

COMPRESSION AND FLEXURE RESISTANCE OF TRADITIONAL ADOBE REUSING CRUSHED CLAY BRICK WASTE, CAJAMARCA 2023

Antuanet Sofía Gonzalez Escalante¹; Carlos Nau Diaz Vera, Posgrado²; Félix Alejandra Velásquez Huayta³
^{1,3}Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00024004@upn.pe, felix.velasquez@upn.edu.pe
²Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00022462@upn.pe

Abstract – The construction sector is key to the economic and social development of countries; however, it produces debris that damages the environment. For this reason, this article aimed to determine the compression and bending resistance of traditional adobe units reusing clay brick waste from the demolition of works in Cajamarca. The methodology presented a quantitative approach, with an experimental and application-type design. The population and sample were made up of 80 traditional adobe units with the incorporation of 0%, 5%, 10% and 15% of crushed clay brick waste, following what is indicated in the N.T.E. E 0.80. The tests revealed that the pattern adobe showed a compressive strength of 20.95 kg/cm², while the adobes with RCD obtained 22.18 kg/cm², 22.54 kg/cm² and 23.23 kg/cm² respectively. Regarding flexural resistance, the pattern adobe showed resistance to 5.71 kg/cm², while the adobes with RCD reached 6.88 kg/cm², 8.05 kg/cm² and 7.52 kg/cm² respectively. Demonstrating that the adobe with 15% RCD had greater compressive strength and that with 10% RCD had greater flexural strength. This study contributed to sustainable construction.

Keywords-- Traditional adobe, residue, clay brick and resistance.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DEL ADOBE TRADICIONAL REUTILIZANDO RESIDUOS DE LADRILLO DE ARCILLA TRITURADO, CAJAMARCA 2023

Antuanet Sofía Gonzalez Escalante¹; Carlos Nau Diaz Vera, Posgrado²; Félix Alejandra Velásquez Huayta³
^{1,3}Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00024004@upn.pe, felix.velasquez@upn.edu.pe
²Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca - Perú, N00022462@upn.pe

Resumen– El sector de la construcción es clave para el desarrollo económico y social de los países, sin embargo, produce escombros que dañan al ambiente. Por tal razón, este artículo tuvo por objetivo determinar la resistencia a compresión y flexión de unidades de adobe tradicional reutilizando residuos de ladrillo de arcilla provenientes de la demolición de obras de Cajamarca. La metodología presentó un enfoque cuantitativo, con diseño experimental y de tipo aplicativo. La población y muestra estuvo formada por 80 unidades de adobe tradicional con la incorporación de 0%, 5%, 10% y 15% de residuos de ladrillos de arcilla triturados, respetando lo indicado en la N.T.E. E 0.80. Los ensayos revelaron que el adobe patrón mostró una resistencia a compresión de 20.95 kg/cm², mientras que los adobes con RCD obtuvieron 22.18 kg/cm², 22.54 kg/cm² y 23.23 kg/cm² respectivamente. En cuanto a la resistencia a la flexión, el adobe patrón mostró resistir 5.71 kg/cm², mientras que los adobes con RCD alcanzaron 6.88 kg/cm², 8.05 kg/cm² y 7.52 kg/cm² respectivamente. Demostrando que el adobe con 15% de RCD tuvo mayor resistencia a la compresión y, el con 10% de RCD tuvo mayor resistencia a la flexión. Este estudio contribuyó a la construcción sostenible.

Palabras Clave– Adobe tradicional, residuo, ladrillo de arcilla y resistencia.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La gran cantidad de edificaciones existentes y el constante crecimiento de infraestructura, necesaria para cubrir las necesidades básicas de una población en desarrollo, deja a su paso grandes volúmenes de residuos de construcción y demolición o también llamados RCD. Mundialmente cada año se genera más de 6,5 mil millones de toneladas de residuos, de los cuales entre 2,6 y 3 mil millones de toneladas corresponden a RCD [1]. Lo que hace que el sector de la construcción sea responsable de la producción del 30% al 40% del total de residuos anuales generados en países industrializados [2]. Según datos de la Eurostat, en la Unión Europea cerca del 36% de sus residuos anuales son de RCD; a su vez, en España se genera 29,8% de estos anualmente [3]. Estados Unidos registra el 40% de residuos anuales de este tipo [4]. Asimismo, la Ciudad de México estima una producción diaria de 14 mil toneladas de cascajo de residuos de este sector [5].

En América latina también se genera una gran cantidad de RCD, estimando que, en el Perú, de acuerdo con la estadística ambiental del Sistema Nacional de Información Ambiental, menciona que en el año 2021 se generó un 30% de residuos sólidos no domiciliarios (residuos industriales, hospitalarios, de construcción y demolición). De estos, el 40% son depositados en botaderos clandestinos e informales, lo que provocó el deterioro de 2'237.61 hectáreas [6]. Esto, en adición al cambio climático, ha ocasionado la fragmentación y erosión de los suelos, la modificación del ecosistema, la reducción del litoral peruano, entre otros [7], afectando directamente la calidad del agua y la tierra, con ello, la vida de la fauna y flora que habitan en ellas, y en última instancia la salud de las personas.

Por lo que, en una búsqueda consciente de sostenibilidad, calidad y bajo costo, destaca el adobe como material constructivo que ha sido usado desde la antigüedad en casi todas las culturas. En el Perú, el uso del adobe trasciende desde la época prehispánica debido a que es un material fácil de ejecutar para las comunidades, además de tener un bajo impacto ambiental en su elaboración y sus escombros pueden ser devueltos a la tierra dejando una huella nula, lo que lo convierte en un material ecosostenible [8]. En el año 2021, el INEI señaló que el 31% de viviendas en el país presentan paredes exteriores y áreas construidas a base de tierra (adobe o tapia), lo que lleva a considerarlo como el segundo material de construcción más utilizado en el país [9]. Esto debido a sus ventajas térmicas, mecánicas, acústicas, versátiles y económicas [10]. Sin embargo, frente a unidades de ladrillo y concreto, su resistencia a esfuerzos de flexión y compresión axial es menor [11]. Por tal razón, la construcción con esta técnica en áreas con riesgo sísmico elevado debe realizarse incorporando refuerzos necesarios [12]. Es así que recientes estudios han incorporado RCD a los materiales de construcción, debido a que mejoran sus propiedades, algunos de estos estudios son:

Elaboración de bloques de tierra comprimida con agregados de residuos de construcción y demolición como sustitución de los agregados tradicionales en la ciudad de Saraguro, Loja, Ecuador. Esta investigación consideró varias dosificaciones de: suelo (25%, 35%, 45% y 50 %), RCD (45%, 50%, 60% y 70%) y cemento (5%), que fueron comparados con BTC tradicionales en las mismas dosificaciones. Cuyos resultados indicaron que en el caso del

ensayo a la compresión (ASTM C34 exige 3.24 MPa), los BTC con RCD al 45%, 50%, 60% y 70%, obtuvieron una media de 7.91MPa, 8.12MPa, 5.95MPa y 8.03 MPa respectivamente, superando esta última la exigencia de la norma ASTM c34 (resistencia mínima 3.24MPa) hasta en el 250%. Asimismo, estos resultados superaron los 6 MPa de resistencia señalados en la NTC 5324. Por lo tanto, el comportamiento de los BTC con RCD ante las exigencias físicas y mecánicas de la NTC 5324 superan a lo mostrado por los BTC con arena [13].

En el Perú también existen investigaciones de este tipo, como la realizada por Luque Mamani en Juliaca - Puno, quien evaluó las propiedades físico-mecánicas del adobe con y sin incorporación de agregados reciclados (RCD). Observando que a compresión los adobes sin agregado reciclado mostraron una resistencia de 23.36 Kg/cm², mientras que los adobes elaborados con agregado reciclado en porcentaje de 80%, 90% y 100% tuvieron una resistencia de 19.72, 18.73 y 17.86 Kg/cm² respectivamente, cumpliendo con la resistencia mínima señalada por la N.T.E. E 0.80 (12 Kg/cm²). Referente a la resistencia a la flexión de los adobes sin agregado reciclado indicaron una resistencia de 2.77 Kg/cm², mientras que, los adobes elaborados con agregado reciclado en porcentaje de 80%, 90% y 100% tuvieron una resistencia de 3.19, 3.32 y 3.32 Kg/cm² respectivamente, superando la resistencia a la flexión en comparación al adobe que no contenía material reciclado [14].

De igual forma, en una búsqueda local de investigaciones relacionadas con el tema de estudio, se encontró una investigación realizada en la ciudad de Cajamarca. En esta se determinó la resistencia a compresión y flexión de adobes compactados con reemplazo de suelo por cerámica triturada en los porcentajes de 5%, 10% y 15%, cuyos resultados mostraron que el adobe patrón presentó una resistencia a compresión de 45.35 kg/cm², mientras que los adobes con cerámica triturada tuvieron valores de: 43.96, 40.91 y 39.86 kg/cm², siendo el adobe patrón el que presentó una mejor resistencia. No obstante, en el ensayo de resistencia a la flexión, el adobe patrón mostró una resistencia de 28.55 kg/cm² y los adobes con reemplazo de suelo por cerámica triturada mostraron: 30.86, 28.17 y 26.55 kg/cm² respectivamente, teniendo una mayor resistencia a la flexión los adobes con 5% de reemplazo de suelo por cerámica triturada [15].

En base a lo antes mencionado, resulta importante presentar algunos conceptos clave que permitan comprender el tema investigado:

- El adobe tradicional es un bloque macizo de tierra sin cocer, cuya elaboración consiste en mezclar tierra, paja y agua hasta lograr una consistencia maleable, que será colocada en adoberas y luego desmoldada, para ser dejada secar de 30 a 60 días. Sin embargo, es un material que se ve afectado por factores climáticos, fuerzas sísmicas y el paso del tiempo [16].

- El adobe estabilizado, es aquel al que a su mezcla se le han incorporado otros materiales, con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas y estabilidad ante la presencia de humedad. Existen varios tipos de estabilizantes, entre estos

están las fibras vegetales; los productos sintéticos; productos puzolánicos, polímeros naturales; minerales y escorias de fundición [17].

- Los RCD, de acuerdo al D.S. N°002-2022-MVCS, son un tipo de residuos sólidos o semisólidos generados durante la construcción de obras civiles, habilitaciones urbanas y/o edificaciones, que requieren ser gestionados y controlados, priorizando su valorización y disposición final de acuerdo a sus características.

-El agregado reciclado de ladrillo de arcilla, procede de la trituración de escombros de demolición de diferentes estructuras que presentan unidades de albañilería de barro cocido. Al triturar materiales que ya han tenido un uso previo y que serán empleados nuevamente en otros materiales, puede producir diferentes modificaciones en sus propiedades y mecánicas [18].

Debido a lo explicado anteriormente, este artículo presenta una justificación social-ambiental, ya que, mientras mayor sea la implementación de conocimientos, leyes y normativas que aborden estrategias de sostenibilidad durante todo el ciclo de vida de un proyecto, muchas empresas constructoras o industriales reconocerán los beneficios de valorizar adecuadamente los RCD, puesto que no solo contribuirían a frenar la contaminación, sino también a ahorrar en costes de construcción al usar parte de los residuos reciclados en nuevos proyectos; ahorrar en energía al no eliminar materiales como el hormigón o el asfalto; ahorrar en medios de transporte al llevar menos residuos a vertederos y a vender materiales fabricados con productos reciclados [19]. Por tal motivo, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, aprueba el Reglamento de Gestión y Manejo de RCD, con el fin de establecer a las autoridades encargadas de supervisar y fiscalizar apropiadamente este tipo de residuos [18].

II. METODOLOGÍA

El procedimiento del estudio comenzó en la **primera fase**, la cual consistió en seleccionar las zonas de recolección de los residuos de ladrillo de arcilla, según la siguiente tabla:

TABLA 1.
LUGARES DE ACOPIO DE RCD EN CAJAMARCA, 2023.

NOMBRE DEL LUGAR	UBICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Centro poblado Bella Unión	kilómetro 4.5 de la carretera Cajamarca - Baños del Inca. Av. Alameda	Grandes extensiones de terrenos que sirven como botaderos de demoliciones informales.
Complejo Qhapac Nan	de los Incas s/n, Cajamarca 06002, Perú.	Presenta varios terrenos descampados que las personas usan como botaderos de desmonte.
Aeropuerto Mayor General FAP Armando Revoredo Iglesias	Av. Hoyos Rubio 1804, Cajamarca 06001, Perú.	Por su ampliación varios terrenos aledaños han sido abandonados y son utilizados como vertederos informales de RCD.

La **segunda fase** implicó seleccionar el lugar de donde se obtuvo el suelo para la elaboración de los adobes, teniendo

como opción principal la zona rural de Cajamarca, específicamente el centro poblado Shultin. Es así que, para conocer las características del suelo, se realizaron ensayos preliminares de campo, descritos en el libro de Tejada U. (2001) “Buena Tierra- Apuntes para el diseño y construcción con Adobe” y en la N.T.E. E. 080, estos podrán ser usados por expertos y auto constructores.

TABLA 2.

PRUEBAS PRELIMINARES DE CAMPO POR TEJADA U. (2001).

Prueba	Resultados
Prueba de brillo.	✓ Brillante: Suelos Arcillosos.
Prueba del color.	✓ Claros y brillantes: Suelo Inorgánicos.
Prueba dental.	✓ Rechinan ligeramente: Suelos Limosos.
Prueba olfativa.	✓ Olor no rancio: Suelo Inorgánico.

TABLA 3.

PRUEBAS PRELIMINARES DE CAMPO POR LA N.T.E. E. 080.

Prueba	Resultados
Prueba de la cinta de barro.	La cinta de suelo alcanzó entre 20 cm y 25 cm de longitud, por lo que el suelo es muy arcilloso.
Prueba de la presencia de arcilla o resistencia seca.	Las 4 bolitas secas de suelo, no se quebraron, rompieron ni agrietaron, por lo que la resistencia del suelo presenta buena resistencia al secar

Así mismo, para garantizar que el suelo escogido tenga las proporciones adecuadas de arena, limo y arcilla, se realizó un análisis de laboratorio en las instalaciones de la Universidad Privada del Norte sede Cajamarca, teniendo en cuenta la normatividad actual. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

TABLA 4.

ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CLASIFICACIÓN DEL SUELO DEL C.P. SHULTIN.

Ensayo realizado en laboratorio:	Normativa actual:
- Muestreo del Suelo del C.P. Shultin.	M.T.C. E. 101 - Muestreo de Suelos y Rocas, por el Manual de Ensayos de Materiales, 2016.
- Tiempo de duración: 1 hora.	N.T.P. 339.089:1998 - SUELOS.
- Método del Cuarteo de la Muestra.	Obtención en laboratorio de muestras representativas (cuarteo) - 2ª Edición, por INDECOPI, revisada el 2014.
- Contenido de Humedad del Suelo del C.P. Shultin.	N.T.P. 339.127:1998 - SUELOS. Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo - 1ª Edición, por INDECOPI, revisada el 2019.
- Tiempo de duración: 24 horas.	
- Gravedad o Peso específico relativo del Suelo del C.P. Shultin.	N.T.P. 339.131:1999- SUELOS. Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo - 1ª Edición por INDECOPI, revisada el 2019.
- Tiempo de duración: 2 horas.	
- Análisis Granulométrico por Sifonaje o por sedimentación del Suelo del C.P. Shultin.	ASTM D 421:1985 - Práctica estándar para preparación seca de muestras de suelo para el análisis del tamaño de partícula y determinación de constantes de suelo, por la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, preaprobada el 2002.
- Tiempo de duración: 48 horas.	
- Análisis Granulométrico por medio del Hidrómetro del Suelo del C.P. Shultin.	N.T.P. 339.128:1999 - SUELOS. Método de ensayo para el análisis granulométrico - 1ª Edición, por INDECOPI, revisada el 2014.

- Tiempo de duración: 5 días.

- Análisis Granulométrico por Lavado del Suelo del C.P. Shultin.

- Tiempo de duración: 48 horas.

- Límites de Atterberg del Suelo del C.P. Shultin.

- Tiempo de duración: 48 horas

- Clasificación del Suelo del C.P. Shultin por el Método SUCS.

NTP 400.018:2013 - AGREGADOS. Determinación de materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado 75µm (Nº200) por lavado en agregados. Método de ensayo - 4a Edición, revisada el 2018.
N.T.P. 400.012:2013 - AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino y grueso - Método de ensayo - 4a Edición, por INDECOPI, revisada el 2018.
NTP 339.129:1998 - SUELOS. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico, e índice de plasticidad de suelos - 1ª Edición, por INDECOPI, revisada el 2019.
N.T.P. 339.134:1999 - SUELOS. Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS) - 1ª Edición, por INDECOPI, revisada el 2019.

La tercera fase consistió en analizar la distribución de tamaños de partículas del material de cerro de la cantera Shultin, mediante el ensayo de Análisis Granulométrico por Tamizado en Seco, de acuerdo con la N.T.P. 400.012:2013, por INDECOPI, revisada el 2018.

La cuarta fase radicó en el traslado de los RCD recolectados hacia el lugar de trabajo, en donde se realizó el siguiente proceso para que estos puedan ser utilizados:

TABLA 5

TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE LADRILLO DE ARCILLA.

Materiales y herramientas:	Preparación:
-Residuo de ladrillo de arcilla.	-Se eliminaron las partículas extrañas (materia orgánica), lavando y secando la muestra durante 24 horas.
- Mallas de la N°4 a la N°200.	-Luego, se extendió y trituró cuidadosamente hasta darle un diámetro uniforme.
-Agua.	-Finalmente, la muestra triturada fue llevada al laboratorio de la U.P.N, para realizar el ensayo de análisis granulométrico mediante tamizado en seco.
-EPP.	
-Comba.	
-Material complementario: Cámara fotográfica y formato del ensayo	

La quinta fase consistió en la elaboración de todas las muestras de adobe con y sin incorporación de ladrillo de arcilla triturado. Para el diseño del adobe patrón o con 0% de residuos triturados de ladrillos de arcilla, se consideró la granulometría del suelo previamente analizado. Sin embargo, como no cumplía con los porcentajes granulométricos expuestos por el Manual de Construcción de edificaciones Antisísmicas de adobe, se consideró hacer una estabilización física de tipo granulométrica, incorporando material de cantera en una dosificación 5:2 (5 unidades de tierra por 2 de material de cantera).

Además, para el control de las fisuras y agrietamiento durante el secado del adobe, se realizó una estabilización física con fibras vegetales, adicionando paja de la zona donde se elaboraron los adobes, llamada Festuca Huamachucensis Infantes o más conocida como Walte [20].

TABLA 6.

TIPO DE PAJA INCORPORADA EN LA ELABORACIÓN DE ADOBES.

Especie	Nombre local	Hábito De Crecimiento	Parte usada	Forma de preparación y uso
Festuca huamachucensis Infantes	Walte	Hierba	Hojas	-Alimento para asnos y caballos. -Cobertura del techo de la choza.

Se consideró el siguiente proceso de elaboración:

TABLA 7.

ELABORACIÓN DE ADOBES TRADICIONALES SIN Y CON ADICIÓN DE RESIDUOS DE LADRILLOS DE ARCILLA

Materiales y herramientas:	Dimensiones:	Preparación:
-Material: Suelo. -Material de cantera. -Paja: Walte. -Triturado de RCD. -EPP. -Agua. -Palanas. -Adoberas. -Mezcladora de barro artesanal. -Material complementario: Cámara fotográfica.	-Se utilizaron adoberas de 15 cm de arista para el ensayo de compresión y de 30 cm x 15 cm x 10 cm para el ensayo de flexión	-Se hidrató y dejó reposar por 24 horas el suelo seleccionado. -Pasado este tiempo, se le incorporó material de cantera en una relación 5:2. (Para mezclar estos dos materiales, se utilizó una mezcladora de barro artesanal). -Luego, se agregó paja Walte, residuos triturados de ladrillos de arcilla y agua a las diferentes mezclas en los porcentajes respectivos. -Estos se mezclaron tradicionalmente, hasta obtener una mezcla maleable. -Seguidamente se colocó la mezcla en las adoberas, se desmoldó y se dejó secar por 30 días. -Finalmente, los adobes se trasladaron al laboratorio de suelos de la U.P.N., donde se les realizaron los ensayos respectivos.

No obstante, para determinar las propiedades de las diferentes mezclas de adobe tradicional, que incluían un 0%, 5%, 10% y 15% de residuos de ladrillos de arcilla triturados, fue necesario llevar una cantidad apropiada de cada una de estas mezclas al laboratorio de Suelos de la U.P.N., para así poder realizar los siguientes ensayos:

TABLA 8.

ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE ADOBE.

Ensayo realizado en laboratorio:	Normativa actual:
Contenido de Humedad de las Mezclas de los Adobes Tradicionales sin y con RCD.	N.T.P. 339.127:1998 - SUELOS. Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo - 1ª Edición, por INDECOPI, revisada el 2019.
Análisis Granulométrico Mediante Tamizado en Seco de las Mezclas de los Adobes Tradicionales sin y con RCD.	N.T.P. 400.012:2013 - AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino y grueso - Método de ensayo - 4a Edición, por INDECOPI, revisada el 2018.

Límites de Atterberg de las Mezclas de los Adobes Tradicionales sin y con RCD.	NTP 339.129:1998 - SUELOS. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos - 1ª Edición, por INDECOPI, revisada el 2019.
Clasificación de las Mezclas de los Adobes Tradicionales sin y con RCD por el Método SUCS.	N.T.P. 339.134:1999 - SUELOS. Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS) - 1ª Edición, por INDECOPI, revisada el 2019.

La sexta fase implicó conocer las propiedades mecánicas de las muestras de adobes secas, para esto fueron realizados los siguientes ensayos en el laboratorio de la Universidad Privada del Norte sede Cajamarca, teniendo en cuenta sus guías y protocolos, junto con la normatividad actual:

TABLA 9.

ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LAS MUESTRAS DE ADOBE.

Ensayo realizado en laboratorio:	Normativa actual:
- Ensayo de Variación Dimensional de las Muestras de Adobes. - Tiempo de duración: 5 minutos aproximadamente por adobe ensayado.	N.T.P. 399.613:2005 - UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Métodos de muestreo y ensayo de ladrillos de arcilla usados en ensayo de ladrillos de arcilla usados en albañilería, por INDECOPI, revisada el 2017.
- Ensayo de la Resistencia a la Compresión de las Muestras de Adobes. - Tiempo de duración: 5 minutos aproximadamente por adobe ensayado.	N.T.P. 399.613:2005 - UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Métodos de muestreo y ensayo de ladrillos de arcilla usados en ensayo de ladrillos de arcilla usados en albañilería, por INDECOPI, revisada el 2017.
- Ensayo de Tracción por Flexión de las Muestras de Adobes. - Tiempo de duración: 5 minutos aproximadamente por adobe ensayado.	N.T.E. E.080, por SENCICO, 2020.
- Ensayo de Absorción de las Muestras de Adobes. - Tiempo de duración: 24 horas aproximadamente por adobe ensayado.	N.T.P. 339.078:2012 - CONCRETO. Determinación de la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios de la distancia entre apoyos. Método de ensayo. 4º, por INDECOPI, revisada el 2017.
	la N.T.P. 399.613 - UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Métodos de muestreo y ensayo de ladrillos de arcilla usados en ensayo de ladrillos de arcilla usados en albañilería, por INDECOPI, revisada el 2017.

La séptima fase analizó, comprendió e interpretó los resultados obtenidos. Para esto se empleó métodos estadísticos, en donde se usaron gráficos y tablas elaboradas en hojas de cálculo del software Microsoft Excel.

Finalmente, la octava fase consistió en discutir los resultados y establecer conclusiones, que permitirán dar nuevos aportes para el desarrollo de futuras investigaciones relacionadas con la elaboración del adobe tradicional como material ecosostenible en proyectos de construcción.

III.

IV. RESULTADOS

A continuación, se presenta los principales resultados obtenidos en la investigación:

- Propiedades físicas y clasificación del suelo seleccionado:

TABLA 10.
DATOS DEL SUELO DEL C.P. SHULTIN.

ENSAYO	RESULTADO
- Contenido de Humedad.	25.53 %
- Peso Específico.	2.35 gr/cm ³
- Análisis Granulométrico mediante Tamizado por Lavado.	Menos del 50% del material fue retenido en la malla N°200.
- Límites de Consistencia o Límites de Atterberg.	L.L. = 36.76 % L.P. = 24.45 % I.P. = 12.31 %

Nota. El suelo fue clasificado como Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad (CL).

TABLA 11.

TABLA COMPARATIVA DEL % DE PARTÍCULAS DEL SUELO DEL C.P. SHULTIN VS. EL MATERIAL REQUERIDO POR EL MANUAL DE CONSTRUCCIÓN: EDIFICACIONES ANTISÍSMICAS DE ADOBE.

Nombre de la partícula	Tamiz	Abertura (mm)	MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DEL C.P. - 2010	SUELO SHULTIN		
Arena	Gruesa	N° 4	55-70%	9.60%		
		N° 8			2.20%	
	Media	N°10			2.00	
		N°20			0.84	
		N°30			0.56	
		N°40			0.425	
		N°60			0.25	
		N°100			0.15	32.40%
	Fina	N°200			0.075	32.40%
	Limo	Cazoleta			15-25%	39.90%
Arcillas		10-20 %	15.90%			

Nota. Los porcentajes de arena y limo del suelo no cumplen con lo requerido en el Manual de Construcción de Edificaciones Antisísmicas de Adobe.

- Propiedades físicas del material de cantera:

TABLA 12.
RESUMEN DEL ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO EN SECO DEL MATERIAL DE CANTERA

Nombre de la partícula	Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
ARENA GRUESA	N° 4	4.76	96.23
ARENA MEDIA	N°10	2.00	81.44
	N°20	0.84	58.84
	N°30	0.56	42.64
	N°40	0.42	32.36
	N°60	0.25	13.30
	N°100	0.15	2.80
ARENA FINA	N°200	0.07	0.28

- Propiedades físicas del residuo de ladrillo de arcilla triturado (RCD):

TABLE 13.
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MEDIANTE TAMIZADO EN SECO DE LAS MEZCLAS DE ADOBE.

Nombre de la partícula	Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
ARENA GRUESA	N° 4	4.76	88.00
ARENA MEDIA	N°10	2.00	52.40
	N°20	0.84	35.30
	N°30	0.56	28.90
	N°40	0.42	20.10
	N°60	0.25	9.40
	N°100	0.15	6.10
ARENA FINA	N°200	0.07	2.70

- Propiedades físicas del adobe tradicional con adición del 0%, 5%, 10% y 15% de RCD:

-Curvas Granulométricas de las Mezclas de Adobes:

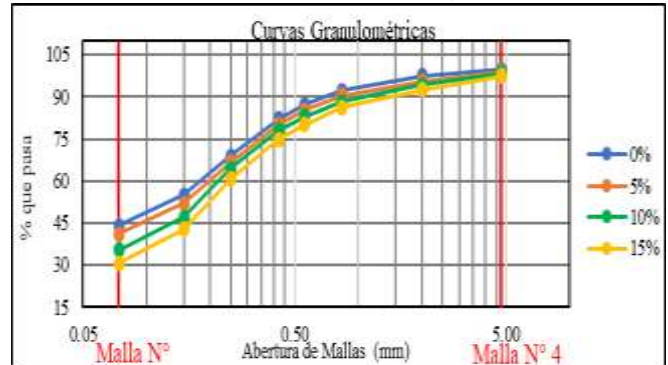


Fig. 1 Curvas Granulométricas mediante tamizado en seco de las mezclas.

-Límites de Atterberg de las Mezclas para el Adobe

TABLE 14.
LÍMITES DE ATTERBERG Y CLASIFICACIÓN MÉTODO SUCS DE LAS MEZCLAS DE LOS ADOBES.

MEZCLAS	LÍMITE LÍQUIDO (L.L.)	LÍMITE PLÁSTICO (L.P.)	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (I.P.)	CLASIFICACIÓN SUCS
0% RCD	32.97%	25.13%	7.84%	El material se considera ML que significa: Limos inorgánicos y arenas muy finas con ligera plasticidad.
5% RCD	32.89%	25.25%	7.64%	
10% RCD	32.49%	26.18%	6.31%	
15% RCD	33.40%	29.39%	4.00%	

Nota. El porcentaje de límite plástico (L.P.) aumentó conforme se fue agregando el residuo triturado.

-Contenido de Humedad de las Diferentes Mezclas de Adobe.

TABLE 15.
RESUMEN DEL ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD.

DESCRIPCIÓN DEL SUELO	MEZCLA 0% RCD	MEZCLA 5% RCD	MEZCLA 10% RCD	MEZCLA 15% RCD
% Promedio de Humedad	25.53	32.2	32.5	32.6

TABLA 16.
PORCENTAJE DE AGUA AÑADIDA DE ACUERDO AL TIPO DE MEZCLA

DESCRIPCIÓN	MEZCLA CON 0% RCD	MEZCLA CON 5% RCD	MEZCLA CON 10% RCD	MEZCLA CON 15% RCD
% de agua	6.67	6.97	7.07	7.00

- Propiedades mecánicas del adobe tradicional con adición del 0%, 5%, 10% y 15% de RCD:

-Resistencia a la Compresión del Adobe Tradicional:

TABLA 17.
TABLA COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

% de RCD:	0%RCD	5%RCD	10%RCD	15%RCD
fb promedio (kg/cm²):	20.95	22.18	22.54	23.23

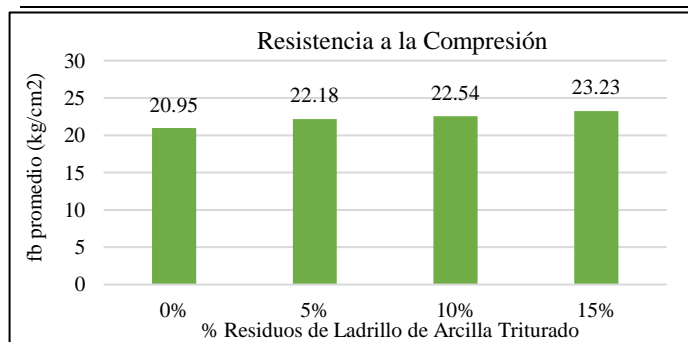


Fig. 2 Gráfica comparativa de los resultados del ensayo de resistencia a la compresión.

Las 32 muestras de adobe analizadas (8 muestras por porcentaje de residuo añadido), superan el estándar mínimo de la norma N.T.E. E. 080 (10 kg/cm²). Además, el esfuerzo promedio último aumentó progresivamente al incrementar el porcentaje de residuos de ladrillos de arcilla triturado (RCD) en las mezclas.

-Resistencia a la Tracción por Flexión del Adobe Tradicional:

TABLA 18.
TABLA COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN POR FLEXIÓN.

% de RCD:	0%RCD	5%RCD	10%RCD	15%RCD
Fb promedio (kg/cm²):	5.71	6.88	8.05	7.52

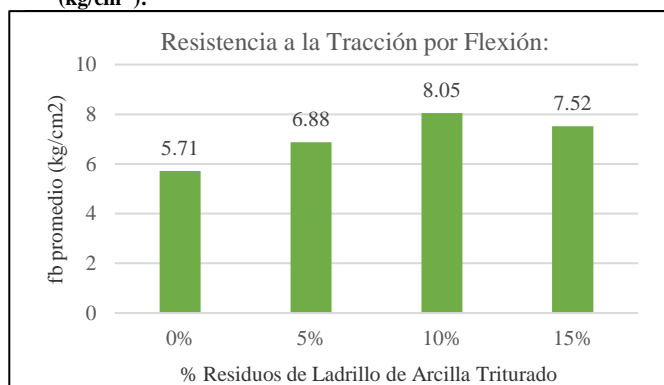


Fig. 3 Gráfica comparativa de los resultados del ensayo de resistencia a la tracción por flexión.

Las 24 muestras de adobe analizadas (6 muestras por porcentaje de residuo añadido), mostraron que la incorporación del 5%, 10% y 15% de residuos triturados de ladrillos de arcilla (RCD) en las mezclas, superaron la resistencia a la tracción por flexión que presenta el adobe patrón (0% de RCD).

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Discusión de resultados:

Se llevaron a cabo diferentes ensayos para determinar las propiedades físicas del suelo seleccionado para la elaboración de los adobes. Sin embargo, los porcentajes de partículas de arena y limo no cumplieron con los requerimientos del Manual de Construcción de Edificaciones Antisísmicas de Adobe. Para solucionar este problema, fue necesario incorporar materiales que tuvieran una mayor proporción de partículas de arena de tamaño medio y grueso. Para ello, se seleccionó y analizó la distribución granulométrica del material proveniente de la cantera Shultin (mayor porcentaje de arena media) y de los residuos de ladrillos de arcilla triturado o RCD (mayor porcentaje de arena gruesa y media). Considerando estos hallazgos se pudo hacer un diseño de mezcla para cada tipo de adobe ensayado. De igual manera, si analizamos la investigación realizada por Luque (2022) [31], incorporó el RCD en porcentajes altos como son 80%, 90% y 100%. Sin embargo, se obtuvieron resultados no muy alentadores tanto en resistencia a compresión como en flexión. Por ello, en esta investigación se decidió realizar la incorporación de RCD en porcentajes menores tales como 5%, 10% y 15%, tratando de mantener siempre los márgenes granulométricos establecidos por el Manual de Construcción de Edificaciones Antisísmicas de Adobe.

Además, se realizaron ensayos para determinar las propiedades físicas de las mezclas de adobes tradicionales con adición de 0%, 5%, 10% y 15% de residuos de ladrillos de arcilla triturados. Los hallazgos demostraron que, al aumentar el porcentaje de residuos de ladrillos de arcilla, los porcentajes de arena fina y arena media de la mezcla patrón disminuyeron, al igual que su índice de plasticidad. Sin embargo, todos los diferentes tipos de muestras de mezclas se clasificaron como ML, lo que significa limos inorgánicos y arenas muy finas con ligera plasticidad. Con respecto a las variaciones en los porcentajes de agua agregados, se pudo observar que, al añadir RCD, se necesita un porcentaje de agua mayor. Sin embargo, estas variaciones fueron mínimas.

Del mismo modo, se realizó el ensayo de compresión a las diferentes muestras de adobe tradicional obteniendo una resistencia (fb promedio) de 20.95 kg/cm², 22.18 kg/cm², 22.54 kg/cm² y de 23.23 kg/cm², conforme se iban aumentando los porcentajes de residuos de ladrillo de arcilla triturados, la velocidad de ensayo promedio para los adobes tradicionales sin RCD fue de 4581.6 kg/min y para los que contienen 15% de RCD fue 2306.5 kg/min. Estos descubrimientos demuestran que la inclusión de RCD en la

elaboración de los adobes tradicionales han contribuido positivamente a mejorar su resistencia a esfuerzos de compresión. De la misma manera, todos estos resultados cumplen con la resistencia mínima exigida por la N.T.E. E. 080, la cual es 10.20 Kg/cm² en el esfuerzo a compresión. Es así como, al comparar los resultados obtenidos con los alcanzados por Luque (2022) [31], observamos que presentan valores similares a los nuestros, no obstante, estos valores son menores con respecto a la resistencia de su muestra patrón (23.26 Kg/cm²) y van disminuyendo conforme aumenta el porcentaje de RCD incorporado. Asimismo, comparando nuestros resultados con los de Antinori (2018) [32], también se observa que sus resultados presentan valores menores con respecto a la resistencia de la muestra patrón (45.35 Kg/cm²), sin embargo, ha alcanzado valores mayores a 40 kg/cm², esto se debe a la influencia que tiene la compactación en la elaboración del adobe. De igual modo, en el estudio realizado por Mejía (2018) [30], sus adobes presentan una resistencia a la compresión de 8.03 MPa, 5.95 MPa, 8.12 MPa y 7.91 MPa respectivamente, lo que indica que es posible el uso de material reciclado de las demoliciones de construcción para aumentar la resistencia de los adobes tanto del bloque de adobe compactado como del adobe tradicional.

Ahora bien, también se determinó la resistencia a la tracción por flexión del adobe tradicional con incorporación de 0%, 5%, 10% y 15% de ladrillo de arcilla triturado. En donde, las muestras presentaron una resistencia 5.71 kg/cm², 6.88 kg/cm²; 8.05 kg/cm² y 7.52 kg/cm² respectivamente. Observando un incremento favorable en relación con la resistencia del adobe patrón, lo que demuestra que el RCD puede aumentar la resistencia a la tracción por flexión de los bloques de adobe. Sin embargo, comparando estos resultados con la investigación realizada por Luque (2022) [31], obtuvo un pequeño incremento de resistencia en relación a la de su adobe patrón (2.77 kg/cm²), ya que conforme le fue añadiendo mayor porcentaje de RCD, sus esfuerzos últimos no superan los 3.32kg/cm². En cambio, en el estudio elaborado por Antinori (2018) [32], mostró resistencias a la flexión de 28.55 kg/cm² para el adobe patrón y para los adobes con reemplazo del 5%, 10% y 15% de cerámica triturada logró resistencias de 30.86 kg/cm², 28.17 kg/cm² y 26.55 kg/cm² respectivamente, mostrando resultados muy positivos y que no se comparan con los resultados de adobe tradicional con y sin RCD del presente estudio.

Finalmente, se observó que los adobes tradicionales que presentan mejores resultados en la resistencia a las fuerzas de compresión fueron los adobes con incorporación del 15% de RCD (23.23 kg/cm²), pues en relación con la resistencia a la compresión del adobe patrón (20.95 kg/cm²), se mostraron un 11% más resistentes. Sin embargo, en su resistencia a la tracción por flexión (7.52 Kg/cm²), se mostraron un 32% más resistentes en comparación con los adobes patrón (5.71 Kg/cm²). Este último porcentaje, fue superado por la resistencia a la flexión que presentaron los adobes con incorporación del 10% de RCD (8.05 Kg/cm²), pues en relación con la resistencia del adobe patrón (5.71 Kg/cm²) se mostraron un 41% más resistentes a este esfuerzo; no obstante, esto cambia en su resistencia a las fuerzas de compresión (22.54 Kg/cm²), ya que tan solo alcanzó un 8% más de resistencia en comparación con los adobes patrón

(20.95 kg/cm²). Lo que, al igual que en el estudio realizado por Antinori (2018) [32], se observa que la resistencia a la flexión baja cuando se utiliza el residuo de cerámica triturada en los bloques de adobe compactados, puesto que su adobe patrón obtuvo una resistencia a la flexión de 28.55 kg/cm² y con 15% de residuo de cerámica triturada obtuvo un 26.55 kg/cm². Aunque la disminución del esfuerzo es mínima se podría decir que no siempre se puede obtener un resultado favorable, esto puede variar debido al método de compactación del adobe utilizado o también a las propiedades físicas de los materiales utilizados.

Conclusiones:

La adición de residuos de ladrillos de arcilla triturados observó un incremento de más del 10% en la resistencia a la flexión del adobe tradicional con incorporación del 5%, 10% y 15% de este tipo de residuo (20,49%, 40,98% y 31,70%, respectivamente). Por el contrario, la resistencia a la compresión fue menos significativa (5,87%, 7,59% y 10,88%, proporcionalmente a la adición del residuo de ladrillo triturado en cada tipo de adobe tradicional elaborado).

Se determinó la resistencia a compresión y flexión del adobe tradicional, reutilizando residuos triturados de ladrillos de arcilla provenientes de la demolición de obras en Cajamarca. De la misma manera, se determinó las propiedades físicas del suelo del C.P. Shultin, del material de la cantera Shultin y del residuo de ladrillo de arcilla triturado, mediante diferentes ensayos, los cuales indican que el suelo presenta una clasificación SUCS de tipo CL, que corresponde a arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, la cual no cumple con la granulometría recomendada por el Manual de Construcción de Edificaciones Antisísmicas de Adobe. El material proveniente de la cantera Shultin, en su mayoría está conformado por arena media (38.80%) y fina (42.36%). El residuo de ladrillo de arcilla triturado en su mayoría está conformado por arena gruesa (47.60%) y media (23,50%).

Se determinó las propiedades físicas de las mezclas de adobes tradicionales con la adición del 0%, 5%, 10% y 15% de residuos de ladrillos de arcilla triturados. Los resultados revelaron que, a medida que se incrementaba la dosificación de este tipo de residuo, los porcentajes de arena fina y media disminuían, junto con el índice de plasticidad. Clasificando a todas las mezclas según SUCS como ML, lo que indica la presencia de limos inorgánicos y arenas muy finas con una ligera plasticidad. Estos resultados cumplen con lo establecido en el Manual de Construcción de Edificaciones Antisísmicas de Adobe. Además, se observó que la adición de este tipo de residuo requería un mayor contenido de agua para mantener la plasticidad adecuada, aunque estas variaciones en los niveles de humedad de las mezclas fueron mínimas.

Se determinó la resistencia a compresión del adobe tradicional con incorporación del 5%, 10% y 15% de residuos triturados de ladrillos de arcilla, revelando un aumento de la resistencia a compresión del 6%, 8% y 11%, respectivamente, en comparación con los adobes patrón (20.95 Kg/cm²). Además, al comparar la durabilidad de resistencia de los adobes tradicionales con y sin incorporación de residuos

tritRADOS de ladrillos de arcilla en el ensayo de Compresión, se encontró que cada uno de los adobes tradicionales con residuos triturados de ladrillos de arcilla tienen una mayor durabilidad y resistencia, con un tiempo máximo de duración de ensayo de 5 minutos por adobe, no obstante, el adobe patrón no llegó a alcanzar este tiempo en el ensayo. Esto se debe a que los residuos aportan mayor cohesión y rigidez a la mezcla de tierra y arcilla.

Se determinó la resistencia a la tracción por flexión de los adobes tradicionales con la incorporación del 5%, 10% y 15% de residuos de ladrillos de arcilla triturados a sus mezclas, sin embargo, la resistencia a la tracción por flexión de cada tipo de adobe tradicional aumentó en un 21%, 41% y 32%, respectivamente, en comparación con la resistencia a la tracción por flexión de los adobes patrón (5.71 Kg/cm²).

Se determinó que las mezclas de adobe tradicional que incluyen un 15% de residuos de ladrillos de arcilla triturado, muestran mejores resultados en cuanto a resistencia a la compresión. Sin embargo, en lo que respecta a la resistencia a la tracción por flexión, las muestras de adobe tradicional con un 10% de residuos de ladrillos de arcilla triturado son las óptimas.

Pese a que el trabajo presenta la idea de elaborar adobes tradicionales reutilizando residuos de ladrillo de arcilla provenientes de la demolición de obras de la localidad de Cajamarca, recomendamos que para obtener datos más precisos se realicen un mayor número de especímenes para que estadísticamente el presente estudio sea más confiable.

Finalmente, se puede decir que al comparar el precio del adobe tradicional sin o con incorporación del RCD (6.25 soles aproximadamente) frente al costo de una pieza de ladrillo de arcilla para muros es de 4 a 5 veces más elevado. No obstante, aunque el adobe puede requerir una inversión inicial ligeramente mayor en términos de cantidad y calidad de materiales a utilizar para su fabricación, su verdadero valor radica en sus beneficios a largo plazo como son el aislamiento térmico, su fácil reparación y mantenimiento.

REFERENCIAS

[1] Suárez S. S., Betancourt Q. C., Molina B. J., y Mahecha V. L. (2019). La gestión de los residuos de construcción y demolición en Villavicencio: estado actual, barreras e instrumentos de gestión. *ENTRAMADO*, 15(1), 224-244. [en línea]. De <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.5408>

[2] Interempresas. (2022). RCD: del reciclaje en productos de menor calidad al reciclaje de circuito cerrado y circuito abierto. [en línea]. De <https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/389438-RCD-reciclaje-productos-menor-calidad-reciclaje-circuito-cerrado-circuito-abierto.html>

[3] Rockwool. (2022). ODS12: El sector de la construcción y el reciclaje de Rockwool. [en línea]. De <https://www.corresponsables.com/actualidad/ods12-sector-construccion-reciclaje-rockwool>

[4] Rodríguez, C. (2022). La construcción en Estados Unidos aún no es Sostenible. *DirigentesDIGITAL.COM*. [en línea]. De: <https://dirigentesdigital.com/economia/internacional/eeuu/la-construccion-en-estados-unidos-aun-no-es-sostenible>

[5] Estrada, N. (2022). Presentan iniciativas para el manejo integral de residuos de construcción y demolición. *Enfoque Noticias*. [En línea]. De: <https://enfoquenoticias.com.mx/presentan-iniciativas-para-el-manejo-integral-de-residuos-de-construccion-y-demolicion/>

[6] SINIA. (2000). Ley General de Residuos Sólidos. [En línea]. De: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-general-residuos-solidos>

[7] Neyra M. A. (2022). Análisis de la incorporación de la economía circular en la legislación sobre residuos sólidos de construcción y demolición en el Perú. (Tesis de Licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Perú. [En línea]. De: <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/185421>

[8] Baraya, S. (2022). Adobe: el material reciclable más sostenible. *ArchDaily* Perú. [En línea]. De: <https://www.archdaily.pe/pe/944575/adobe-el-material-reciclable-mas-sostenible>

[9] INEI. (s.f.). Hogares en viviendas particulares, según material predominante en los pisos y área de residencia. [En línea]. De: <https://m.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/housing/>

[10] González P. N., Del Río M. M. y Del Solar S. P. (2013). Alternativas para la optimización del ratio de reciclaje de los residuos de construcción en edificación: el enfoque de los sellos de certificación en sostenibilidad. *Universidad de Sevilla*. 1, 85-95. [En línea]. De: <http://hdl.handle.net/11441/38968>

[11] Pineda E. D. y Bastidas, C. A. (2020). Mezcla de componentes orgánicos y tierra para acabados finales de vis. *Universidad La Gran Colombia*. [En línea]. De: <http://hdl.handle.net/11396/5898>

[12] Rotondaro R., Mandrini M. R., Tomasi J., Bellmann L. y Ghezan N. (2019). Biorquitectura diseño y construcción con tierra. *Estructuras*. 1(2). [En línea]. De: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/estructuras/issue/view/1897>

[13] Mejía P. P. (2018). Bloques de tierra comprimida con agregados de residuos de construcción y demolición como sustitución de los agregados tradicionales en la ciudad de Saraguro, Loja, Ecuador (Tesis de Maestría). *Universidad de Cuenca*. Cuenca, Ecuador. [En línea]. De: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/29382>

[14] Luque M. H. (2022). Análisis de las propiedades físico-mecánicas del adobe con incorporación de agregados reciclados en la ciudad de Juliaca, Puno 2022. (Tesis de Licenciatura). *Universidad César Vallejo*. Lima, Perú. [En línea]. De: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/88774>

[15] Antinori, L. R. (2018). Resistencia a compresión y flexión del adobe compactado con reemplazo de cerámica triturada (Tesis de licenciatura). *Universidad Privada del Norte*. Cajamarca, Perú. [En línea]. De: <http://hdl.handle.net/11537/14068>

[16] Arroyo M. R.; Sánchez T, S. y Catalán Q. P. (2013). Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México. *Ingeniería*, 17(3), 167-177. [En línea]. De: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46730914001.pdf>

[17] Guzmán, S. y Iñiguez, M. (2016). Metodología para elección de estabilizantes químicos para bloques de tierra. *Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 5(9), 173-186. [En línea]. De: <https://doi.org/10.18537/est.v005.n009.12>

[18] Muñoz P. S., Mimbela O. F. y Rodríguez L. E. (2021). Uso de ladrillos triturados en concreto: una revisión literaria. *Revista Politécnica*, 17(34), 82-100. [En línea]. De: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v17n34a6>

[19] Emais BPO Services Provider. (2022). La importancia del reciclaje de residuos en la construcción. [En línea]. De: <https://www.emais.es/blog/obras/reciclaje-de-residuos-en-la-construccion/>

[20] Díaz C. E. (2023). Conocimiento etnobotánico de los Caseríos la Travesía, la Ramada y Chapolán, distrito y provincia de Contumazá, Cajamarca. (Tesis de licenciatura). *Universidad Nacional De Cajamarca*. Cajamarca, Perú. [En línea]. De: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/59>