

ELABORACIÓN DE ADOBE SOSTENIBLE

ELABORATION OF SUSTAINABLE ADOBE



José Francisco Brito del Pino

Investigador independiente

Ecuador

Doctor en Ciencias y Tecnologías Físicas Químicas y de Materiales, título obtenido en la Università della Calabria (Italia). Ex docente universitario de la UNACH, ESPOCH y Università della Calabria. Su línea de investigación está en relación con los materiales semiconductores y materiales orgánicos.

jfranbripi79@hotmail.com

orcid.org/0000-0001-8750-5797

Nathalie Madeleine Santamaría Herrera

Universidad Nacional de Chimborazo

Ecuador

Licenciatura de Artes en Arquitectura y Master de Arquitectura en la Universidad Tecnológica Sídney (UTS), Australia. Ha realizado estudios en Ecuador, Australia y Tailandia. Su línea de investigación es en vivienda sustentable y bioconstrucción. Ex directora de la Carrera de Arquitectura UNACH y actual docente de diseño arquitectónico.

nsantamaria@unach.edu.ec

orcid.org/0000-0002-7854-3836

Carlos Andrés Macas Peñaranda

Universidad Nacional de Chimborazo

Ecuador

Arquitecto por la Universidad Técnica Particular de Loja. Máster en Proyectos Arquitectónicos Avanzados por la Universidad Politécnica de Madrid – Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Especialidad en diseño arquitectónico, basado en el método investigativo y el enfoque crítico de la arquitectura para el desarrollo integral de proyectos en la ciudad a través de una perspectiva coherente con los momentos históricos y contemporáneos. Mención de honor en la Universidad Técnica Particular de Loja por el proyecto realizado en último año. Medalla de oro categoría fin de carrera diseño arquitectónico en la Bienal Panamericana de arquitectura de Quito 2016. Primer lugar en tema III arquitectura y urbanismo con soluciones en asentamientos urbanos marginales en el Concurso Internacional Universitario de anteproyectos CIU HÁBITAT Guayaquil 2016. Tercer lugar concurso Reactivando Hitos, Edición Plaza de toros 2021.

carlos.macas@unach.edu.ec

orcid.org/0000-0002-7347-7657

Dany Tasán Cruz

Investigador independiente

Ecuador

Arquitecto Técnico, Máster en técnicas y sistemas de edificación, Máster en innovación tecnológica en edificación por la Universidad Politécnica de Madrid.

danytasan@gmail.com

orcid.org/0000-0001-5778-4633

Fecha de recepción: 02 de septiembre, 2021. Aceptación: 19 de octubre, 2021.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo realizar la revisión del estado del arte del adobe como material de construcción sostenible y vernáculo. En este sentido la hipótesis se refiere al planteamiento de una nueva metodología de elaboración del adobe sostenible donde confluyan las técnicas manuales con las pruebas de laboratorio. Para ello, se realizó un análisis bibliográfico referente al estado del arte de la elaboración adobe en parte de la zona urbano - rural de la ciudad de Riobamba, y su impacto ambiental; además, se describen algunos materiales para estabilización del adobe en la parte introductoria. La segunda parte se refiere, a la propuesta de esta investigación que consiste en el planteamiento de una metodología para elaboración del adobe, partiendo de la adecuada identificación y recolección de las muestras de suelo, y seguidamente realizar las distintas pruebas manuales de campo que permitirán conocer empíricamente la calidad del suelo, mientras que las pruebas de laboratorio físicas, químicas y mineralógicas permitirán científicamente seleccionar el tipo de suelo. Finalmente se exponen los resultados de simular el bloque de tierra y su comportamiento térmico, luego se comparan los resultados simulados y experimentales. Luego de la selección del tipo de suelo, se estableció la Norma peruana E.080 (2017) para la elaboración del bloque de adobe, haciendo énfasis en los beneficios de la estabilización del adobe con fibras naturales. La investigación bibliográfica realizada se espera sirva como modelo metodológico para futuras investigaciones para elaboración del adobe sostenible, considerando que los sistemas constructivos en tierra son parte del patrimonio y saberes ancestrales de la zona andina que se deben recuperar.

Palabras clave

Adobe, elaboración, fibras naturales, pruebas de laboratorio, pruebas manuales.

Abstract

This research aims to review the state of the art of adobe as a sustainable and vernacular construction material. In this sense, the hypothesis refers to the proposal of a new methodology for the elaboration of sustainable adobe where manual techniques converge with laboratory tests. For this, a bibliographic analysis was carried out regarding the state of the art of adobe production in part of the urban - rural area of Riobamba, and its environmental impact. Furthermore, some materials for adobe stabilization are described in the introductory part. The second part refers to the proposal of this research, which consists of the proposal of a methodology to elaborate adobe, starting from the adequate identification and collection of soil samples, and then carrying out the different manual field tests that will allow to know empirically the quality of the soil. The physical, chemical and mineralogical laboratory tests will lead to a scientific selection of the type of soil. Finally, the results of simulating the earth block and its thermal behavior were shown. After, the simulated and experimental results were compared. After selecting the type of soil, the Peruvian Standard E.080 (2017) was established to elaborate the adobe block, emphasizing on the benefits of stabilizing the adobe with natural fibers. The bibliographic research carried out is expected to serve as a methodological model for future research for the elaboration of sustainable adobe by considering that the construction systems on land are part of the heritage and ancestral knowledge of the Andean area that must be recovered.

Keywords

Adobe, crafting, natural fibers, lab tests, manual tests.

Introducción

El estudio de los sistemas constructivos en tierra como material tradicional, además de ser considerados como un aporte a la arquitectura sostenible, así como el desarrollo de viviendas de barro por su relación directa con la construcción ecológica y de bajo costo, logran altos estándares de calidad en la habitabilidad en viviendas vernáculas (Choez y Mora, 2019). Un estudio de las técnicas constructivas con tierra en el Ecuador, tomando en cuenta la riqueza cultural que esta posee y los beneficios que conlleva tener una vivienda tradicional en tierra, ha buscado mejorar las propiedades físico-mecánicas del adobe, añadiendo fibras naturales y artificiales que podrían ayudar a optimizar su resistencia (Montenegro, 2019).

Las pruebas experimentales de los procedimientos de construcción de las piezas de adobe, probetas, especificaciones de ensayo, análisis de resultados y caracterización de las principales propiedades mecánicas del adobe como son módulo de elasticidad, resistencia a la compresión, cortante y flexión; fueron realizadas debido a la necesidad primordial de una norma, pues actualmente no existe, para realizar los ensayos en este tipo de material (Quiroz et al., 2019). La Norma E.080, Diseño y Construcción con Tierra Reforzada, del año 2017 del Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento del Perú, recomienda el uso de paja o arena gruesa en la fabricación de adobes para mejorar su resistencia y durabilidad; sin embargo, los lineamientos de la resistencia mecánica a flexión se adaptaron a la Norma Técnica Ecuatoriana 2554 (Altamirano, 2019).

A continuación, se expone diversas maneras de estabilización del adobe, el adobe estabilizado con confitillo cumple la resistencia mínima de acuerdo con la norma E.080, la prueba de absorción fue realizada de acuerdo con la norma ASTM-C67 (Lozano y Zurita, 2019). El tereftalato de polietileno ayuda a mejorar las características físicas como mecánicas de los bloques, considerada una opción ecológica que utiliza este material reciclado en la elaboración de bloques bajo la norma técnica NTE INEN 3066, implica un aumento moderado en los costos de producción (Gómez y Guzmán, 2019). El uso de diferentes dosis de fibras de micro-polipropileno en mezclas de adobe, muestran que el rendimiento del daño mecánico de adobe es sensible a la dosificación de fibras de polipropileno, lo que aumenta la resistencia al impacto y reduce el agrietamiento por contracción por secado (Araya-Letelier et al., 2019). Las diferentes tecnologías para elaboración del adobe tales como el adobe tradicional y el adobe compactado, fueron los predecesores antes de la fabricación del superadobe que mejora la resistencia a la compresión (Vermiglio, 2019).

Por otro lado, el adobe ha sido seleccionado como material de interés de esta investigación, ya que permite abaratar costos y no causa grandes pérdidas de energía en su fabricación. Es además un elemento sostenible, reversible, que puede ser reciclado en cualquier momento. Tiene propiedades muy importantes desde el punto de vista térmico (controla las temperaturas extremas), aislantes del sonido y conlleva a una revalorización de las técnicas de construcción ancestrales (Moscoso, 2016). Sin embargo, la producción de adobe artesanal en la provincia de Chimborazo ha sido reemplazada por el ladrillo, habiendo casi desaparecido el conocimiento constructivo ancestral sobre la construcción en tierra; esta deducción ha sido realizada por la escasa bibliografía y estudios respecto del adobe basado en tierra y secado naturalmente. Existen solamente estudios de fabricación de superadobe que incluyen algún aditivo no natural, dicho estudio fue realizado en el Cantón Chambo (Palacios y Donoso, 2018).

Actualmente en la Provincia de Chimborazo no existe un plan de manejo ambiental para la elaboración de ladrillos o tejas, que incluye el manejo de residuos; sin embargo se han hecho estudios para medir las concentraciones de material particulado sedimentable del sector de ladrilleras del Cantón Chambo (Gallo y Paredes, 2019); en siete ladrilleras del Cantón Chambo se superó el límite de CO con altas concentraciones, mientras que en nueve ladrilleras se superaron los límites de concentración de carboxihemoglobina (Lizcano, 2017). A diferencia del bloque adobe que no necesita ser cocido, y genera niveles mínimos de contaminación

(Choez y Mora, 2019). En otros casos la optimización de la fabricación de ladrillos en el Cantón Chambo va acorde a la producción (Chuqui, 2019) y no incluye una producción sostenible (Lizcano, 2019; Febres, 2017). Nuestra propuesta de investigación prevé producir bloques de adobe con bajo impacto ambiental (Choez y Mora, 2019), y bajo las normas técnicas de construcción existentes (Altamirano, 2019).

El proceso de fabricación del adobe será realizado utilizando aditivos naturales (Díaz, 2019; Campos, 2019; Ortiz, 2019) del medio para mejorar su resistencia a la compresión (Araceli y Longa, 2018), alguna otra propiedad física o mecánica, quedando también la posibilidad el uso de materiales reciclables naturales para un posible mejoramiento del mismo.

Metodología

La metodología que se propone en la presente investigación trata sobre los diferentes métodos y técnicas empíricas y/o científicas aplicadas en cada parte del proceso de elaboración del adobe, que han sido recopilados bibliográficamente. Las normas aceptadas por la comunidad científica para la elaboración de bloques de adobe, permitirán elaborar bloques de adobe con la calidad requerida para su uso en las labores de construcción.

Se validarán las pruebas de elaboración manual de bloques de adobe con las pruebas de laboratorio, como parte de la selección del tipo de suelo. En el caso del adobe es importante conocer la cantidad suficiente de arcilla para su fabricación. Estas pruebas nos permitirán conocer las características mecánicas de la tierra y tomar decisiones de la selección de las canteras adecuadas y sus dosificaciones. Las pruebas manuales fueron confrontadas con las pruebas de laboratorio, acorde a las normas técnicas, verificándose la calidad de la tierra para finalmente proceder a la fabricación de las unidades del bloque de adobe.

La metodología aplicada en esta investigación bibliográfica consiste en la elaboración de muestras de adobe reforzado con fibras naturales preferentemente del sector donde se vaya a seleccionar la cantera de tierra, las cuales serán ensayadas manualmente y en el laboratorio previo al procedimiento de selección de tierras según la normativa vigente, con la finalidad de realizar un análisis y una comparación de las propiedades mecánicas de los adobes reforzados mediante fibras naturales.

Identificación y recolección de muestras de suelos

El suelo apropiado para fabricar adobes deberá ser preferentemente de una cantera, el mismo no debe ser de cultivo y debe contener entre 25% a 45% de limo y arcilla, completando el resto de arena; la porción máxima de arcilla estará entre 15% y 17% (Morales et al., 1993).

Entre los principales sistemas de clasificación de suelos, está el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), el American Association of State Highway oficial (AASHTO) y el sistema británico BS. La evaluación del suelo se lo debe realizar mediante los sistemas SUCS y AASHTO. Estas dos metodologías parten de la misma información y son de primordial aplicación en la caracterización de suelos: granulometría y límites de Atterberg (Guerrero y Velasco, 2018).

La Tabla 1 muestra el resumen de las principales características, fortalezas y debilidades de los diversos sistemas de clasificación de suelos de grano fino, el método para medir la calidad del criterio empleado será la aplicación de la ecuación $PI / LL = 0.0077T_{max} + 0.3397 (2)$ donde PL: Límite Plástico, LL: Límite Líquido, T_{max} es la Dureza Máxima; es decir, la tenacidad correspondiente al contenido de humedad en el PL, que emula la prueba PL estándar, pero pudiendo determinar la dureza a partir del trabajo requerido para deformar el material (Moreno et al., 2021).

Tabla 1. Resumen de los criterios de clasificación, fortalezas y debilidades de los sistemas de clasificación basados en la plasticidad para suelos de grano fino

Sistema de clasificación	Criterio	Fortalezas	Debilidades
Casagrande (1947) - USCS	<p>Clasificación basada en la observación de propiedades determinadas cualitativamente (permeabilidad, tenacidad y resistencia mecánica en seco) y su conexión con los límites de Atterberg. Limo arcilloso límite: A-Line (PI = 0.73 (LL - 20)).</p> <p>CL-ML área de 4 < PI < 7 y LL < 29.6.</p> <p>7 grupos (5 inorg. + 2 org) + 1 para la turba fuera del gráfico.</p> <p>Arbitrariedad: moderada.</p>	<p>Popularidad: la clasificación más utilizada y estandarizada de estos sistemas propuesta hasta la fecha.</p> <p>En general buenas críticas en la literatura.</p> <p>Define razonablemente bien la naturaleza y comportamiento de determinados suelos, si no se busca demasiada precisión.</p> <p>Los símbolos de grupo son bastante intuitivos.</p> <p>Es compatible con la flexibilidad para realizar cambios en el sistema.</p> <p>Sencillez.</p>	<p>Clasificación ad hoc basada en una solución de tipo de referencia circular: Casagrande (1947) "clasificó" los suelos originales antes de plasmarlos en su carta, trazando la Línea A según la posición ocupada por estas muestras originales, aunque no todos los depósitos de suelo eran paralelos a la Línea A. La región CL-ML también es una solución ad hoc en ausencia de un criterio específico para clasificar los grupos de límites.</p> <p>El criterio de tenacidad (plasticidad) varía según el LL.</p> <p>Sistema particularmente impreciso y poco sensible para suelos con características intermedias entre arcillas y limos (por ejemplo, arcillas limosas, limos arcillosos o arenas arcillosas), que tienden a clasificarse como arcillas si LL < 50 y como limos si LL > 50.</p> <p>Las arcillas se pueden clasificar como limos para LL > 65.</p>
AASHTO	<p>Límite arcilla-limo: PI = 10.</p> <p>5 grupos (todos inorgánicos).</p> <p>Arbitrariedad: alta.</p>	<p>Cierta popularidad (por ejemplo, clasificación estandarizada en ASTM D3282-15 (2015)).</p> <p>Clasificación razonablemente buena para suelos con LL < 30 y arcillas.</p>	<p>El límite arcillo-limo no se corresponde con el comportamiento real del suelo.</p> <p>Tiende a clasificar todos los suelos (incluidos los limos) como arcillas cuando LL > 30.</p>

			<p>No distingue suelos con propiedades intermedias.</p> <p>Criticado negativamente en la literatura.</p> <p>Poco usado.</p> <p>Codificación alfanumérica de grupos, lo que la hace poco intuitiva.</p>
FAA	<p>No se hace distinción entre arcillas, limos u otro tipo de suelos. - 7 grupos (inorg) + 1 para turba, que se ubican fuera del dominio del gráfico.</p> <p>Arbitrariedad: alta.</p>	<p>Ninguno desde el punto de vista práctico.</p>	<p>La delimitación de los grupos no se corresponde con ninguna naturaleza o comportamiento específico del suelo.</p> <p>Negativamente</p>
Saito and Miki (1975)	<p>Mismos criterios que Casagrande-USCS pero reemplazando la tabla de ejes PI-LL por Pr-LL, where Pr = PI/PL.</p> <p>Arbitrariedad: moderada.</p>	<p>Las relaciones observadas por los autores entre Pr y varias propiedades del suelo pueden ser útiles para otros propósitos o para corroborar otras clasificaciones propuestas</p>	<p>En desuso (retirado).</p> <p>Completamente poco intuitivo y confuso.</p> <p>No se propone una nueva clasificación, sino una reinterpretación de los ejes en el gráfico de Casagrande.</p> <p>Las mismas deficiencias técnicas con respecto al diseño de la carta Casagrande-USCS son atribuibles al enfoque de Saito y Miki (1975).</p> <p>Los criterios de textura-plasticidad utilizados son incorrectos y engañosos.</p>

<p>Moreno-Maroto y Alonso-Azcarate (2017, 2018)</p>	<p>Clasificación basada en la relación entre los límites de Atterberg y las medidas cuantitativas de plasticidad mediante el estudio de la máxima tenacidad y capacidad de flexión, así como la percepción de consistencia pegajosa.</p> <p>Dos líneas: considerando la versión mejorada de 2018, estas son C-Line ($PI = LL / 2$) y M-Line ($PI = LL / 3$). - Arcillas por encima de la línea C; limos y otros suelos de baja plasticidad por debajo de la línea M; suelos con propiedades intermedias (CL-ML y CH-MH) entre las dos líneas. - 8 grupos: 6 inorg. + 2 org.</p> <p>Arbitrariedad: baja.</p>	<p>Precisión: los grupos de clasificación surgen de forma natural a partir de medidas cuantitativas de plasticidad.</p> <p>Fácil de entender: Misma nomenclatura y tipo de gráfico que Casagrande (1947) -USCS - Sencillez: las reglas para diferenciar un tipo de suelo de otro son fáciles de aplicar y recordar.</p> <p>Alta sensibilidad, incluyendo no solo los grupos de arcilla convencional (CL, CH) y limo (ML, MH), sino también otros para suelos con propiedades intermedias en todo el rango de valores LL (CL-ML y CH-MH).</p> <p>Los grupos de clasificación representan de manera confiable la naturaleza y el comportamiento esperado del suelo.</p>	<p>Propuesta de vista relativa y por tanto menos conocida que otras, como la de Casagrande (1947) -USCS. - Aunque se ha desarrollado sobre la base de un número estadísticamente consistente de muestras de suelo, su validez debe ser verificada en un mayor número de muestras por otros investigadores y para diferentes escenarios.</p>
---	---	---	---

De Moreno, (2021, p.9).

Pruebas manuales de selección

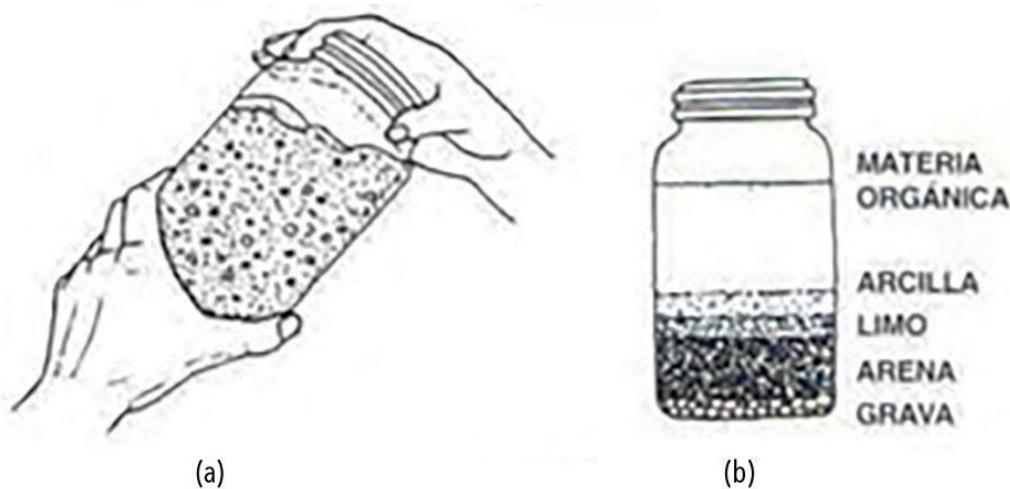
Las pruebas manuales de selección nos permitirán conocer la calidad de la tierra, y es apropiada para fabricar bloques de adobe.

Prueba granulométrica

La prueba granulométrica o prueba de la botella sirve para determinar la proporción de los componentes principales, tales como arena, limos y arcillas de la tierra. La tierra debe ser tamizada y debe

ser depositada en una botella de boca ancha de 1L de capacidad hasta la mitad de su altura, luego se llena la parte restante con agua limpia. Se agita vigorosamente la botella hasta que las partículas de tierra estén en suspensión, luego se deja reposar y se espera que todas las partículas de arena reposen en el fondo. Las partículas de limos y arcillas reposaran después de algunas horas. Finalmente se debe medir las capas para determinar la proporción de arena, limos y arcilla; se recomienda que la cantidad de arena fluctúe entre 1.5 a 3 veces la cantidad de limos y arcillas, tal como se muestra en la Figura 1 (Morales et al., 1993).

Figura 1. Estratificación de materiales
(a) mezcla. b) resultado del reposo de partículas.



De Minke, (2005, p. 26).

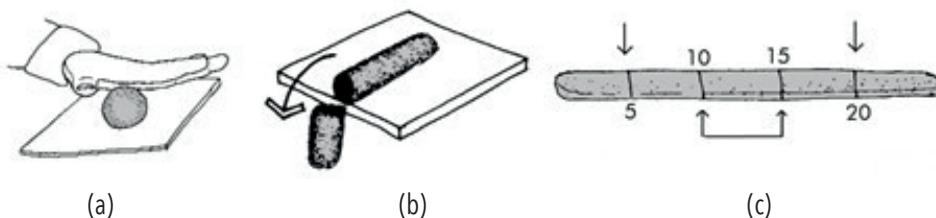
Prueba de cohesión

Para ejecutar esta prueba se retiran las gravas de la muestra, luego se moja, mezcla y se deja reposar la tierra una media hora hasta que la arcilla pueda reaccionar con el agua, verificando que la tierra no debe ensuciar las manos. Sobre una

plancha, se moldea un cigarro de 3 cm de diámetro, luego se empuja lentamente el cigarro hacia el vacío y se mide el largo del pedazo que se desprendió. Se realiza tres veces y se hace una media. Entre 7 y 15 cm es una tierra conveniente (Carazas y Rivero, 2002), ver Figura 2.

Figura 2. Prueba de cohesión

a) Moldeo inicial b) Moldeo del cigarro c) Posibles medidas del cigarro



De Carazas, (2002, p. 9).

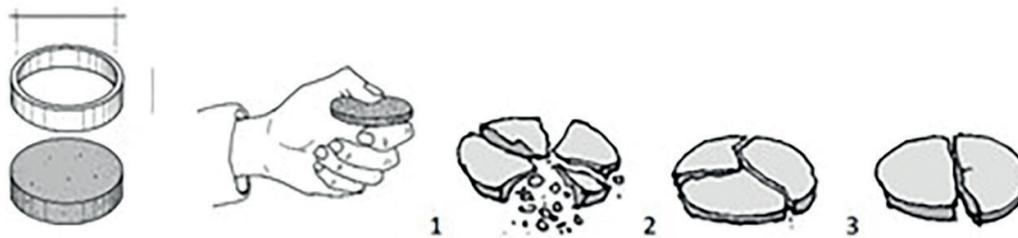
Prueba de resistencia

Esta prueba determina la cantidad de arcilla que contiene un suelo, para iniciar este test se humedece la muestra hasta que el material esté blando, pero de modo que conserve su forma. Se

procede a elaborar cinco cilindros con 5 cm de diámetro y 1 cm de espesor, y se secan al sol. Una vez secos los cilindros, se trata de pulverizarlos aplastándolos con el índice y el pulgar (Carazas y Rivero, 2002), ver la Figura 3.

Figura 3. Test de resistencia del cilindro

- 1) Baja resistencia (inadecuada) cuando el disco se aplasta fácilmente.
- 2) y 3) Media o alta resistencia (adecuada) cuando el disco se aplasta con dificultad o se rompe con un sonido seco.



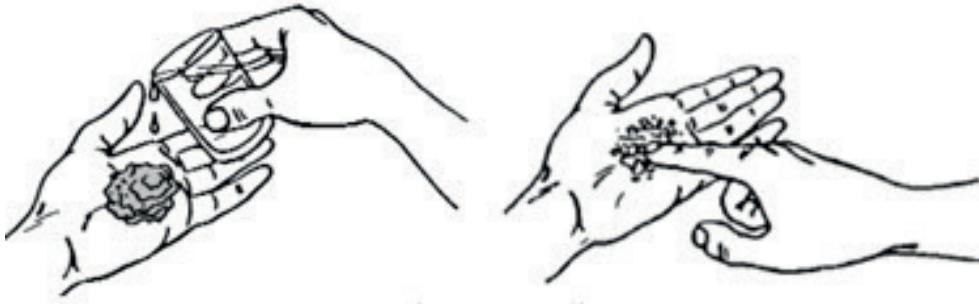
De Carazas, (2002, p. 9).

Prueba de lavado

Una muestra de barro húmedo se frota entre las manos, si las partículas se sienten claramente, esto indica que el barro es arenoso o gravoso, mientras que si la muestra es pegajosa pero las manos

pueden limpiarse al frotarlas cuando se secan, esto es indicativo de un barro limoso. Si la muestra es pegajosa, haciendo necesario el uso de agua para lavarlas esto indica que el barro es arcilloso, ver la Figura 4 (Carazas & Rivero, 2002).

Figura 4. Adhesión de arcilla a la piel



De Carazas, (2002, p. 9).

Ensayo de caída de bola

La mezcla a ensayar es tierra y agua para formar una bola de 4 cm de diámetro, cuando esta bola se deja caer desde una altura de 1.5 m sobre una superficie plana pueden ocurrir diferentes resultados. Si la bola se aplana levemente y muestra muy pocas o ninguna fisura, esta tiene una alta capacidad aglutinante, que proviene de un contenido de arcilla muy elevado. Por lo general esta mezcla debe reba-

jarse añadiendo arena. Si el ensayo muestra una apariencia como la de la derecha en la Figura 5, entonces esta tiene un muy bajo contenido de arcilla. Su capacidad aglutinante es por lo general insuficiente y no puede ser utilizada como material de construcción. En el caso de la tercera muestra a partir de la izquierda, esta tiene una relativamente pobre capacidad aglutinante, pero usualmente una composición que le permite ser utilizada para adobes o tierra apisonada, ver Figura 5 (Carazas & Rivero, 2002).

Figura 5. Ensayo de caída de bola



De Minke, (2005, p. 27).

Pruebas de laboratorio para selección

Los ensayos y experimentación permitirán catalogar y caracterizar geotécnicamente los tipos de suelo y determinar las propiedades de los diferentes elementos a estudiarse. Este proceso está basado en las normas de la *American Society of Testing Materials* (ASTM); la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO); el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), (Alverca et al., 2018).

Test de características físicas

Los ensayos para obtener las propiedades físicas del suelo, se atribuye a la proporción de componentes presentes en el suelo como son: textura, estructura, consistencia entre otros. Entre los principales tipos de análisis están el contenido de humedad, granulometría por tamizado, límite líquido y límite plástico.

La elaboración de ensayos que determinan las propiedades físicas del suelo utilizará las normas NTE INEN 0690 1982 - 05 referente a ensayos de contenido de humedad, la norma NTE INEN 0691 1982 - 05 referente a ensayos de límite líquido, la norma NTE INEN 0692 - 1982 - 05 referente al límite plástico, la norma NTE INEN 0696 - 2011 referente a ensayos de granulometría. En la Tabla 1, se indican las normas utilizadas para las pruebas físicas de lavado de finos, granulometría, límites de Atterberg, entre otros (Alberca et al., 2018), ver Tabla 2.

Tabla 2. Normativa de ensayos físicos

Ensayo	Norma
Ensayo normalizado para materiales más finos que una criba No. 200 (75 μ m) en agregados minerales mediante lavado	ASTM C117 - 03
Granulometría	ASTM D-422-63 / AASHTO T 88 / NTE INEN 696:2011 / Ecuador / NTE INEN 0697:2010 / Ecuador
Límite líquido	ASTM D4318 / AASHTO T 89 / NTE INEN 0691:1982 / Ecuador
Límite plástico	ASTM D4318 / AASHTO T 90 / NTE INEN 0692:1982 / Ecuador

De Alberca, (2018, p. 273).

Test de características químicas y mineralógicas

La estructura química y mineralógica de los suelos puede ser determinada a través de análisis instrumental de espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) y la difracción de rayos X (XRD), que son los métodos estándar representados en las Tablas 3 – 5 (Dormohamadi & Rahimnia, 2020).

Tabla 3. Ensayos de características químicas y mineralógicas de suelos

Tipo de test		Código estándar	Propósito
Características químicas y mineralógicas	XRD	ASTM D464300 XRD 139252 BS EN	Reconocimiento de las principales fases y sub-fases de forma semi cuantitativa
	XRF	1621 (2013) ASTM E	Reconocimiento de los elementos del componente químico de forma cuantitativa

De Dormohamadi, (2020, p. 3).

Tabla 4. Composición química del adobe

La&Lu	MnO ₂	BaO	P2O5	SrO	Cl	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	L.O.I	SiO ₂	Chemical material
<0.01	-	-	<0.01	0.1	0.5	1.5	0.7	2.7	1.5	3.6	5.7	10.7	15.7	18.3	39	SE
<0.01	-	-	<0.01	0.1	0.7	1.5	0.6	2.5	2.6	3	6.6	9.8	13.3	18.3	41	SM
<0.01	-	-	<0.01	-	0.6	0.2	0.7	2.8	1.4	3.6	6.8	10.8	12.9	15.9	44.9	SH
<0.01	-	-	<0.01	0.2	<0.01	<0.01	0.6	2.4	1	3.2	6.3	8.5	17.8	17.8	42.2	SGH
<0.01	0.1	0.1	<0.01		<0.01	<0.01	0.7	2.9	1.3	4.3	5.6	12.4	14.3	14.6	43.7	SA
<0.01	-	-	<0.01	0.1	0.7	0.3	0.6	2.5	2	3	5.6	10.6	14.3	17	43.3	Sz

De Dormohamadi, (2020, p. 3).

Tabla 5. Composición mineralógica de adobe

Componente Químico	Componente Químico	SE	SM	SH	SGH	SA	SZ
Composición mineralógica principal	Calcite	++++	+++	+++	+++	+++	+++
	Quartz	+++	+++	+++	++++	+++	++++
	Feldspar	++	++	++	++	++	++
	Dolomite	ND	ND	ND	ND	++	ND
	Mixed Layered Clay Mineral	+	+	+	+	+	+
Composición de minerales arcillosos	Illite	+	+	+	+	+	+
	Kaolinite	+	+	+	+	+	+
	Chlorite	+	+	+	+	+	+++
	Smectite	+	+	+	+	+	+

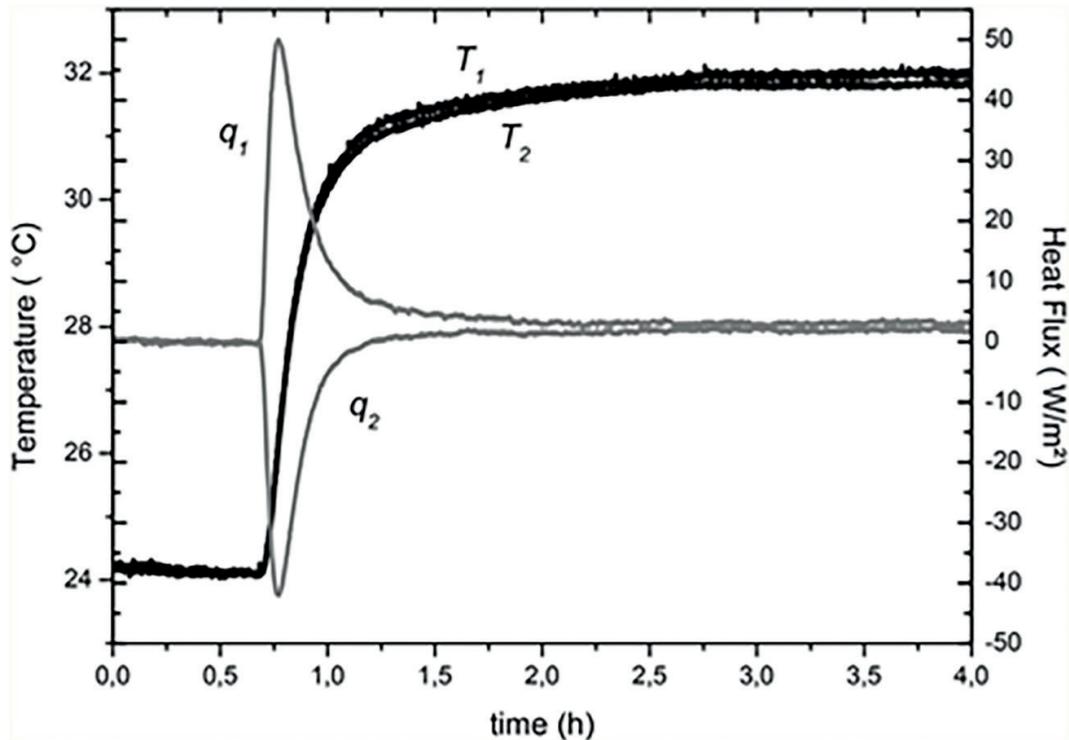
De Dormohamadi, (2020, p. 5).

Pruebas de simulación

La Figura 6 muestra el adobe A1 que las temperaturas evolucionaron de manera asintótica hacia el nuevo *set point* y los flujos evolucionaron muy rápidamente al principio y alcanzaron un valor constante que correspondía al estado estacionario alcanzado al final de la prueba. La energía interna almacenada es proporcional al área limitada por las curvas de evolución de los flujos de calor. En la Tabla

6 las difusidades térmicas de los biocompuestos y sus incertidumbres asociadas se calcularon utilizando la siguiente ecuación $A = \lambda / (\rho * C_p)$, donde A: tipo adobe, λ : conductividad térmica efectiva, ρ : densidad de la muestra y C_p : calor específico; observándose una disminución similar en todos los casos de muestra compuesta cuando aumenta la concentración de paja (Abanto et al., 2017).

Figura 6. Flujo de temperatura y calor para las caras superior e inferior de los materiales compuestos A1



De Abanto, (2017, p. 187).

Tabla 6. Capacidades caloríficas específicas, difusividad e incertidumbre de muestras de adobe

Muestra de Adobe Soil	Mezcla	C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Incertidumbre (%)	Difusividad A (m ² /s)	Incertidumbre $u_{(A)}$ (%)
A	1	613.7	7.2	2.9E-07	8.0
B	1	573.2	7.7	3.4E-07	10.9
	2	609.2	8.4	2.7E-07	10.5
C	1	609.9	6.9	3.2E-07	8.8
	2	559.8	8.3	2.8E-07	11.5
	3	587.3	11.7	3.2E-07	14.1

De Abanto et al., (2017)

Comparación entre pruebas experimentales y simulación

Se determinaron las conductividades térmicas efectivas del material compuesto (suelo / paja de geometría cilíndrica) dependiendo del flujo de calor y la diferencia de temperatura. Las capacidades caloríficas medidas y simuladas se presentan en la Tabla 7. El examen de estos resultados muestra que la diferencia entre el modelo y la capacidad calorífica medida se encuentra entre 0,2% para las muestras B2 y aproximadamente 4,2% para las muestras C2 (Abanto et al., 2017).

Tabla 7. Comparación de calor específico experimental y simulado

Muestra de Adobe Soil	Mezcla	Capacidad de calor específico (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)		Simulado	Incertidumbre $u_{(x)}$ (%)
		Experimental			
A	1	613.7	613.7	627.8	2.3
B	1	573.2	573.2	591.5	3.2
	2	609.2	609.2	610.4	0.2
C	1	609.9	609.9	628.8	3.1
	2	559.8	559.8	583.3	4.2
	3	587.3	587.3	588.5	0.2

De Abanto, (2017, p. 190).

Elaboración del bloque de adobe

- Calidad, preparación, formas y dimensiones del adobe

De acuerdo a la Norma peruana E.080 (2017), se establece que las dimensiones del bloque de adobe cuadrado no deben sobrepasar 0.40 m. de lado, por razones de peso. El bloque de adobe deberá ser rectangular y debe tener un largo igual a dos

veces su ancho. La altura del bloque de adobe debe estar entre 0.08 m y 0.12 m. Se debe cernir la tierra antes de preparar el barro y luego someterla a un proceso de hidratación sostenida por lo menos 48 horas. El secado del bloque de adobe debe ser forma natural debidamente protegidos del sol y del viento. El bloque de adobe terminado debe estar libre de materias extrañas, grietas u otros defectos que puedan degradar su resistencia o durabilidad.

- Calidad, preparación y espesor del mortero

La Norma peruana E.080 (2017) establece que se deben remojar los bloques de adobes antes de asentarlos, durante 15 a 30 segundos. La humedad del mortero no debe pasar el 20 %, para evitar el agrietamiento. La cantidad de agua es la menor posible para disminuir las probabilidades de agrietamiento. La proporción entre paja cortada y tierra en volumen puede variar entre 1:1 y 1:2. Si la paja es escasa, se debe usar arena gruesa. La proporción a utilizar se debe hacer de acuerdo a la prueba de campo. El espesor de los morteros puede variar de 5 mm a 20 mm.

- Estabilización del adobe

La estabilización sostenible del adobe está planteada realizarla con fibra natural más la adición de algún otro aditivo de ser necesario con la finalidad de cumplir con los estándares de calidad de fabricación del adobe.

La Tabla 8 resume los efectos del uso de fibras naturales con o sin aditivos en la elaboración de bloques de adobe.

Tabla 8. Estabilización del adobe con fibras naturales

Tipos de fibra natural	Aditivo adicional	Efectos	Referencia
Paja	Aserrín	El aserrín mejora las propiedades mecánicas, mientras que la paja reduce la sorptividad. El aumento del contenido de fibra disminuye la densidad a granel, la conductividad térmica y la resistencia.	(De Castillo et al., 2021).
Cascara de maní		Tienen una baja conductividad y una alta absorción de agua que pueden justificar válidamente su uso en la producción de hábitats ecológicos que requieren menos energía para lograr el confort térmico en el interior. La liberación de macromoléculas de poli fenoles de las conchas en un medio acuoso es un activo para la estabilización de los adobes.	(Bobet et al., 2020).
Polvo de bambú		Se puede utilizar como aditivo en la mezcla de los ladrillos de adobe, aumentando sustancialmente su resistencia.	(Paradiso et al., 2018).

Botellas plásticas		<p>Ayuda a disminuir el impacto ambiental debido al amplio uso de botellas plásticas cuya degradación toma alrededor de 450 años.</p> <p>El análisis de costos se obtuvo que los bloques con PET si aumentan su costo, pero de forma moderada lo que indica la factibilidad de hacer este tipo de bloques a nivel industrial, los bloques elaborados cumplen con las especificaciones indicadas en la norma NTE INEN 3066.</p>	(Gómez y Guzmán, 2019)
Fibra de yute		La resistencia a la flexión, la resistencia al impacto y el rendimiento de agrietamiento por contracción de los materiales de tierra se pueden mejorar con la adición de fibras de yute.	(Concha-Riedel et al., 2019)
Fibra de Maguey		Se evidencia que el adobe compactado con mayor resistencia a la compresión se obtiene con la adición de 0,25% de fibra de Maguey.	(Terrones, 2019)
Polímero natural de penca		Ayuda a mejorar las propiedades mecánicas y absorción del adobe, cumpliendo con los datos que se presenta en la norma E.080 para la compresión y flexión.	(Diaz, 2019)
Fibra natural de caña		La resistencia a compresión, flexión y absorción de bloques de adobe compactado, con adición de fibra natural de caña en diferentes longitudes, el adobe compactado, mejora sus propiedades mecánicas, en resistencia a compresión hasta en 91,20%, en resistencia a flexión mejora hasta en un 58,24%, sin embargo, el grado de absorción aumenta, haciéndolo un material más poroso e inestable al agua.	(Campos, 2019)
Estiércol de caballo		La incorporación de estiércol de caballo, en la resistencia a la compresión y flexión del adobe, siguiendo la norma E.080 disminuye en 46,82% su resistencia a la compresión, y 27,17% en la flexión.	(Ortiz, 2019)

Mucílago de cactus		La adición a 12% de jabonato de alumbre o mucílago de cactus de San Pedro mejorará la resistencia del adobe estabilizado a la acción del agua.	(Díaz y Puyen, 2019)
Ceniza	Cemento	La dosificación de suelo con sustitución de 20% de ceniza del peso total y la adición de 9% de cemento, obteniendo una resistencia a compresión de 11 kg/cm ² , un valor aprobado por la norma E.080.	(Noriega y Madeley, 2019)

De Brito del Pino, (2021).

Conclusiones

Esta investigación bibliográfica del estado del arte del adobe sostenible propone una metodología para elaboración del adobe, que parte exponiendo un estudio comparativo sobre la clasificación de los suelos de grano fino. Seguidamente para seleccionar el tipo de suelo se procede con las pruebas manuales de campo en una primera etapa, para luego proceder con las pruebas de laboratorio (físicas, químicas y mineralógicas). La granulometría de los bloques de adobe es esencial en la fabricación, puesta en obra y comportamiento de éstos en la vivienda y es determinada según la experiencia constructiva de cada zona donde ha sido edificada. Es así que no existe una composición granulométrica única con un comportamiento ideal que satisfaga las características físicas y mecánicas, tanto en laboratorio cómo in situ.

Finalmente, con el test de simulación se ha realizado considerando un determinado parámetro físico del adobe. Estas pruebas deberían dar resultados correlacionados entre sí, con lo cual se determina la efectividad de cada prueba y del método en general.

La elaboración del adobe está remitida a la Norma Peruana E.080 (2017), está enfocada en mejorar su resistencia a la compresión y flexión, y por tanto aumentar su durabilidad; además ha nuestro criterio expone de forma clara el proceso constructivo del adobe, siendo la norma que más se adapta a nuestro medio, ya que en el Ecuador no exige una normativa constructiva respecto del adobe. En este sentido se ha profundizado un estudio bibliográfico para la estabilización del adobe en base a fibras naturales, donde se resume los beneficios y desventajas del uso de estas fibras en el proceso constructivo del adobe. La incorporación de fibras a los bloques de adobe deberá ser analizado previamente la durabilidad y determinar el rango óptimo de adición que demuestre un comportamiento físico y mecánico adecuado a las condiciones climáticas de la zona donde se va a construir.

Ninguna de las comunidades indígenas mantiene el uso de bloques de adobe, razón por la cual esta técnica de construcción ancestral está cerca de desaparecer tanto en las zonas urbanas cómo en las rurales y asimismo hay que tener en cuenta que la construcción a base de adobe ha sido reemplazada en su totalidad por ladrillo cerámico cocido o bloque de cemento, debido a la inexistencia de normativa y a la desconfianza al comportamiento físico mecánico del adobe.

Finalmente esperamos ayudar a generar una conciencia sobre el uso de la tierra en los procesos constructivos, que casi no se lo practica hoy; y al mismo tiempo a proteger y restaurar las edificaciones basadas en tierra que formen parte de nuestro patrimonio cultural, el cual podría ser parte de un próximo estudio investigativo. Todo lo anterior subraya la necesidad de emitir una norma por entidades gubernamentales para que las construcciones que se realicen y el creciente número de investigaciones realizadas con este material sean realizadas de manera científica, trazable y medible.

Referencias

- Abanto, G., Karkri, M., Lefebvre, G., Horn, M., Solis, J., & Gómez, M. (2017). Thermal properties of Adobe employed in Peruvian rural areas: Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 177-191. doi: 10.1016/j.cscm.2017.02.001.
- Alberca, E., Álvarez, A., Haro, X., Zambrano, R., & Avilés, J. (2018). Comparación de parámetros físicos y mecánicos entre el adobe y el tapial en el austro del Ecuador. ASRI: Arte y sociedad. *Revista de investigación*, (14), 18., ISO 690.
- Altamirano C., (2019). Incidencia de la fibra vegetal" paja ichu" en la resistencia mecánica del adobe en el distrito de Cajamarca, Universidad Nacional de Cajamarca.
- Araceli, D., & Longa, A. (2018). Efecto de tres niveles de miel de caña de azúcar en la resistencia a la compresión del adobe compactado, Universidad Privada del Norte.
- Araya-Letelier, G., Antico, F. C., Concha-Riedel, J., Glade, A., & Wiener, M. J. (2019). Effectiveness of Polypropylene Fibers on Impact and Shrinkage Cracking Behavior of Adobe Mixes. In *Earthen Dwellings and Structures*, pp. 257-267, Springer.
- Blondet, M., Tarque, N., Vargas, J., & Vargas, H. (2019). Evaluation of a Rope Mesh Reinforcement System for Adobe Dwellings in Seismic Areas. In *Structural Analysis of Historical Constructions*, pp. 405-412. Springer.
- Bobet, O., Nassio, S., Seynou, M., Remy, B., Zerbo, L., Sanou, I., ... & Gilles, E. (2020). Characterization of Peanut Shells for Their Valorization in Earth Brick. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 8(4), 301-315.
- Campos Cruzado, N. (2019). Resistencia a compresión, flexión y absorción de bloques de adobe compactado, con adición de fibras de caña", Tesis de grado, Ingeniería civil, Universidad privada del norte (2018).
- Carazas Aedo, W., & Rivero Olmos, A. (2002). Bahareque: Guía de construcción para sísmica, Ediciones CRATerre.
- Choez, P. C. V., & Mora, F. M. (2019). Mantenimiento de edificaciones vernáculas, sistema constructivo en tierra-adobe (estudio de caso La Tola-Píntag). *Revista Herencia*, 32(1), 95-118.
- Chuqui Infante, M. Á. (2019). Optimización del proceso de fabricación de ladrillos en la corporación de productores primero de mayo del cantón Chambo provincia de Chimborazo, Universidad Nacional de Chimborazo.
- Concha-Riedel, J., Araya-Letelier, G., Antico, F. C., Reidel, U., & Glade, A. (2019). Influence of Jute Fibers to Improve Flexural Toughness, Impact Resistance and Drying Shrinkage Cracking in Adobe Mixes. In *Earthen Dwellings and Structures* pp. 269-278. Springer.
- Dormohamadi, M. & Rahimnia, R. (2020). Combined Effect of Compaction and Clay Content on the Mechanical Properties of Adobe Brick. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier.
- Febres Herrera, T. (2017). Alternativa de solución a la problemática ambiental producida por las ladrilleras artesanales en Arequipa, Universidad nacional de San Agustín.
- Gallo Rivera, A. D., & Paredes Vargas, C. S. (2019). Determinación y caracterización de las concentraciones de material particulado sedimentable del sector de ladrilleras de la Matriz del Cantón Chambo, Universidad Nacional de Chimborazo.
- Gómez Cuadrado, E. P., & Guzmán Chialal, M. F. (2019). Comparación entre las propiedades físicas y mecánicas de los bloques fabricados con viruta de plástico PET y los bloques tradicionales de acuerdo a la norma NTE INEN 3066, Universidad Central del Ecuador.

- Guerrero, C., & Velasco, L. (2018). Estudio experimental de clasificación de suelos derivados de cenizas volcánicas en el suroccidente colombiano con el método SUCS, el AASHTO y un nuevo método de clasificación de suelos. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(2), 378-397. Revista de la División de Ingeniería, Universidad del Norte.
- Lizcano, A. U. (2017). Diagnóstico sobre la incidencia de la actividad ladrillera en el territorio, a partir de sus impactos ambientales, en Sogamoso-Colombia (Tesis de Grado).
- Lozano Quispe, J., & Zurita Herrera, A. (2019). Resistencia a la Compresión y Absorción del Adobe Estabilizado con Confitillo Jaén-Cajamarca.
- Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento del Perú. (2017). Norma E080 diseño y construcción con tierra reforzada
- Minke, Gernot. (2001). Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Nordan Comunidad.
- Montenegro Echeverría, M. S. (2019). Caracterización del adobe reforzado con fibras naturales y artificiales para la recuperación de construcciones tradicionales en la Comuna de Zuleta, Tesis de grado, Arquitectura, Universidad Central del Ecuador
- Morales, R., Torres, R., Rengifo, L., & Irala, C. (1993). Manual para la construcción de viviendas de adobe. Lima, Perú.
- Moreno-Maroto, J., Alonso-Azcárate, J., & O'Kelly, B. (2021). Review and critical examination of fine-grained soil classification systems based on plasticity. *Applied Clay Science*, 200, 105955.
- Moscoso M. (2016). EL ADOBE, SUS CARACTERÍSTICAS Y EL CONFORT TÉRMICO. I Congreso Internacional Online Filosofía De La Sustentabilidad De Vivienda Tradicional "Transformando Comunidades Hacia El Desarrollo Local," 71-75.
- Noriega, R., & Madeley, Y. (2019). Influencia de la ceniza y cemento en el adobe para muro de mampostería sobre la compresión y durabilidad, Trujillo 2018 (Tesis parcial).
- Ortiz Zamora, D. Y. (2019). Efectos de la incorporación de cuatro porcentajes (2.5%, 5%, 7.5% y 10%) de estiércol de caballo en la resistencia a la compresión y flexión del adobe.
- Palacios Carvajal, M. J., Castillo Campoverde, T. O., & Donoso León, C. E. (2018). Resistencia a compresión del superadobe, usando fibras de cabuya y polipropileno como contenedor. *Caribeña de Ciencias Sociales*, (diciembre).
- Paradiso, M., Hernández, R., Bizzeti, F., Farigu, A., & Lotti, O. (2018). Usage of bamboo powder as an additive in adobe bricks and bamboo canes frame for the reinforcement of adobe structure. *Revista M*, 15, 70-79.
- Quiroz, P. C., Moreno-Martínez, J. Y., Galván, A., & Matus, R. A. (2019). Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe mediante ensayos de laboratorio.
- Terrones, S. (2019). Resistencia a la compresión axial del adobe compactado con adición de fibra de maguey, Cajamarca 2017.
- Vera, G., Manuel, D., & Olazabal Bairo, K. (2019). Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas del adobe estabilizado con cemento y mucilago de gigantón fabricado según la norma E-0.80, comparado con el adobe tradicional del distrito de San Jerónimo de la región de Cusco.
- Vermiglio Pimentel, P. F. (2019). Comparación de la resistencia a compresión uniaxial en unidades de adobe tradicional, adobe compactado y superadobe, Cajamarca 2017.