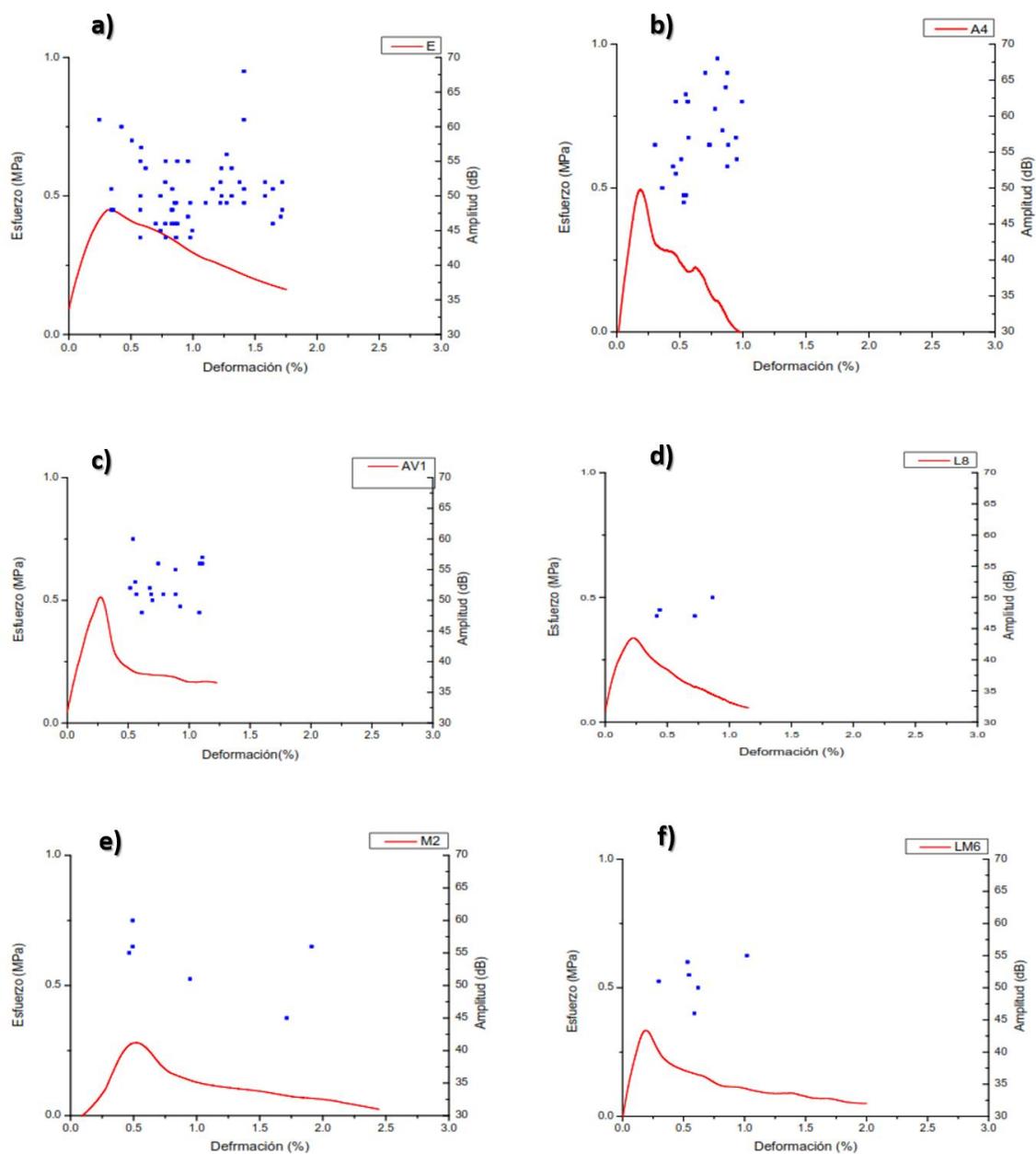


Figura 3.18.- Gráficas representativas a) Muestra estándar serie E, b) Muestra serie A aditivo Impertop A, c) Muestra serie AV1 aditivo Impertop/Vinnapas, d) Muestra serie L aditivo chapopote en aceite de linaza, e) Muestra serie M aditivo chapopote disuelto en aceite maíz, f) Muestra serie LM aditivos chapopote disuelto en aceite de maíz y linaza.

De acuerdo con los datos obtenidos de los ensayos de emisión acústica, los eventos mecánicos internos que dan lugar a las liberaciones de energía aparecen poco después de que las muestras alcanzaran su esfuerzo máximo, de modo que las liberaciones comienzan a presentarse durante y después de la ruptura del material, estos eventos se exponen en un rango de 40 a los 65 decibelios como amplitud máxima. Conforme a los resultados de los datos de emisión acústica las muestras E, A4 y AV1, Figuras 3.18a), b) y c) respectivamente, exhiben mayor cantidad de liberaciones de energía con relación a la gráfica esfuerzo-deformación, mientras que las muestras L8, M2 y LM6, Figuras 3.18d), e) y f) respectivamente presentan una menor cantidad de liberaciones. Este efecto puede ser una indicación del aporte del aditivo al sistema terreo como consolidante favoreciendo la cohesión cuando se emplean aditivos sintéticos el cual recubre eficientemente las partículas de la matriz (suelo) provocando, bajo los esfuerzos a flexión, un requerimiento de esfuerzo mayor para fracturar las muestras generando a su vez una cantidad de eventos acústicos mayor que cuando se utilizan aditivos naturales, los cuales no aportan adecuada cohesión al sistema.

Las muestras presentaron grietas transversales las cuales se desarrollan entre las cavidades e imperfecciones que cada una de las muestras posee; esta grieta se manifiesta en la zona de concentración de esfuerzo, sin obtener una separación total tras la falla del material como lo muestra la Figura 3.19.



Figura 3.19.- Muestras fracturadas transversalmente a) muestra A2, b) muestra AV4.

3.3.- Pruebas de intemperismo acelerado.

El análisis de los resultados en los ensayos realizados de intemperismo acelerado fue para cincuenta y dos muestras, las cuales fueron veintiséis muestras sometidas al ensayo de intemperismo exponiéndose a 15 días y veintiséis muestras exponiéndose a 30 días.

Durante la exposición a los ciclos de radiación y condensación, las muestras presentaron absorción de humedad en todos sus perfiles y una ligera desintegración en estas como lo muestra la Figura 3.20; con ello las muestras perdieron material ligeramente en las orillas disminuyendo sus dimensiones.



Figura 3.20.- Muestras con humedad y fractura transversal presentada durante los ciclos de intemperismo.

También se observó la existencia de muestras que sufrieron fisuras durante el ensayo de intemperismo, con relación al tiempo que éstas permanecieron en la máquina, las pequeñas fisuras fueron aumentando su desplazamiento hasta convertirse en fracturas transversales en las muestras como lo muestra la Figura 3.20. Algunas muestras resultaron con fracturas durante su permanencia en el equipo de intemperismo demostrando un efecto adverso severo en las superficies de aquellas observándose un efecto que corrobora lo evaluado en las pruebas de absorción de humedad, es decir, las muestras con aditivo sintético absorbieron una cantidad mayor durante los ciclos de humedad (Figura3.21).



Figura 3.21.- Muestra experimental de serie LM con humedad en sus perfiles.

A pesar de que algunas muestras mostraron deficiencias para ser ensayadas, algunas otras lograron rescatarse para intentar la evaluación de sus propiedades mecánicas bajo cargas a flexión en los periodos de 15 y 30 días. Fueron retiradas del equipo y se colocaron en un desecador para eliminar el exceso de humedad (Figura 3.22).



Figura 3.22.- Muestras a secar para ser ensayadas en flexión.

3.3.1.- Muestras de adobe sometidas a intemperismo a 15 días

La Tabla 3.9 presenta los resultados de los ensayos de flexión de aquellos adobes sometidos a ensayos de intemperismo acelerado durante un periodo de 15 días, expresando la denominación de cada una de las muestras y sus propiedades respectivamente. De acuerdo con los resultados de esta Tabla, en comparación con lo obtenidos en la Tabla 3.8 la mayoría de las muestras sometidas a ciclos de intemperismo por 15 días muestran una estabilidad en sus propiedades mecánicas con respecto los valores del esfuerzo máximo (carga). Se observó, en las muestras con aditivos sintéticos, un ligero aumento en sus propiedades en algunos casos y en otros no hubo variación esto en el parámetro de esfuerzo máximo, sin embargo, sí se observó una disminución en el módulo elástico. Caso contrario para los materiales con aditivo natural quienes redujeron los valores de esfuerzo máximo significativamente, así como los valores de la resistencia elástica (E). Sin embargo, presentaron un aumento en su elongación. También fue notable que algunas muestras tales como la A6, AV6, L2, M6, M8 y LM8 se fracturaron casi de manera inmediata sin lograr conseguir algún resultado para la obtención de los parámetros mecánicos.

Las gráficas con los datos de los ensayos de flexión a tres puntos y emisión acústica recabados, se encuentra representados en la Figura 3.23 exponiendo en ellas seis gráficas representativas obtenidas. Las señales acústicas detectados se emitieron de manera similar a las observadas en las gráficas de la Figura 3.18. Las señales solo parecen estar más dispersas debido a que los materiales a 15 días de intemperismo mostraron una mayor elongación.

Tabla 3.9.- Ensayos de flexión condiciones de intemperismo acelerado a 15 días.

| Muestras | Propiedades Mecánicas | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| | Carga Máxima | Deformación Máxima | Esfuerzo Máximo | Módulo Elástico |
| | N | % | MPa | MPa |
| E | 22.40 | 0.44 | 0.81 | 1.79 |
| Muestras serie A | | | | |
| A1 | 44.60 | 0.77 | 1.03 | 1.81 |
| A2 | 27.07 | 0.24 | 0.98 | 3.99 |
| A4 | 22.93 | 0.50 | 0.83 | 1.59 |
| A6 | - | - | - | - |
| A8 | 27.29 | 0.54 | 0.99 | 2.18 |
| Muestras serie AV | | | | |
| AV1 | 34.23 | 0.59 | 1.24 | 3.04 |
| AV2 | 34.81 | 0.72 | 1.26 | 2.97 |
| AV4 | 27.92 | 0.40 | 1.01 | 2.46 |
| AV6 | - | - | - | - |
| AV8 | 5.29 | 0.06 | 0.19 | 1.13 |
| Muestras serie L | | | | |
| L1 | 5.98 | 0.15 | 0.21 | 0.23 |
| L2 | - | - | - | - |
| L4 | 14.89 | 0.38 | 0.54 | 1.43 |
| L6 | 22.89 | 0.52 | 0.83 | 1.51 |
| L8 | 10.73 | 0.09 | 0.39 | 3.65 |
| Muestras serie M | | | | |
| M1 | 4.09 | 0.19 | 0.14 | 0.45 |
| M2 | 19.14 | 0.48 | 0.69 | 1.06 |
| M4 | 12.71 | 0.41 | 0.46 | 1.38 |
| M6 | - | - | - | - |
| M8 | - | - | - | - |
| Muestras serie LM | | | | |
| LM1 | 4.03 | 0.19 | 0.14 | 0.52 |
| LM2 | 18.76 | 0.28 | 0.68 | 2.25 |
| LM4 | 1 | 0.003 | 0.03 | - |
| LM6 | 17.07 | 0.28 | 0.62 | 1.66 |
| LM8 | - | - | - | - |

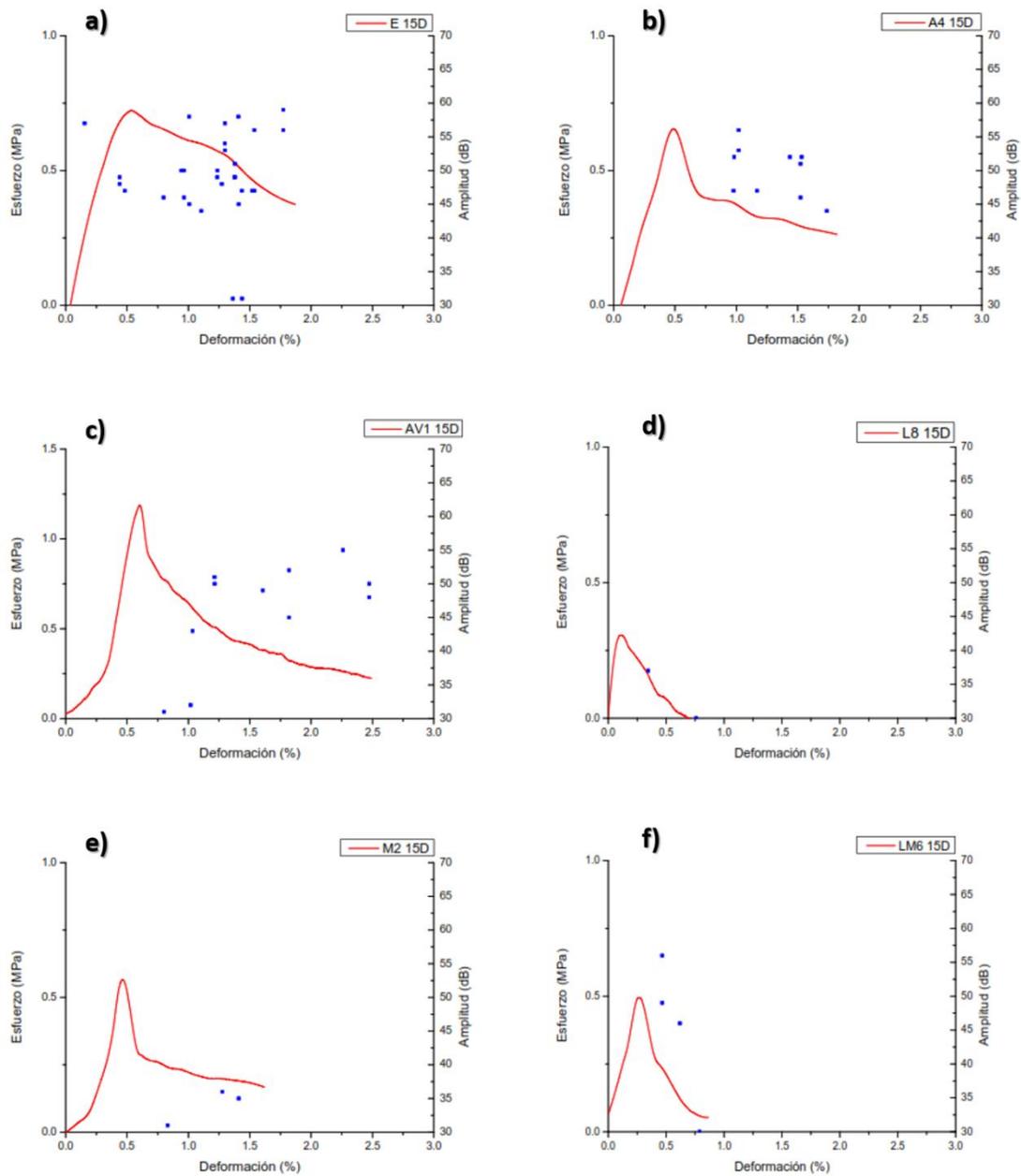


Figura 3.23.- Gráficas representativas sometidas bajo intemperismo a 15 días a) Muestra estándar serie E, b) Muestra serie A aditivo Impertop A, c) Muestra serie AV1 aditivo Impertop/Vinnapas, d) Muestra serie L aditivo chapopote en aceite de linaza, e) Muestra serie M aditivo chapopote disuelto en aceite maíz, f) Muestra serie LM aditivos chapopote disuelto en aceite de maíz y linaza.

3.3.2.- Muestras de adobe sometidas a intemperismo a 30 días

La conclusión de los ensayos de flexión fue con las muestras sometidas en condiciones de intemperismo acelerado a 30 días. La Tabla 3.10 expone los resultados de las propiedades obtenidas en este ensayo. Algunas de las muestras sometidas a intemperismo sufrieron agrietamientos y daño significativos dejándolas inservibles para ser ensayadas en las pruebas de flexión; entre estas muestras, la serie E sin aditivo, resultó con un desgaste superficial e interno que fue imposible disponer de éstas para las pruebas.

De acuerdo con los datos obtenidos de la Tabla 3.10 las muestras de la serie E (estándar) no contienen datos debido al agrietamiento prematuro que provocó la pérdida total de la consolidación del material; por su parte, la serie A expresa una disminución en sus propiedades en comparación a las muestras ensayadas a los 15 días, pero son similares a los materiales ensayados sin intemperismo. Las muestras de la serie AV permanecieron exhibiendo buenas propiedades sin que se viera afectado su desempeño mecánico con valores similares a las pruebas anteriores de 15 días y sin intemperismo. Para ambos casos, es un indicativo de que el efecto es favorable cuando se emplean aditivos sintéticos.

Para los materiales con aditivos naturales se observaron una disminución importante en el módulo elástico (resistencia a la deformación elástica). Incluso se observó una dificultad para llevar los materiales a proceso de fractura a flexión. Varias muestras presentaron fracturas previas y una meteorización significativa en sus superficies que generó daño precedente en las muestras.

Los eventos acústicos producidos por el ensayo de flexión se presentan en las gráficas de la Figura 3.24. Las curvas A, B y E (muestras A4, AV1 y LM6 respectivamente) ostentan mayor número de eventos durante los ensayos de flexión, con ello relacionado a la presentación de minucias microfracturas a diferencia de las gráficas C y D (muestras L8 y M2) que ostentan de 4 a 5 eventos relacionado con sus aditamentos los cuales tienden a la absorción de ondas mecánicas evitando la aparición de estas con sus amplitudes. En común, debido al efecto del intemperismo por 30 días, la amplitud de las señales registradas en materiales con aditivo natural disminuyó a un promedio de 35-40 dB.

Tabla 3.10.- Ensayos de flexión condiciones de intemperismo acelerado a 30 días.

| Muestras | Propiedades Mecánicas | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| | Carga Máxima | Deformación Máxima | Esfuerzo Máximo | Módulo Elástico |
| | N | % | MPa | MPa |
| E | - | - | - | - |
| Muestras serie A | | | | |
| A1 | 21.62 | 0.27 | 0.78 | 3.00 |
| A2 | 29.01 | 0.43 | 1.05 | 2.05 |
| A4 | 14.98 | 0.11 | 0.54 | 4.26 |
| A6 | 20.93 | 0.36 | 0.76 | 1.33 |
| A8 | 30.5 | 0.87 | 1.11 | 1.34 |
| Muestras serie AV | | | | |
| AV1 | 30.14 | 0.27 | 1.09 | 3.79 |
| AV2 | 28.37 | 0.32 | 1.03 | 2.79 |
| AV4 | 33.95 | 0.76 | 1.23 | 1.72 |
| AV6 | 29.70 | 0.59 | 1.08 | 1.97 |
| AV8 | 29.82 | 0.57 | 1.08 | 1.57 |
| Muestras serie L | | | | |
| L1 | 13.98 | 0.71 | 0.50 | 0.57 |
| L2 | 16.89 | 0.68 | 0.61 | 0.78 |
| L4 | 15.73 | 0.51 | 0.57 | 0.83 |
| L6 | 9.82 | 0.18 | 0.35 | 1.53 |
| L8 | 9.39 | 0.17 | 0.34 | 1.83 |
| Muestras serie M | | | | |
| M1 | 13.29 | 0.35 | 0.48 | 1.42 |
| M2 | 17.70 | 0.20 | 0.64 | 3.02 |
| M4 | 5.53 | 0.44 | 0.20 | 0.23 |
| M6 | - | - | - | - |
| M8 | 6.98 | 1.07 | 0.25 | 0.36 |
| Muestras serie LM | | | | |
| LM1 | - | - | - | - |
| LM2 | - | - | - | - |
| LM4 | - | - | - | - |
| LM6 | 20.39 | 0.36 | 0.76 | 0.97 |
| LM8 | 11.18 | 0.45 | 0.40 | 0.88 |

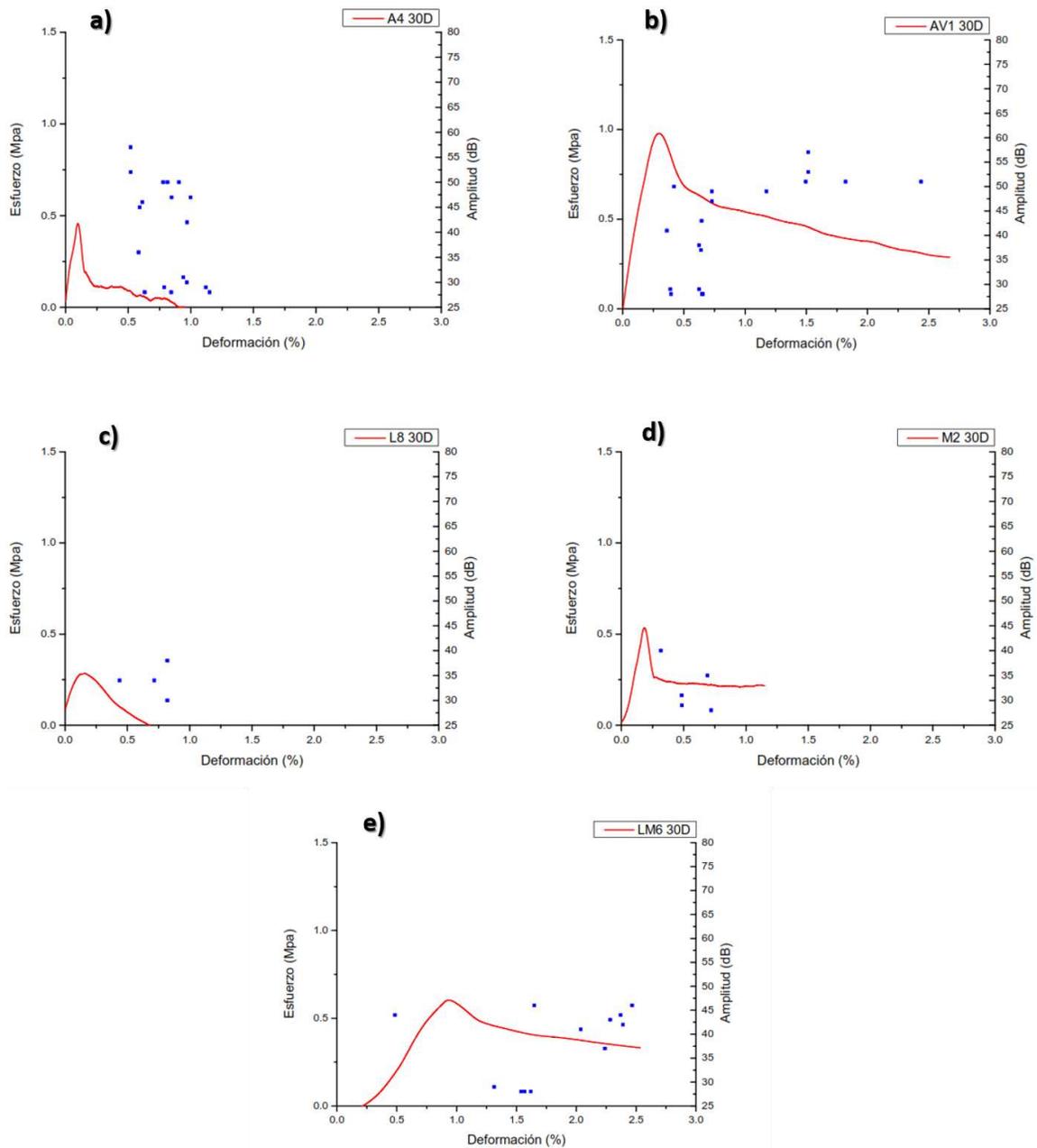


Figura 3.24.- Gráficas representativas sometidas bajo intemperismo a 30 días a) Muestra serie A aditivo Impertop, b) Muestra serie AV aditivo Impertop/Vinnapas c) Muestra serie L aditivo chapopote en aceite de linaza, d) Muestra serie M aditivo chapopote disuelto en aceite maíz, e) Muestra serie LM aditivos chapopote disuelto en aceite de maíz y linaza.

3.4.- Pruebas a impacto Izod

Las pruebas se llevaron a cabo empleando un equipo de péndulo de impacto para evaluar la capacidad de adsorción de energía y la resistencia al impacto del adobe, considerado un material compuesto, bajo un parámetro ya establecido con anticipación. Cuando se somete un material a un golpe súbito e intenso, en el cuál la velocidad de aplicación del esfuerzo es extremadamente grande, el material puede tener un comportamiento más frágil comparado con el que se observa en el ensayo de tensión (absorción de energía más lento).

Cada muestra de adobe se colocó en la base del plato inferior de la maquina universal con el subsecuente ajuste del plato superior evitando someter el material y evitar que se mueva o se desprenda. El objetivo es determinar la tenacidad de los materiales ensayados, para este caso, los adobes experimentales con adhesivos a diferentes formulaciones. La tenacidad se define como la propiedad que tiene un material de absorber energía hasta el punto de ruptura, cuando es sometido a esfuerzos de choque o golpes. Cada serie de muestras se compara con el ladrillo experimental estándar “E” sin aditivos con el objeto de estimar las diferencias en el comportamiento al impacto.

Adobes con emulsión asfáltica comercial (variedad A)

En la Figura 3.25. se presentan los resultados del comportamiento mecánico a Impacto de las muestras de adobes experimentales tipo “A” (Emulsión asfáltica comercial “Impertop”). En comparación con el adobe “cero” o “blanco” (sin aditivo) el adherente comercial no afecta significativamente las propiedades del material a formulaciones menores del 6%. Sin embargo, con el 8% el efecto de mayor absorción de energía es evidente al mejorar cerca del 30% con respecto a las formulaciones anteriores. Así mismo la resistencia se observa con un incremento similar generada por un carácter más tenaz de la muestra A8. En esta formulación, el aditivo Impertop le confiere un efecto de plasticidad (mayor capacidad de absorber energía).

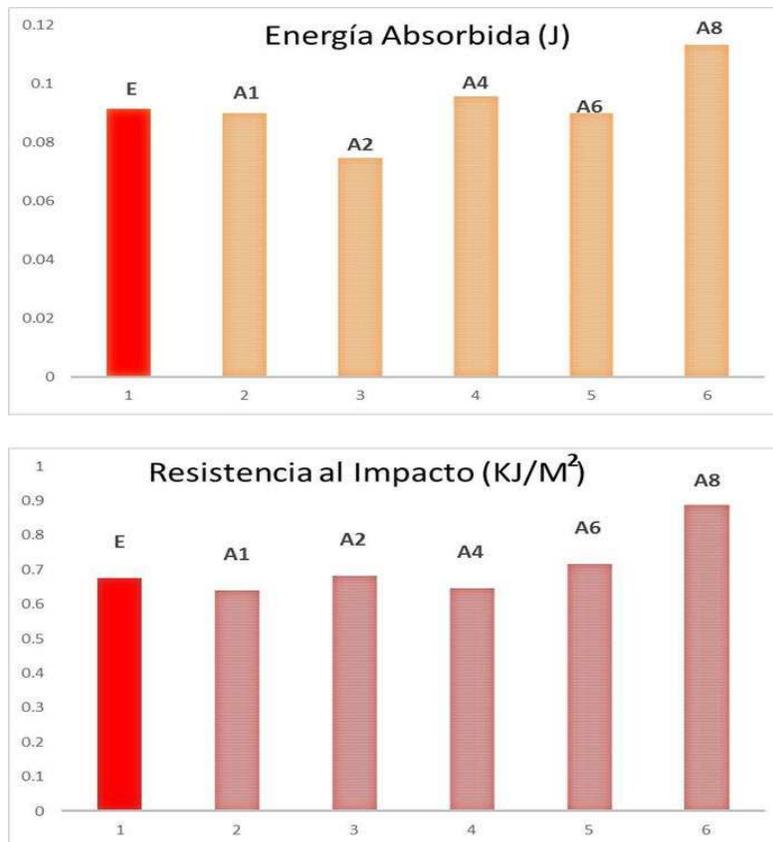


Figura 3.25.- Energía absorbida y resistencia para muestras serie “A”.

Adobes con emulsión asfáltica comercial más polímero vinílico (Variedad AV)

Al agregar a la formulación de emulsión asfáltica un valor de concentración constante de 0,75% en peso de un polímero vinílico VINNAPAS® 5044, el cual es un polímero a base de EVA (Ethylene-Vinyl-Acetate) dispensable en agua, es evidente un ligero aumento en su capacidad de energía absorbida y resistencia al impacto en comparación con los adobes de la variedad “A” (solo emulsión asfáltica).

Sin embargo, en la serie “AV” se observa este mejoramiento solamente hasta la formulación “AV6” (Figura 3.26.). La tendencia de la formulación “AV8” es la disminución de su tenacidad al exhibir valores de energía e impacto menores al resto de sus formulaciones. Probablemente el polímero vinílico no interactúa favorablemente cuando la concentración de la emulsión asfáltica es mayor del 6%.

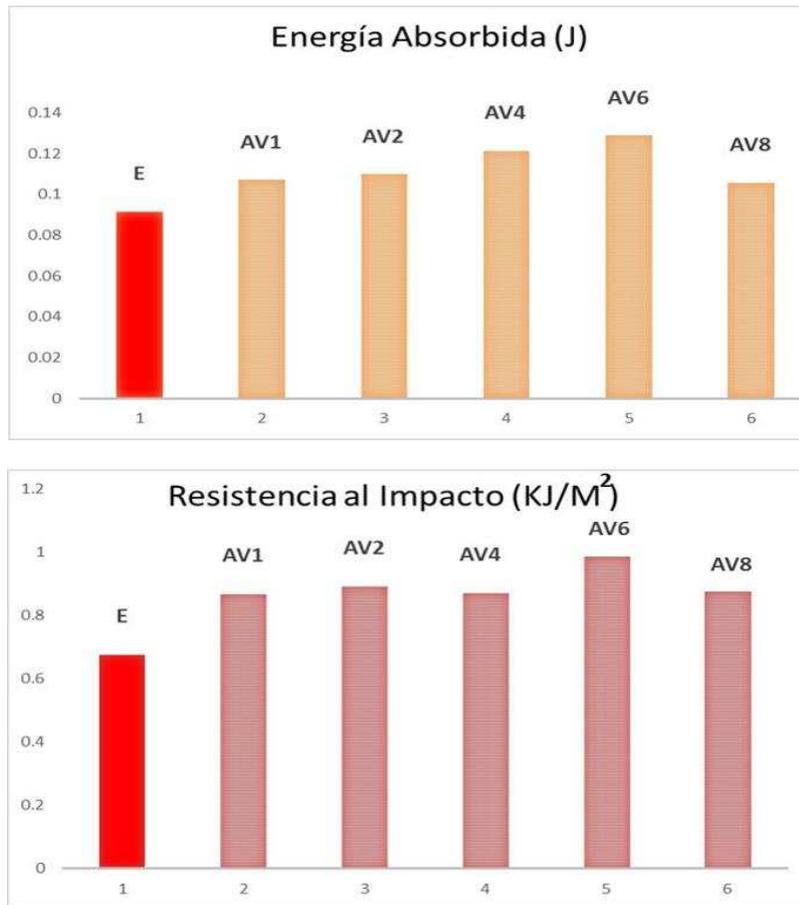


Figura 3.26.- Energía absorbida y resistencia para muestras “AV”.

Adobes con Asfalto crudo (chapopote) diluido en aceite de linaza. (Variedad L)

Los adobes con formulaciones de agregados naturales presentaron valores uniformes de energía y resistencia (Figura 3.27.). La contribución a la tenacidad de estos aditivos es mínima y parece acentuarse a las formulaciones de 8% (L8). De la misma manera, no exhibe valores de un mejoramiento significativo en sus capacidades de absorción e energía y resistencia al impacto en comparación con las variedades “A” y “AV”.

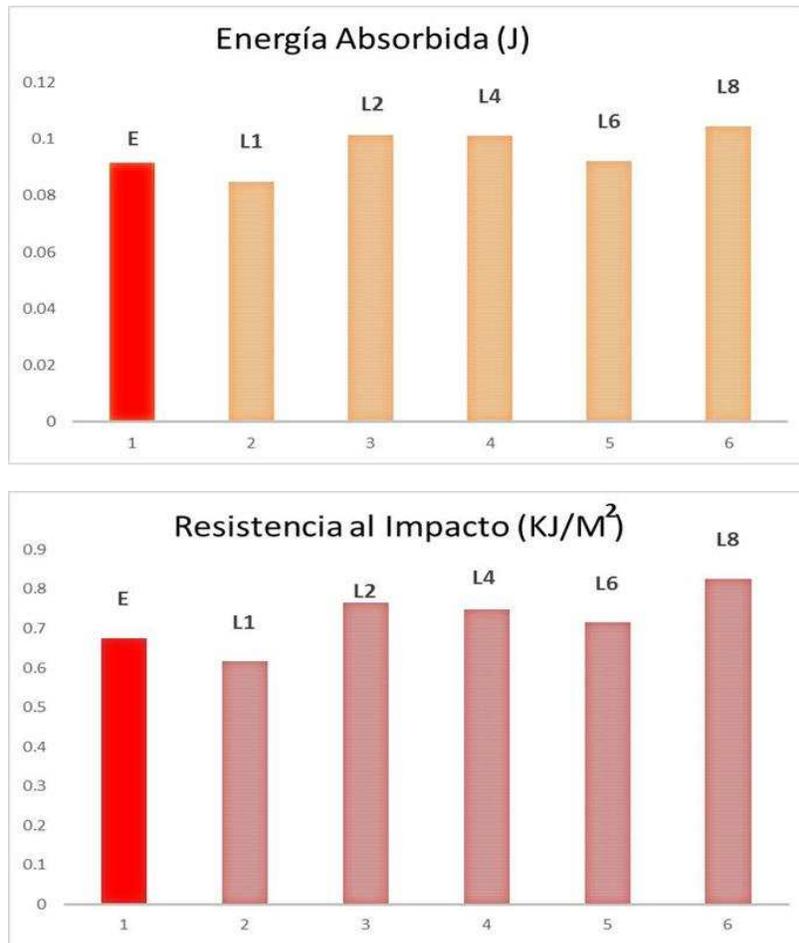


Figura 3.27.- Energía absorbida y resistencia para muestras “L”.

Adobes con Asfalto crudo (chapopote) diluido en aceite de maíz. (Variedad M)

Los materiales con formulaciones de chapopote diluido en aceite de maíz (Variedad “M”) no presentaron un efecto significativo con los agregados naturales (Figura 3.28). Solamente en lo valores intermedios se conservaron parámetros mecánicos similares al adobe crudo sin aditivos. Sus valores de absorción y resistencia se observaron con una tendencia menor a la de linaza variedad “L”.

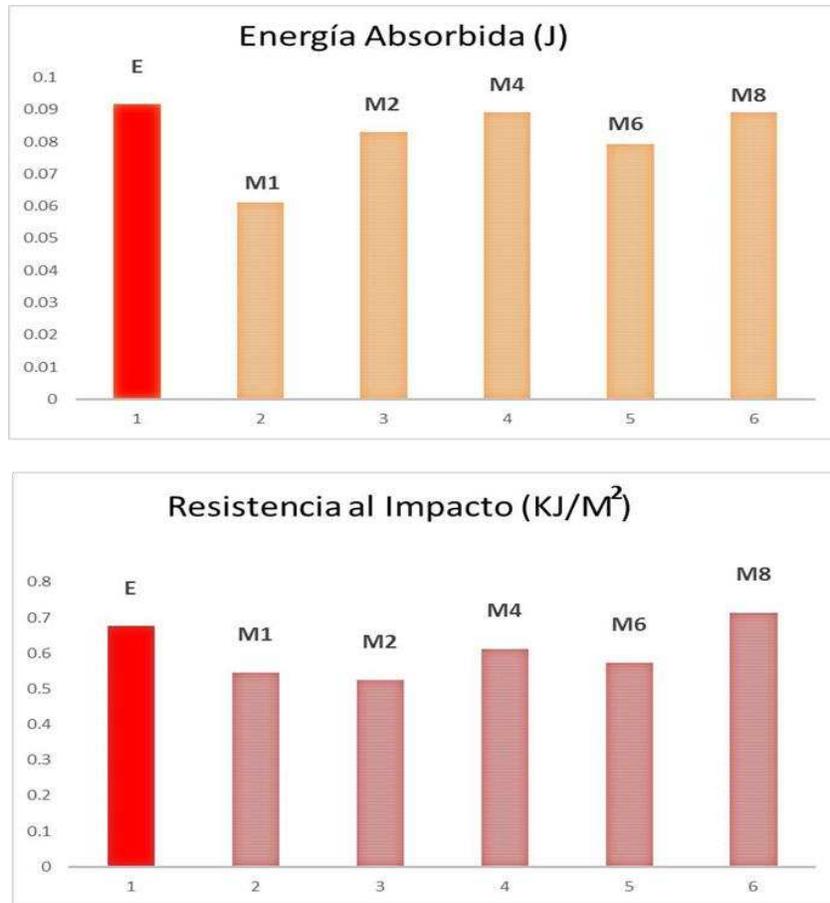


Figura 3.28.- Energía absorbida y resistencia para muestras “M”.

Adobes con Asfalto crudo (chapopote) diluido en 1: 1 linaza y aceite de maíz. (Variedad LM)

En los adobes con aditivos naturales combinados de linaza y maíz se observa el efecto de disminución de los parámetros de impacto. Este efecto en la caída de los valores de energía absorbida y resistencia, lo cual conlleva a un ligero aumento en su fragilidad, es aparentemente un efecto de los aceites naturales tal como se observó para la serie “M” (Figura 3.29). De la misma manera, entre estas muestras se observaron valores mayores en las formulaciones intermedias. Esto es un indicativo que establece la reducción de la tenacidad o capacidad de absorber energía del adobe.

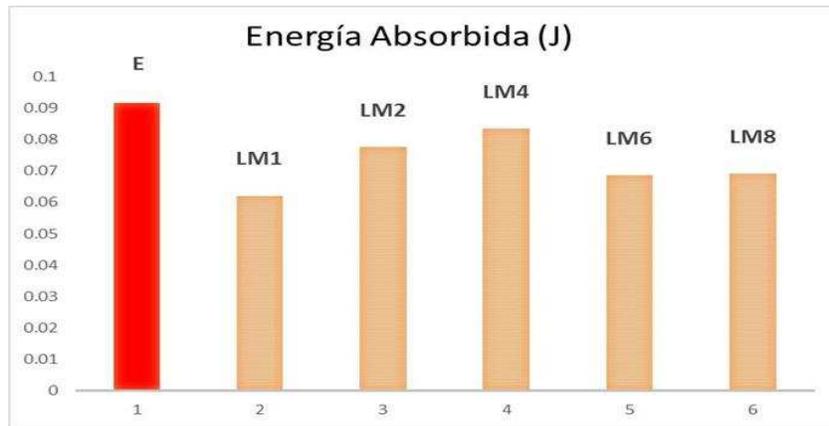


Figura 3.29.- Energía absorbida y resistencia para muestras “LM”.

CAPITULO 4

CONCLUSIONES

El suelo adecuado para construcciones de tierra es fundamentalmente encontrado en áreas de ríos y montañas donde eso es posible encontrar arena, limo, y arcilla juntos; principalmente en áreas de cerros y volcanes, donde es posible localizar arenas erosionadas y arcillas aluviales como es el caso de la zona de La Joya. Análisis de la composición elemental del suelo de La Joya establece el tipo de arcilla y los componentes mineralógico identificados poseen propiedades inherentes adecuadas para construcción de viviendas basadas en tierra como es el caso de los adobes.

En este trabajo de investigación se fabricaron ladrillos de barro experimentales utilizando la evidencia arqueológica de su técnica de procesamiento empírico, agregando derivados del petróleo (tanto sintéticos como naturales) como aditivos en diferentes formulaciones a una matriz de fracción predominantemente fina, para evaluar su efecto sobre su comportamiento mecánico bajo esfuerzos de compresión, flexión e impacto. Es de destacar que todos los ladrillos de barro experimentales fabricados con aditivos tanto sintéticos como naturales, exhibieron propiedades mecánicas mejoradas en comparación con la muestra de control no tratada "E".

Los materiales con sus diversas formulaciones exhibieron un importante efecto en el control de propiedades mecánico: los aditivos comerciales proporcionan mejor adherencia que los naturales, afectando incluso los modos de falla. Hay algunas marcadas diferencias en cada formulación de adobe en comparación con el ladrillo sin aditivos "E", que son causados por las diferentes propiedades de los agregados componentes que actúan como un ligante cohesivo, estableciendo comportamientos mecánicos relacionados con su capacidad para sostener los componentes del sistema térreo unidos.

El análisis de señales de emisión acústica aplicado a los ladrillos de barro indicó que los eventos mecánicos de falla (fricción de la interfaz, compresión de poros y vacíos, comienzo y crecimiento de grietas, fractura final, etc.) están relacionados con el efecto cohesivo de los agregados. Los eventos mecánicos identificados con la señal acústica corresponden a microfisuras (señales de baja amplitud, cortas duración), propagación de microfisuras (señales de media amplitud), daño significativo como la fractura de la matriz (señales de larga duración y alta amplitud). A pesar de la complejidad de la aplicación del monitoreo de EA en estructura de mampostería, ya que los fenómenos acústicos dependen de la heterogeneidad del material, la técnica ha demostrado ser una herramienta importante para identificar secuencia de los daños en materiales. En adobes, la presencia de huecos, grietas, cavidades y otras discontinuidades también influyen en la generación y detección de EA. En la práctica, algunas estructuras con diseño de tolerancia al daño, pueden generar múltiples daños simultáneamente, por lo que puede liberar más de una fuente EA al mismo tiempo.

En cuanto a la naturaleza de los minerales del grupo de las arcillas, predominan las halloysitas, pero en la mayoría de las muestras, también hay evidencia de pequeñas cantidades de esmectitas. En este punto, no está claro si las propiedades fisicoquímicas del material de construcción de tierra podrían estar relacionadas al grado de hidratación de la haloisita (10 Å de haloisita o 7 Å haloisita) o a la mezcla de este mineral con esmectita. Sin embargo, es bien conocido que la estructura lamelar de varios minerales arcillosos de los grupos illita y caolinita proporciona una ventaja a las propiedades de la construcción de materiales de tierra. Por otro lado, el cuarzo, feldspatos y material amorfo están presentes en todas las muestras. Es muy probable que, en todas las muestras experimentales estudiadas, el origen del material es básicamente volcánico con diferentes grados de alteración dependiendo de las condiciones ambientales.

Las propiedades de absorción en los adobes experimentales demostraron la importancia del agregado consolidante, en donde se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo en la formulación éstas se van haciendo más impermeables, limitando la penetración del agua en las muestras.

Comparado con el resto de las formulaciones, la muestra control “E” sin aditivos, presentó el mayor ascenso capilar presentando ligero daño en su estructura como desprendimiento de partículas de tierra. Según A. Daneels, es posible considerar que el propósito principal de los antiguos constructores haya sido la mejora de la resistencia a la humedad debido a las características ambientales de la región, por otro lado, los requerimientos de las propiedades mecánicas eran relativamente bajos, ya que su aplicación contractiva constituía edificaciones con un solo piso, y para ello, estas propiedades son adecuadas.

El éxito de la arquitectura de tierra precolombina, como es el caso de La Joya, es posible que resida tanto en el tipo de arcilla y el aditivo de betún, formador de un material de construcción eficiente utilizado durante siglos, aunque la mezcla sería considerada inadecuada de acuerdo con los modernos manuales debido a la alta proporción de fracción fina. Por lo tanto, replicar técnicas empíricas precolombinas a través del uso de aditivos modernos, ayudará a comprender completamente el comportamiento estructural de las antiguas tradiciones de arquitectura de tierra y conducirá a la adopción de prácticas efectivas de conservación y restauración.

Finalmente, es necesario tomar en cuenta que, para obtener un conocimiento teórico-práctico avanzado sobre las propiedades del adobe, es fundamental evaluar varias muestras de diferentes culturas regiones, periodos, y geosistemas.

REFERENCIAS

- [1] G. Liberotti, A. Daneels. Adobes en arquitectura monumental: análisis químico-físicos, arqueología y reconstrucción 3D para determinar las técnicas constructivas en los sitios de La Joya (México) y Arslantepe (Turquía), *Boletín la Soc. Geológica Mex.*, vol. 64, no. 1, 79–89, 2012.
- [2] G. Liberotti, A. Daneels. Conocer las prácticas constructivas antiguas para preservar sitios de tierra. La importancia del análisis de los datos arqueológicos, *Revista Horizontes.*, vol. 5, 10–15, 2013.
- [3] Y. Kita, A. Daneels. Pre-Columbian earthen construction technology and its application to conservation, *SAHC2014–9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, F. Peña, and M. Chávez (eds.), Mexico City, Mexico, 14–17, October 2014.
- [4] A. Daneels, A. Romo de Vivar, L. Chávez, M. Reyes, E. Tapia, M. León, E. Cienfuegos, F.J. Otero. Bitumen-stabilized earthen architecture: The case of the archaeological site of la joya, on the Mexican gulf coast, *J. Archaeol. Sci.: Reports* 34A:1–16. 2016.
- [5] M. Dormohamadia, R. Rahimnia. Combined effect of compaction and clay content on the mechanical properties of adobe brick, *Case Stud. Constr. Mater.*, 13, 1-15, e00402. 2020.
- [6] E. Quagliarini, S. Lenci. The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks, *J Cult Herit*, 11:(3), 309–14. 2010.
- [7] M. Uguryola, F. Kulakoglu. A preliminary study for the characterization of Kültepe’s adobe soils with the purpose of providing data for conservation and archaeology, *J Cult Herit*, 14S (3):e117–e124. 2013.
- [8] M. Mateu, H. Fernández, A. Daneels, H. Cabadas, Salvador Piña. Earthen architecture in the Mesoamerican classic period: A micromorphological approach to its manufacture process, *J. Archaeol. Sci.*, Vol. 137, 2022, 105525.
- [9] B. Berge, *The ecology of building materials*, Second Edition, Burlington, Ma, USA: Elsevier, Ltd., 2000.

- [10] P. Doat, A. Hays, H. Houben, S. Matuk, F. Vitoux. *Building with Earth*, translated by A. Puri, *The office of the Counsellor of cultural, Scientific and Technical cooperation*, Embassy of France, New Delhi, India., New Delhi, India. 1991.
- [11] H. Schroeder. *Sustainable, Building with Earth*. Springer, Germany, 2020.
- [12] G. Minke, *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser – Publishers for Architecture, Basel · Berlin · Boston. 2012.
- [13] A. Cárdenas, W.M. Argüelles, F. Goycoolea. On the possible role of opuntia ficusindica mucilage in lime mortar performance in the protection of historical buildings, *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.* 3, 64–71, 1998.
- [14] S. Chandra, L. Eklund, R.R. Villarreal. Use of cactus in mortars and concrete, *Cem. Concr. Res.*, 28:(1), 41–51, 1998.
- [15] A. Schicker, S. Gier. Optimizing the mechanical strength of adobe bricks. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 57, No. 4, 494–501, 2009.
- [16] A. Vissac, A. Bourgès, D. Gandreau, R. Anger, L. Fontaine. *Argiles et biopolymères: Les stabilisants naturels pour la construction en terre*, CRAterre éditions. Villefontaine, France: HAL Open Science, 2017.
- [17] G.O. Akintola, F. Amponsah-Dacosta, S.E. Mhlongo. Geotechnical evaluation of clayey materials for quality burnt bricks, *Heliyon*, 6, e05626, 2020.
- [18] A.L. Murmu, A. Patel. Towards sustainable bricks production: An overview, *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, 112–125, 2018.
- [19] J. Fernández. Análisis de las ventajas y desventajas de las técnicas no convencionales en la construcción de edificaciones frente a un evento sísmico. Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, *Revista INGENIO*, N.º 1:(1), 53-71, 2018.
- [20] G. Calatan, A. Hegyi, C. Dico, C. Mircea. Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks, *Proc. Technol.*, vol. 22, 259–265, 2016.
- [21] J. Cid, F.R. Mazarrón, I. Cañas. Las normativas de construcción con tierra en el mundo, *Inf. la Constr.*, vol. 63:(523), 159–169, 2011.
- [22] D. Silveira, H. Varum, A. Costa, T. Martins, H. Pereira, J. Almeida. Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions, *Constr. Build. Mater.*, vol. 28:(1), 36–44, 2012.

- [23] D. Muheise-Araalia, S. Pavia. Properties of unfired, illitic-clay bricks for sustainable construction. *Constr. Build. Mater.*, vol. 268, 1-13, 2021.
- [24] Y. Millogo, J.C. Morel. Microstructural characterization and mechanical properties of cement stabilised adobes, *Mater. Struct.*, 45, 1311–1318, 2012.
- [25] C. Costa, Â. Cerqueira, F. Rocha, A. Velosa. The sustainability of adobe construction: past to future. *Int. J. Archit. Heritage, Analysis, and Restoration*. 1-15, e00402. 2020.
- [26] M.M. Bouhicha, F. Aouissi, S. Kenai. Performance of composite soil reinforced with barley straw, *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, 617-621, 2005.
- [27] M.S. Yetgin, O. Cavdar, A. Cavdar. The effect of fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Constr. Build. Mater*, vol. 22, 222-227, 2008.
- [28] Y. Millogo, J.E. Aubert, A.D. Sere, A. Fabbri, J.C. Morel. Earth blocks stabilized by cow-dung. *Mater. Struct.*, 49, 4583–4594, 2016.
- [29] R. Illampas, I. Ioannou, D.C. Charnpis. Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress-strain equation, *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, 83–90, 2014.
- [30] C. Neves, O.B. Faria. Programa Interlaboratorial Proterra. Ensaios De Adobe, *TerraBrasil*, vol. 2:(1), 1–10, 2008.
- [31] J.D. Rodríguez-Mariscal, M. Solís, H. Cifuentes. Methodological issues for the mechanical characterization of unfired earth bricks, *Constr. Build. Mater.*, vol. 175, 804–814, 2018.
- [32] P. Vega, A. Juan, M.I. Guerra, J.M. Morán, P.J. Aguado, B. Llamas. Mechanical characterisation of traditional adobes from the north of Spain. *Constr. Build. Mater.*, 25, 3020–3023, 2011.
- [33] F.J. Gómez-Patrocínio, C. Mileto, L. García-Soriano, F.V. López-Manzanares. Material Weathering and Structural Damage in Historic Adobe Constructions in Spain: Preliminary Results of a Quantitative Approach. *Stud Conserv*, Vol. 65:(8), 450–464, 2020.
- [34] C.R. Ríos-Soberanis. Acoustic Emission Technique, an Overview as a Characterization Tool in Materials Science, *J. Appl. Res*, Vol. 9:(3), 367-379, 2011.

- [35] J. Bohse. Acoustic Emission Characteristics of MicroFailure Processes In Polymer Blends And Composites. *Compos Sci Technol*, Vol 60, 1213-1226, 2000.
- [36] F.F. Khorasani, M.Z. Kabir, M.A. Najafabad, K. Ghavami. Predicting compressive stress–strain curves of structural adobe cubes based on Acoustic Emission (AE) hits and Weibull distribution, *Int. J. Struct. Integr.*, Vol. 10:(6), 766-791, 2019.
- [37] J. Peraza-Gongora, C.R. Rios-Soberanis, A.J.E. Daneels Verriest, J. Rodriguez-Laviada. Geomechanical Characterization of Experimental Mud Bricks from La Joya Archaeological Site: Effect of the Addition of Additives on Their Mechanical Properties, *Int. J. Archit. Herit.*, 1-17, 2022.
- [38] A. Daneels, L.F. Guerrero-Baca. Millenary earthen architecture in the tropical lowlands of Mexico. *APT Bulletin: The Journal of Preserv. Tech.*, 42:(1), 11–18, 2011.
- [39] T.M. Adyel, S.M. Nazrul Islam, S.H. Rahman, H.M. Sayem, M. Khan, M.A. Gafur. Characterization of Brick Making Soil: Geoenineering, Elemental and Thermal Aspects. *Jahangirnagar Univ. J. Sci.*, Vol. 35:(1), 109-118, 2012.
- [40] A.E. Haddar, E. Gharibi, A. Azdimousa, N. Fagel, I.E.E.A. El Hassani, M.E. Ouahabi. Characterization of halloysite (North East Rif, Morocco): Evaluation of its suitability for the ceramics industry. *Clay Minerals*, 53:(1), 65–78. 2018.
- [41] K. Emmerich. Chapter 2.13- full characterization of smectites, handbook of clay science - developments in clay science, Vol. 5, 381–404. Edited by F. Bergaya, and G. Lagaly. Oxford, UK: Elsevier. 2013.
- [42] J.E. Gama-Castro, T. Cruz y Cruz, T.P. Puig, R. Alcalá-Martínez, H. Cabadas-Báez, C. Jasso-Castañeda, J. Díaz-Ortega, S. Sánchez-Pérez, F. López-Aguilar, R. Vilanova de Allende. Arquitectura de tierra: El adobe como material de construcción en la época prehispánica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64:(2), 177–88, 2012.
- [43] SAZ. 2001. Standards association Zimbabwe standard (SAZS) 724:2001: Standard code of practice for rammed earth structures. Harare: Standards Association of Zimbabwe. <http://www.rammedearthconsulting.com/library/african-rammed-earth-harmonised-standard-en.pdf>

- [44] Office of International Affairs (Wolfskill, L. S. W. A. Dunlop, and B. M. Callaway) 1970. Handbook for building homes of earth. Department of housing and urban development Office of International Affairs (OIA): Washington, DC 20410 <https://pdhonline.com/courses//c777//PeaceCorpsHandbookForBuildingEarthHomes.pdf>
- [45] B.A. Schumacher, Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments ecological risk assessment, support center, USA. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 2002; 23. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=63371
- [46] C. Jiménez-Pose. Ensayo de absorción del btc y su influencia en el tipo de juntas. En Construcción con Tierra Investigación y Documentación XI CIATTI 2014, Congresos de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos. Editores Félix Jové Sandoval, José Luis Sáinz Guerra. pp. 297-303. Publicación online, Impreso en España, Julio de 2015
- [47] R. Arroyo-Matus, S. Sánchez-Tizapa, P. Catalán-Quiroz. Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México. *Ingeniería* 17:(3), 167–77, 2013.
- [48] H. Varum, A. Costa, J. Fonseca, A. Furtado. Behaviour characterization and rehabilitation of adobe construction. *Procedia Eng.* Vol. 114, 714–21, 2015.
- [49] B. Saroza, M.A. Rodríguez, J.M. Menéndez, and I.J. Barroso. Study of the resistance to simple compression from adobe produced with various soils from Crescencio Valdés, Villa Clara, Cuba. *Informes de la Construcción*, 60:(511), 41–47. 2008.
- [50] E. Adorni, E. Coisson, D. Ferretti. In situ characterization of archaeological adobe bricks. *Constr Build Mater*, 40, 1–9, 2012.
- [51] M. Ouedraogo, K. Dao, Y. Millogo, A. M. Jean-Emmanuel Aubert, M. Gomina, M. Gomina, M. Gomina. Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw. *J. Build. Eng.*, 23, 250–58. 2019.
- [52] C.H. Kouakou, J.C. Morel. Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Appl. Clay Sci.*, 44 (1–2), 27–34. 2009.

- [53] G. Livitsanos, N. Shetty, E. Verstryngne, M. Wevers, D. Van Hemelrijck, D.G. Aggelis. Acoustic emission health monitoring of historical masonry to evaluate structural integrity under Incremental cyclic loading. *Proceedings*, 2:(508), 1–7. 2018.
- [54] P.A. Jaquin. Influence of Arabic and Chinese rammed earth techniques in the Himalayan region. *Sustainability*, 4:(10), 2650–2660. 2012.
- [55] J. Xu, Q. Han, G. Lacidogna, A. Carpinteri. Accuracy of acoustic emission localization for masonry structures monitoring. 13th International Conference on Fracture June 16–21, 2013, Beijing, China.
- [56] G.I.E. Ekosse, P.S. Fouche, B. Mashatola. Total organic carbon in soils and its relation with manganese concentrations in soils and vegetation close to an abandoned manganese mine. *Int J Environ Sci Technol*, Vol. 3:(1), 15-24, 2006.
- [57] N. Ural. The Importance of Clay in Geotechnical Engineering. Current Topics, In the Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications, edited by Mansoor Zoveidavianpoor, London, United Kingdom, IntechOpen, 2018.
- [58] F.M. Fernandes, P.B. Lourenço, F. Castro. Chapter 3.- Ancient Clay Bricks: Manufacture and Properties. In: Dan, M.B., Prikryl, R., Török, Á. (eds) *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. Springer, Dordrecht. (2010). https://doi.org/10.1007/978-90-481-2684-2_3
- [59] P. Girón García, Resultados del análisis químico cuantitativo de elementos mayores y traza por Fluorescencia de rayos X de 9 muestras estructurales del sitio de La Joya, Mun. De Medellín, Veracruz, que corresponden al Proyecto PAPIIT 400816 Reconstrucción de una tecnología prehispánica de arquitectura de tierra (2016-2018). Informe Técnico. Laboratorio de Difracción de Rayos X, Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología, UNAM, México, 2017.
- [60] T. Pi Puig. Análisis de difracción de rayos X, y TIC_TOC (carbón inorgánico-carbón orgánico) realizados en las 2 muestras (Me 29 y Me 55) arqueológicas de La Joya, Informe Técnico. Laboratorio de Difracción de Rayos X, Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología, UNAM, México, 2017.