



UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Mejora de las propiedades mecánicas de los bloques de tierra comprimida (BTC) reforzados con cemento y fibra natural

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para optar el grado de bachiller en Ingeniería Civil

AUTOR(ES)

Cabrera Vargas, Marlo Manuel (0000-0002-7655-4654)

Tello Ormeño, Jose Daniel (0000-0003-4377-6063)

ASESOR

Eyzaguirre Acosta, Carlos Augusto (0000-0001-9769-2135)

Lima, 11 de enero del 2021

DEDICATORIA

A Dios y a nuestros padres por habernos dado la vida y la fuerza necesaria para cumplir con nuestros objetivos. Por brindarnos su amor y comprensión incondicional en los momentos más difíciles, asumiendo el rol de soporte.

AGRADECIMIENTOS

A los docentes de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, quienes nos apoyaron desde el inicio del curso compartiendo sus experiencias y conocimientos.

Al Ingeniero Carlos Augusto Eyzaguirre Acosta por su orientación, por su gran compromiso y entrega por medio de observaciones, experiencias y apoyo en la elaboración del trabajo de investigación.

Al Ingeniero Omar Huamaní Salazar por brindarnos su laboratorio y apoyarnos en el desarrollo de los ensayos mecánicos y físicos planteados en la investigación.

RESUMEN

Existe en la actualidad una intensa búsqueda constante de recursos y tecnologías menos contaminantes, que consumen menos energía en la construcción. El bloque de tierra comprimida (BTC) reforzado con fibra natural puede ser una alternativa efectiva. Este estudio presenta los resultados de una investigación para establecer las propiedades mecánicas del BTC estabilizado con cemento y reforzado con fibra de bagazo de caña. Se consideró evaluar las siguientes combinaciones BTC, BTCE (6% de cemento), BTCB-I (4% de cemento y 0.5% de fibra) y BTC-II (4% de cemento y 1% de fibra). Además, los resultados de las pruebas mecánicas se compararon con normas establecidas y con otras investigaciones relacionadas al tema.

Se observó que, con el aumento de cemento, la resistencia de los bloques de tierra comienza a incrementarse gradualmente. Sin embargo, se puede reducir la cantidad de cemento reemplazándola con un mínimo de 0.5% de fibra natural en estado seco, representando bajas pérdidas de resistencia. De la investigación se sugieren analizar coeficientes de diseño a diferentes condiciones, considerando que con un mínimo de 4% de cemento y un 0.5-1% de fibra fue suficiente para producir BTC que cumplan con los requisitos estipulados en la norma peruana.

Palabras clave: bloques de tierra comprimida; evaluación mecánica; estabilización; cemento.

Improvement of the mechanical properties of compressed earth blocks (CEB) reinforced with cement and natural fibre

ABSTRACT

There is currently an intense constant search for less polluting resources and technologies, which consume less energy in construction. Natural fiber reinforced compressed earth block (BTC) can be an effective alternative. This study presents the results of an investigation to establish the mechanical properties of BTC stabilized with cement and reinforced with cane bagasse fiber. It was considered to evaluate the following combinations BTC, BTCE (6% cement), BTC-I (4% cement and 0.5% fiber) and BTC-II (4% cement and 1% fiber). In addition, the results of the mechanical tests were compared with established norms and with other research related to the subject.

It was observed that, with the increase of cement, the strength of the earth blocks begins to increase gradually. But nevertheless, the amount of cement can be reduced by replacing it with a minimum of 0.5% natural fiber in the dry state, representing low resistance losses. From the reach it is suggested to analyze design coefficients at different conditions, considering that a minimum of 4% cement and 0.5-1% fiber was enough to produce BTC that comply with the provisions of the Peruvian standard.

Keywords: compressed earth blocks; mechanical evaluation; stabilization; cement.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	8
2	MATERIALES Y METODOLOGÍA	11
2.1	MATERIALES	11
2.1.1	Suelo	11
2.1.2	Bagazo de caña de azúcar	12
2.1.3	Cemento	14
2.2	METODOLOGÍA	14
2.2.1	Preparación de las muestras	14
2.2.2	Ensayo de resistencia a la compresión	15
2.2.3	Ensayo de resistencia a la flexión	16
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
3.1	RESULTADOS	18
3.1.1	Resistencia a la compresión	18
3.1.2	Resistencia a la flexión	20
3.2.1	Validación de resultados de los ensayos de compresión de unidades	22
3.2.2	Validación de resultados de los ensayos de flexión de unidades	23
4	CONCLUSIONES	24
4.1	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	24
4.2	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	25
4.3	ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO	25
5	REFERENCIAS	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades del suelo base	11
Tabla 2 Resultados de los ensayos físicos de la fibra	13
Tabla 3 Propiedades físicas de fibras reportadas en la literatura pasada.	13
Tabla 4 Composición química del cemento	14
Tabla 5 Dosificación de cada muestra	15
Tabla 6 Resultados de resistencia a la compresión según mezcla de BTC	18
Tabla 7 Módulos de ruptura máximo según muestra de BTC	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fibras cortadas del bagazo de caña de azúcar.....	13
Figura 2. Ensayo de resistencia a la compresión de BTC.	16
Figura 3. Ensayo de resistencia a la flexión de BTC.....	17
Figura 4. Resultados de resistencia a la compresión de la muestra patrón de BTC.	19
Figura 5. Resultados de resistencia a la compresión de muestras de BTC.....	19
Figura 6. Resistencia a la flexión del BTC.....	21
Figura 7. Resistencia a la flexión de BTCE, BTCB-I y BTCB-II.....	21
Figura 8. Resistencia a la compresión de BTC a los 28 días reportados por diferentes investigaciones.	22
Figura 9. Verificación de los resultados del ensayo a flexión en unidades con respecto a las normas NZS 4298 y HB 195.	23
Figura 10. Verificación de los resultados del ensayo a flexión en unidades con respecto a otras investigaciones.....	24

1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años las causas y consecuencias de los cambios climáticos se han convertido en foco de atención de manera global. En este escenario, la industria de la construcción tiene una deuda pendiente ya que es responsable de la emisión de gran cantidad de agentes contaminantes hacia el medio ambiente. En el contexto de Perú, se ha identificado que existe una débil fiscalización por parte del Estado en las actividades disposición de residuos sólidos. Solo en Lima se estimó según cifras de CAPECO que se producen cerca de 19 000 toneladas de residuos de los cuales el 70 % va a para al mar y a los ríos [1]. Del mismo modo la extracción y explotación de materiales se ha convertido en un negocio de riesgo potencial. Según la investigación realizada por Castañeda (2019) [2] donde se determinaron impactos socioambientales negativos como la emisión de ruidos, tala o alteración de la calidad del agua producto de la extracción ilegal de los cauces de ríos.

Por ello, existe un renovado interés en encontrar materiales de construcción alternativos que sean sostenibles de manera ambiental además de tener un correcto comportamiento mecánico. Esto ha permitido revalorizar materiales tradicionales en base de tierra como el tapial o el adobe, obteniendo avances significativos en su derivada actual conocida como bloques de tierra comprimida (BTC). El material aun no es común y su uso en la construcción se ha visto marginado al tener una modesta resistencia mecánica y poca durabilidad. Sin embargo, la incorporación de estabilizadores ha proporcionado un nuevo enfoque a las investigaciones para poder superar la poca durabilidad generada al entrar en contacto con el agua. Entre ellas, Islam et al. (2020) [3] estudió el efecto de estabilizar los bloques de tierra arenosa con cemento y cenizas volantes. En ello se determinó que el aumento de la cantidad de cemento aumenta gradualmente la resistencia de los bloques. Asimismo, se evaluó el desempeño de la adición de las cenizas volantes (FA) en el diseño de mezcla, hallando que la resistencia va incrementando hasta un punto límite y luego comienza a disminuir. Según el trabajo, se puede inferir que la inclusión de cemento del 7 al 8% y 15 a 20% de cenizas volantes (FA) proporciona una adecuada resistencia a la compresión en seco y suficiente durabilidad.

Del mismo modo, con el objetivo de producir un material de construcción de tierra alternativa que tenga una menor energía incorporada se ha involucrado el reciclaje de residuos de construcción que usualmente terminan en grandes vertederos. En ese sentido, Jayasinghe et al. (2015) [4] investigaron el efecto de incluir residuos de demolición de edificios en la mezcla de tierra comprimida estabilizada con cemento. Se analizaron tanto en su forma cúbica como

en paneles de pared en pruebas resistencia. Del programa experimental se obtiene que la combinación de los materiales en 1:5:5 de cemento, suelo y residuos tienen un desempeño que resulta satisfactorio en términos de soporte de carga y resistencia a la flexión, involucrando que puede ser aplicado para viviendas de uno o dos pisos.

En términos de resistencia y durabilidad, la adición de una mayor cantidad de cemento mejoraría el desempeño de los bloques de tierra, sin embargo, el costo de construcción aumentará. Este factor ha obligado a encontrar una alternativa para reducir la cantidad de cemento en la preparación de bloques de tierra. En este escenario se ha probado el uso de fibras naturales locales, especialmente en países en desarrollo. El resultado de su incorporación en el diseño de mezcla puede resultar beneficioso para la sociedad debido a que estos recursos se encuentran en abundancia, su consumo energético es bajo y su producción es de bajo costo. En la información disponible, diferentes estudios experimentales han indicado efectos positivos de la agregación de fibras vegetales como coco, paja de trigo, caña, bambú, palma y yute mejorando a bloques compuestos de tierra en su desempeño mecánico, durabilidad, reducción de la propagación de microgrietas y en la erosión.

Millogo. et al. (2014) [5] realizó su investigación ensayando bloques de suelo prensado, incorporando fibras de origen vegetal (*hibiscus cannabinus*). Estas fibras se adicionaron en diferentes proporciones (0, 0.2, 0.4 y 0.8 %). Para determinar la caracterización mecánica se realizaron ensayos de compresión y flexión para cada bloque. Los resultados indicaron que el bloque con 0.4% de fibra alcanzó una resistencia a compresión y a la flexión de 2.85 MPa y 0.98 MPa respectivamente, siendo superior a la muestra no reforzada y la muestra reforzada con 0.2% y 0.8% de fibra. Además, se realizaron pruebas de erosión y abrasión, mostrando que con la adición de 0.4% de fibra se tenía la menor erosión (4.3%) y la mínima abrasión (0.01 g/m²), a comparación de las demás muestras. Finalmente, se concluyó que la adición de fibras entre 0.4-0.6% a los bloques de tierra prensada exhiben mejores propiedades mecánicas y físicas.

Igualmente, Taallah, et al. (2014) [6] identificó que la adición de fibras de palmera datilera en los bloques de tierra comprimida estabilizados con cemento incrementa la resistencia a la compresión en seco y húmedo frente a los bloques no reforzados con fibra. Siendo la dosificación más óptima entre 0.05-0.15% de contenido de fibra y un 8 % de cemento. Pero los restantes estudios de absorción e hinchazón por inmersión en agua determinaron que al

incrementar el porcentaje de fibra las muestras desarrollaban un aumento mínimo de absorción de agua.

Thanushan. et al. (2019) [7] investigó el uso de fibras de coco sin tratar como refuerzo para los bloques de tierra con cemento. Se adicionaron las fibras de coco en fracciones en masa de 0%,0.2% (16.2 g), 0.4% (32.4 g) y 0.6% (48.6 g) a la mezcla de cemento y suelo. Se realizaron ensayos de caracterización física evaluando la durabilidad de los bloques a través de pruebas de congelamiento, descongelamiento e inmersión en agua. Los resultados del ensayo de inmersión demuestran que para los bloques sin fibra hay una reducción de la fuerza del 6.6% frente a los bloques reforzados que mostraron la menor reducción de resistencia del 4.8%, es decir un 30% menos que los bloques de tierra sin reforzamiento. Además, al evaluar los ciclos de congelación y descongelación en la resistencia a la compresión, concluyeron que a medida que aumentaba la fibra de coco el bloque tenía un mejor desempeño duradero, los resultados indicaron que los bloques reforzados disminuían un 19% a comparación de los bloques sin fibra que disminuían un 33% de resistencia. Estas mejoras son atribuibles por la fibra permitiendo la distribución de tensiones dentro del bloque.

Asimismo, Raj, Et al. (2017) [8] desarrollo un estudio para evaluar la viabilidad de utilizar fibras de coco en bloques de tierra apisonadas con 28 días de estabilización. Se realizaron pruebas de compresión no confinada y tracción. Para cada categoría, la producción se llevó a cabo con diferentes contenidos de fibra (0%,0.2%,0.4%,0.6%,0.8% y 1%) y de cemento (0%,2.5% y 5%).A medida que se incrementaba la fibra del 0.4% al 0.2% la resistencia a la compresión aumentaba en un 22.31% 49.28% y 12.13% para cemento de 0%,2.5% y 5% respectivamente. Finalmente, los autores recomiendan utilizar un contenido de cemento mayor al 2.5% en peso y un máximo de 0.8% de fibra para mejorar el comportamiento mecánico del bloque.

Por otra parte, Danso et al. (2015) [9] presenta los resultados del estudio del comportamiento mecánico y físico de los bloques de tierra comprimido estabilizados con fibras naturales de desechos agrícolas entre ellos fibra de caña de azúcar, aceite de palma y coco. Se prepararon bloques de 29x14x10 cm agregando entre 0%, 0.25%,0.5%,0.75% y 1% de fibras. La inclusión de fibras mejoró las propiedades mecánicas con un incremento de resistencia entre el 16% y el 57%. También, la aplicación de fibra redujo la tase de desgaste en un 20%-50% y la erosión de los bloques de suelo en un 44%-70% cuando las muestras se sometieron a pruebas de inmersión y de rociado de agua.

En consecuencia, el objetivo de esta investigación es estudiar el comportamiento mecánico de los bloques de tierra comprimidos estabilizados con cemento y adicionando fibras de bagazo de caña que crearan bloques más resistentes y sostenibles. Por ello, todos los beneficios en usar un recurso de desecho como las fibras de bagazo de caña en aplicación a la construcción van a ser una situación beneficiosa para las comunidades rurales. Al momento de reducir la cantidad de cemento al agregar fibras como refuerzo, no solo se eliminarán los daños ambientales, sino también mejoraran las propiedades mecánicas sobre los BTC ordinarios y resultaran ser un modelo más económicos. Con este fin, se realizó un sistema integral de experimentos, que implica el análisis de las propiedades más importantes de los materiales utilizados para la elaboración del bloque como el suelo y la fibra. Estudiamos también las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión y a la flexión) de los bloques de tierra comprimida (BTC).

2 MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 Materiales

2.1.1 Suelo

Las muestras se extrajeron del suelo local disponible en la ciudad de Huancayo, Junín (Perú) y se caracterizó mediante ensayos mediante las pruebas de contenido de humedad natural (ASTM D 2974) [10], gravedad específica (ASTM D 854) [11], límites de Atterberg (ASTM D 4318) [12] y la prueba de distribución del tamaño del grano (ASTM C 136) [13]. Las propiedades del suelo base se procesaron y se muestran en la tabla 1.

Tabla1

Propiedades del suelo base

Propiedades	Resultado
Contenido de humedad (%)	16
Gravedad específica (g/cm ³)	1.51
Límites de Atterberg	
Límite líquido (%)	34
Límite plástico (%)	21

Índice de plasticidad	12
Clasificación del suelo	
UCS	CL
Distribución del tamaño de grano	
Arena (%)	41
Finos (%)	59

Una vez obtenidas las propiedades, la muestra del suelo se secaron al aire libre y se rompieron los terrones más grandes. Después de ello la muestra se tamizó y se utilizó el suelo que pasaba el tamiz N°4. Como el índice de plasticidad es menor al 15% es recomendable la estabilización con suelo con cemento.

2.1.2 Bagazo de caña de azúcar

En el presente estudio se usaron fibras naturales no tratadas de bagazo de caña de azúcar como se muestra en la figura 1. Las fibras son provenientes de la ciudad de Lima, Perú y fueron seleccionadas ya que cubren una amplia gama de características y son materiales de desecho agrícola abundante en el país. La caña de azúcar es perteneciente de la familia Gramíneas y del género *Saccharum*, compuesto por una flor, hojas, raíces y un tallo [14]. El bagazo de caña de azúcar son residuos compuestos de fibras y otros sólidos solubles, que suelen emplearse para la autogeneración de electricidad y para la obtención de alcohol sulfúrico.

Para la investigación, se cortaron las fibras de bagazo de caña de azúcar en trozos de longitud de 80 mm, la longitud utilizada fue el resultado de la longitud óptima que produjo la mejor resistencia en el estudio de Danso et al. (2015) [9] y se determinó el peso específico y contenido de humedad del material, las cuales se midieron de acuerdo con los métodos por Ghavami et al. (1999) [15], en la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2*Resultados de los ensayos físicos de la fibra*

Descripción	Resultado	Unidad
Longitud de corte	80	mm
Rango de diámetro	0.75	mm
Peso específico	0.56	g/m ³
Contenido de humedad	9.7	%

Adicionalmente, en la tabla 3 se observan más propiedades físicas de la fibra de bagazo de caña de azúcar obtenidas de los estudios realizados por Ghavami et al. (1999) [15].

Tabla 3*Propiedades físicas de fibras reportadas en la literatura pasada.*

Descripción	Resultado	Unidad
Resistencia a la tracción	44	MPa
Módulo de elasticidad	0.9	GPa
Absorción de agua	186	%

**Figura 1.** Fibras cortadas del bagazo de caña de azúcar.

2.1.3 Cemento

El cemento utilizado para este estudio fue el Portland ordinario de la marca ANDINO de tipo 1. El cemento cumple con la Norma Técnica Peruana (NTP) 334.009 (2018) [16] y la Norma Técnica Americana ASTM C-150 (2007) [17]. El producto es obtenido de la molienda conjunta de Clinker y yeso y presenta un bajo contenido de álcalis. Vienen envasados en bolsas antihumedad en una presentación de 42.5 kg. La composición del cemento portland tipo 1 se describen en la tabla 4.

Tabla 4

Composición química del cemento

Compuesto	Porcentaje por peso
MgO	1.80
SO3	2.67
Pérdida al fuego	1.49
Residuo insoluble	0.72
C2S	17.86
C3S	54.88
C3A	7.01
C4AD	10.37

Nota. Elaboración propia

2.2 Metodología

2.2.1 Preparación de las muestras

El programa experimental implica la caracterización mecánica de los BTC tanto en su forma no estabilizada como estabilizada con cemento y fibra de bagazo de caña. Para cubrir la variedad de diseños que pueden existir, se analizaron BTC sin estabilizar, BTC con 6% de cemento (BTCE), BTC con 4% de cemento y 0.5 % de fibras de bagazo de caña (BTCB-I) y

BTC con 4% de cemento y 1% de fibras de bagazo de caña de azúcar (BTCB-II). Las proporciones en porcentaje se encuentran resumidas en la tabla 5.

Tabla 5

Dosificación de cada muestra

	Cemento (%)	Fibras de bagazo (%)
BTC	-	-
BTCE	6	-
BTCB-I	4	0.5
BTCB-II	4	1

Las proporciones se encuentran basadas en investigaciones pasadas que recomiendan usar cemento del 6 al 8% en peso de muestra de acuerdo a Islam et al (2020) [3] dependiendo de en qué dosis se adicione una fibra. Además, Bogas et al. (2018) [18] sugieren un mínimo de 4% de cemento asistido además por cal resultan ser resistentes al contacto con el agua, sin embargo, una fuerte reducción en la cantidad de cemento puede resultar en una caída abrupta de la resistencia a la compresión. Por ello, en las muestras que tienen 4% de cemento se evaluará el desempeño que cumplen las fibras de bagazo de caña en proporciones de 0.5 y 1% en términos de resistencia.

Una vez definidas las dosificaciones, se mezclaron todos los materiales en un trompo mezclador convencional. Una vez mezclado se llenó el molde de la prensa manual CINVA y se aplicó fuerza de compresión para fabricar bloques compactos de 15×30×7 y 15×30×8 cm. Una vez prensados los BTC se pesaron y se cubrieron con una película de plástico para ser sometidos a curado durante 28 días almacenados. Todas las muestras utilizadas en las pruebas de compresión y flexión fueron sometidas a una sola condición de curado a temperatura de laboratorio.

2.2.2 Ensayo de resistencia a la compresion

Los BTC fueron sometidos a las pruebas de resistencia a los 28 días de curados para evaluar los efectos de la estabilización con los diferentes componentes. Para analizar la resistencia a la compresión de los BTC se sometieron a los bloques a una carga constante aplicada por una máquina universal con sistema hidráulico según lo estipulado en la norma ASTM C5102 [19].

Cada bloque fue refrendado con yeso para la ejecución de la prueba. El esquema de preparación se muestra en la figura 2. Se realizó el estudio de la resistencia en base a la siguiente fórmula para cada bloque de tierra entero:

$$f^c = P/A \quad (1)$$

Donde P = carga máxima registrada en el tiempo y A = área de contacto del BTC en cada una de las series realizadas.



Figura 2. Ensayo de resistencia a la compresión de BTC.

2.2.3 Ensayo de resistencia a la flexión

Se realizó el ensayo de flexión de tres puntos midiendo el módulo de rotura (MOR) de los bloques de tierra comprimida (BTC), de acuerdo con el método de prueba ASTM C78 (2002) [20]. En la prueba, los rodillos se fijaron con una separación de 180 mm y se ensayaron tres muestras para cada mezcla de BTC con dimensiones de 15×30×7 y 15×30×8 cm como se muestra en la figura 3. El principal dispositivo utilizado fue la prensa hidráulica universal. Los datos obtenidos fueron recopilados en el software Excel. El MOR se calculó utilizando la siguiente ecuación para cada bloque.

$$Fr = 3P (l/2-X) / bd^2 \quad (2)$$

Donde P es la carga máxima, l es la distancia entre los apoyos en cm, b es el ancho neto del espécimen en el plano de falla en cm, d es el espesor del espécimen en el plano de falla en

cm y X es la distancia promedio desde el centro de la cara superior hasta el plano de falla (zona de tensión)



Figura 3. Ensayo de resistencia a la flexión de BTC.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Resistencia a la compresión

Para evaluar la resistencia a la compresión de los bloques se siguió el proceso indicado en la metodología. Los resultados de cada muestra de BTC y el promedio de ellas se encuentran resumidos en la tabla 6. Todos los resultados obtenidos son correspondientes a un tiempo de curado de 28 días una vez almacenados.

Tabla 6

Resultados de resistencia a la compresión según mezcla de BTC

Tipo de muestra	Espécimen N°	f'c (MPa)	Promedio (MPa)
BTC	1	1.67	1.68
	2	1.75	
	3	1.62	
BTCE	1	3.66	3.64
	2	3.55	
	3	3.72	
BTCB - I	1	2.63	2.64
	2	2.60	
	3	2.68	
BTCB - II	1	2.94	2.98
	2	3.01	
	3	2.98	

La figura 4 indica los resultados de resistencia a la compresión de tres especímenes correspondientes a la muestra patrón de BTC. En ella, se indica que sin agregar cemento ni bagazo de caña en la mezcla de los BTC se obtiene una resistencia a la compresión promedio de 1.68 MPa, superando la resistencia mínima que exige la NTE E.080 [21] y estableciendo un valor base para realizar el análisis comparativo.

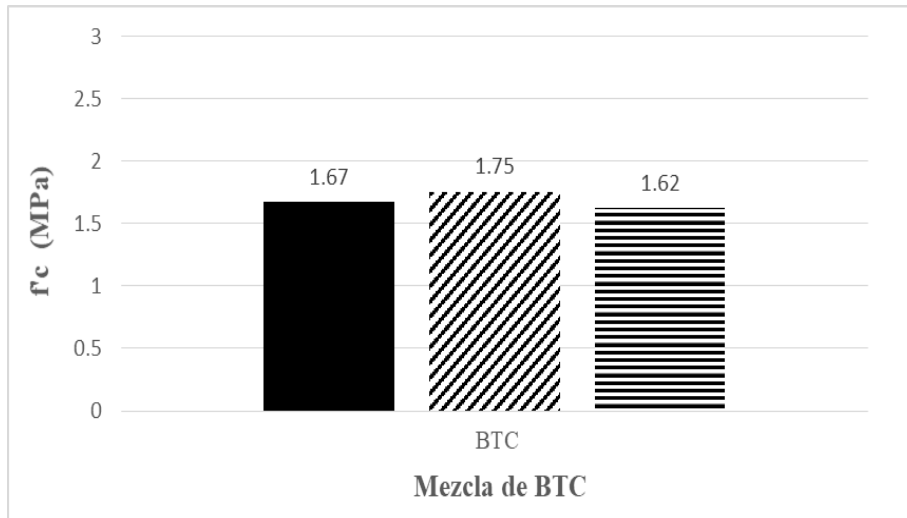


Figura 4. Resultados de resistencia a la compresión de la muestra patrón de BTC.

En la figura 5 se muestran los resultados de los especímenes de BTC estabilizados. Tal como se esperaba la resistencia a la compresión de estas muestras de BTC es mayor que la muestra patrón, siendo 2.2 (BTCE), 1.57 (BTCB-I) y 1.77 (BTCB-II) veces mayor que los BTC.

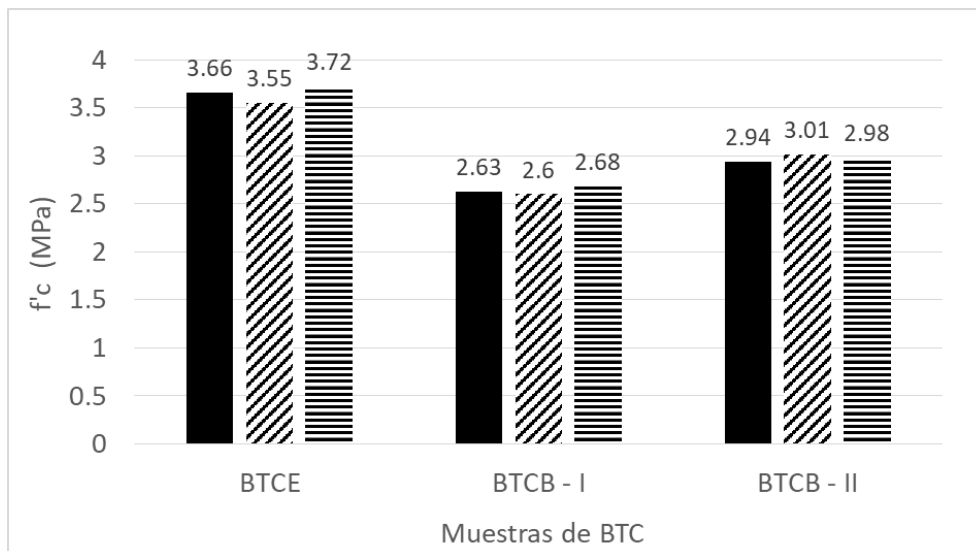


Figura 5. Resultados de resistencia a la compresión de muestras de BTC.

En ella también se puede observar que la resistencia máxima se obtiene con un contenido de cemento del 6% (3.64 MPa). Sin embargo, la adición de las fibras de bagazo de caña para reducir el contenido de cemento y respetar el propósito del modelo ecológico hace que la resistencia a la compresión se vea afectada negativamente. La adición de 0.5% de bagazo de caña (BTCB-I) condujo a una pérdida de 27 % y una menor pérdida se observó en la mezcla el 1% de bagazo de caña (BTCB-II) correspondiente a la pérdida de solo el 18% de resistencia.

3.1.2 Resistencia a la flexión

En base a la norma ASTM C78 [20] y la ecuación (2) se determinaron los valores de módulo de rotura de cada muestra. Con los datos obtenidos de las tres muestras de cada modelo de BTC se calculó el promedio como se indican en la tabla 7.

Tabla 7
Módulos de ruptura máximo según muestra de BTC

Tipo de muestra	Espécimen N°	MOR (MPa)	Promedio (MPa)
BTC	1	0.14	0.13
	2	0.12	
	3	0.13	
BTCE	1	0.70	0.72
	2	0.73	
	3	0.74	
BTCB - I	1	0.51	0.50
	2	0.48	
	3	0.52	
BTCB - II	1	0.57	0.57
	2	0.58	
	3	0.56	

En la figura 6 y 7 se muestran los tres módulos de rotura de cada tipo de bloque planteado en la investigación.

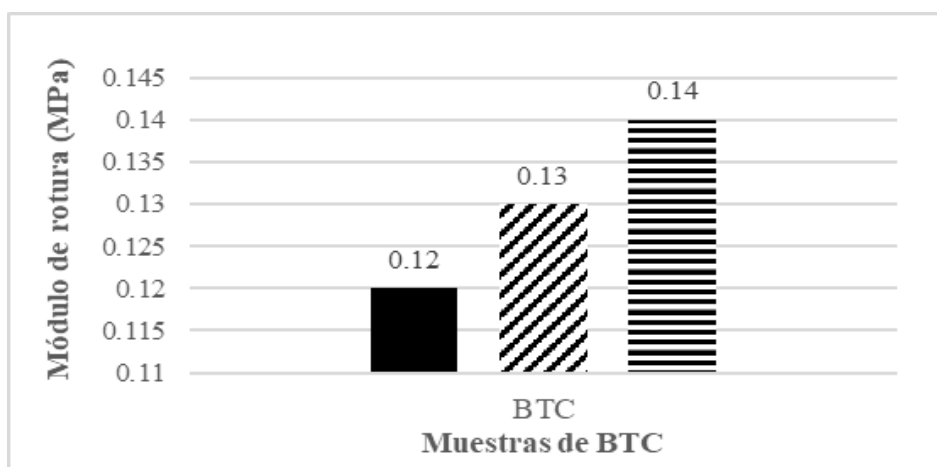


Figura 6. Resistencia a la flexión del BTC.

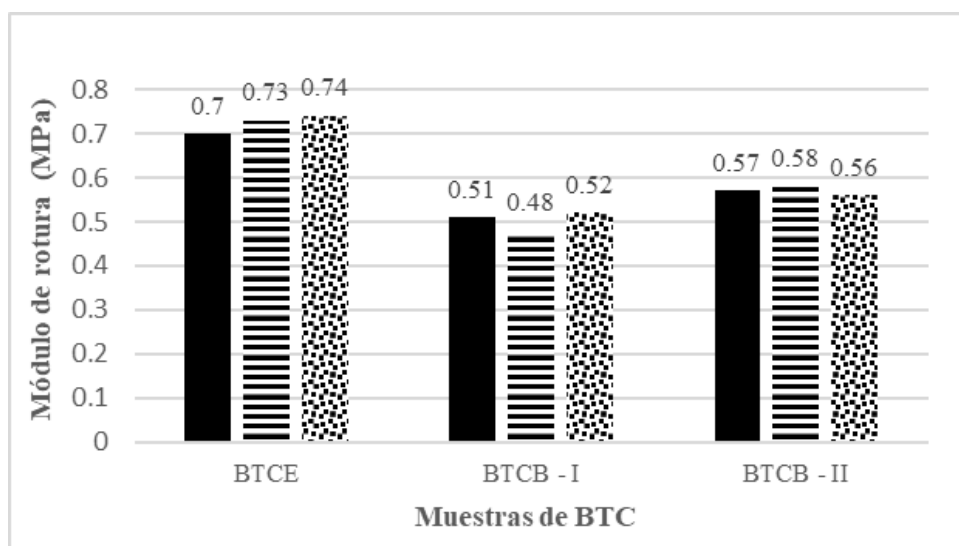


Figura 7. Resistencia a la flexión de BTCE, BTCB-I y BTCB-II.

Al interpretar todos los resultados conseguidos del ensayo, se puede evidenciar que se obtiene un incremento significativo en la resistencia a la flexión de las muestras con 4% de cemento y 1% de fibra de bagazo de caña con respecto a la muestra patrón, superando en un 0.44 MPa. Debido a que se obtuvo una resistencia promedio de 0.13 MPa del BTC y 0.57 MPa para las unidades con 4% de cemento y 1% de fibra. En el caso de los BTCB-I disminuyeron en resistencia un 0.07 MPa con respecto a los BTC-II esto representa solo un 12% de disminución, no obstante, siguen teniendo un mejor comportamiento mecánico a comparación de los BTC, superando en un 0.37 MPa de resistencia promedio. Por otro lado, los BTCE alcanzaron los mayores valores, superando en promedio a los BTC un 0.59 MPa

de resistencia a la flexión. Además, los BTCE superan solamente a los BTC-I y BTC-II en un 44% y 26% respectivamente, siendo la menor diferencia entre el BTCE con el BTC-II.

3.2 Discusión de resultados

3.2.1 Validación de resultados de los ensayos de compresión de unidades

Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión se encuentran dentro del rango de resultados reportados por otras investigaciones, mismos que se pueden observar en la figura 8. La comparación se torna complicada debido a las diferentes composiciones granulométricas, inclusión de agentes estabilizantes o fibras y forma de elaboración de los bloques por la fuerza de compactación. Sin embargo, en todo el resultado sigue la misma tendencia, a mayor contenido de cemento presente el BTC mayor será la resistencia a la compresión.

Por otro lado, en la figura también se puede observar que la mezcla del BTCB-II tiene de la presente investigación fue similar al resultado que estuvo más cercano al obtenido por las otras investigaciones. Este resultado confirma que la inclusión del bagazo de caña tiene un ligero efecto en la resistencia a la compresión. Además, la mezcla del BTCE (6% de cemento) se encuentra ligeramente por debajo de los resultados de Bogas et al. (2018), ello se puede explicar por la diferente composición del suelo, en el que la presente investigación tiene un alto contenido de arcilla mientras el estudio, y la compactación con la que se realizaron las muestras.

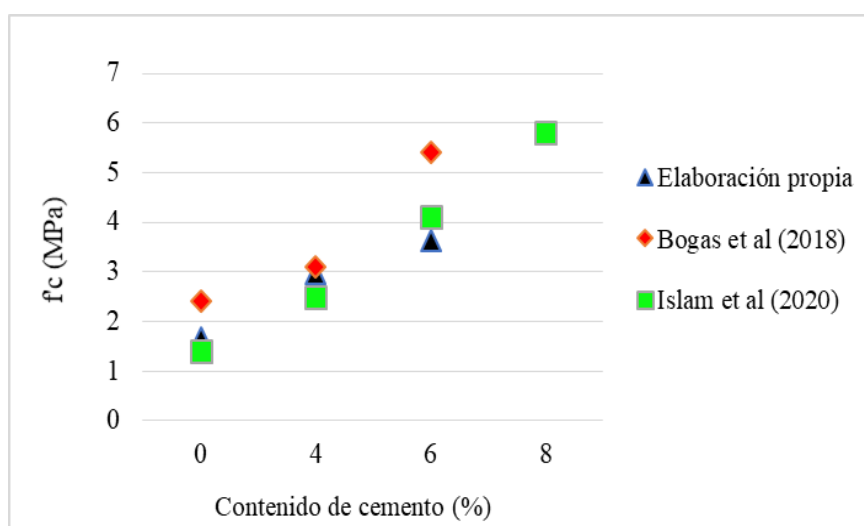


Figura 8. Resistencia a la compresión de BTC a los 28 días reportados por diferentes investigaciones.

3.2.2 Validación de resultados de los ensayos de flexión de unidades

Para desarrollar la validación de los resultados promedios del ensayo de flexión de la investigación, como se muestra en la figura 9, se comparó con los módulos de rotura mínimos especificados en la Norma NZS 4298 (1998) [22] y la Norma HB 195 (2002) [23]. Se muestra que el resultado promedio del BTCE, BTC-I y BTC-II obtenidos cumplen con el mínimo valor condicionado de cada norma, cumpliendo con los parámetros utilizados para la aceptación de los BTC como unidad de albañilería.

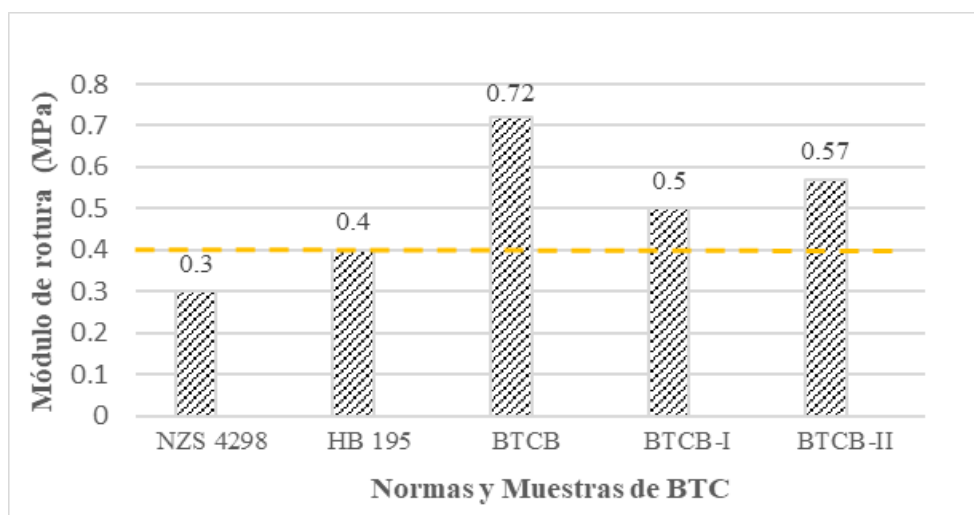


Figura 9. Verificación de los resultados del ensayo a flexión en unidades con respecto a las normas NZS 4298 y HB 195.

Igualmente, se validó los resultados comparando con datos de otras investigaciones que implementaron otro tipo de fibras naturales con suelo-cemento. Se observa en la figura 10 que los resultados se encuentran en un rango de aceptación con la investigación de Mostafa. et al. (2016) [24] y Álvarez, S (2018) [25]. Asimismo, se identificó una tendencia de incremento de la resistencia al momento de agregar mayor cantidad de fibra natural y cemento. Los BTC estabilizados solamente con cemento siguen mostrando un mejor comportamiento en los ensayos de flexión.

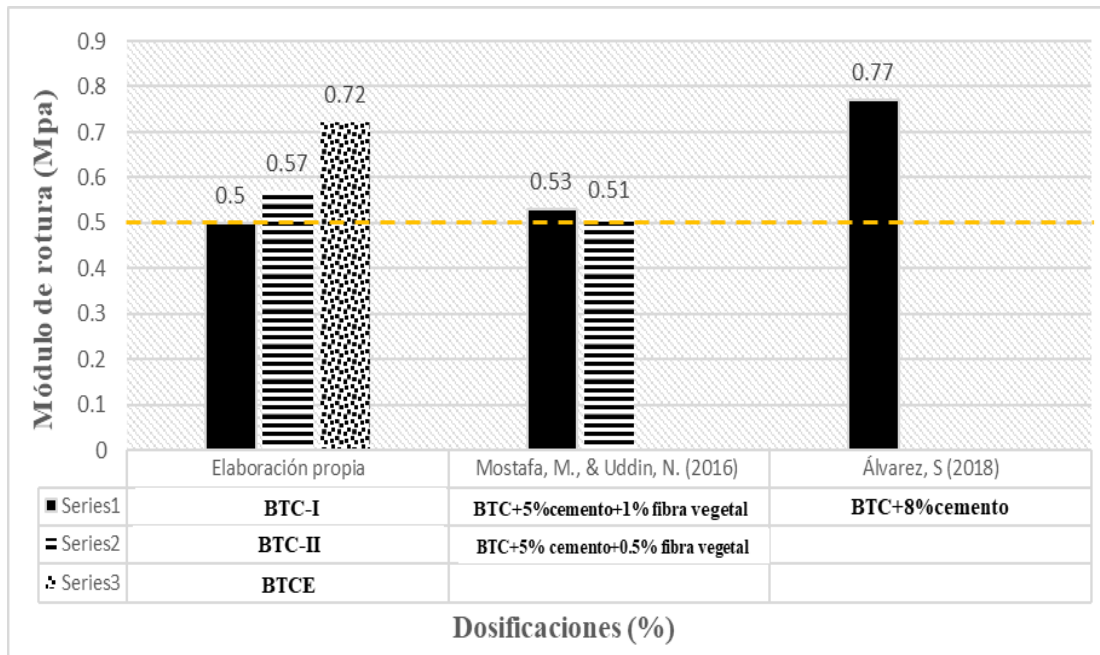


Figura 10. Verificación de los resultados del ensayo a flexión en unidades con respecto a otras investigaciones.

4 CONCLUSIONES

Este estudio se desarrolló para garantizar el uso de suelos de arcilla con baja plasticidad para BTC en la construcción. Para ello se estabilizaron los BTC con cemento y se reforzaron con fibras de bagazo de caña y se evaluó su desempeño en términos de resistencia mecánica. El objetivo de esta investigación fue evaluar la efectividad mecánica de reducir la cantidad de cemento en la mezcla y reemplazar ese porcentaje con fibra natural en la mezcla, incrementando la cantidad del recurso eco amigable que viene hacer la fibra y disminuyendo el porcentaje de cemento en la mezcla. Las conclusiones obtenidas con base en los resultados de los ensayos de este estudio se presentan a continuación:

4.1 Resistencia a la compresión

La estabilización con cemento incrementa la resistencia a la compresión de los BTC. Esto quiere decir que a mayor contenido de cemento se tenga en la mezcla, mayor será la resistencia que puedan tener las muestras. Además, se determinó que la adición de 6% de cemento (BTCE) incrementa la resistencia en un factor mínimo de 2 veces la resistencia de los BTC sin estabilizar.

En los resultados también se encuentra que la adición de fibras de bagazo de caña en 0-5 y 1% y la reducción de cemento de 6 a 4% incrementa la resistencia a la compresión en un

factor mínimo de 1.2, manteniendo la tendencia del incremento de resistencia a medida que se incluye el cemento en el diseño de mezcla. Por ello, la búsqueda del diseño conservador y sostenible ambientalmente no presenta una caída abrupta en los resultados al disminuir la cantidad de cemento y reemplazarlo con fibras naturales de bagazo de caña, cumpliendo los requisitos mínimos de la norma.

Por lo tanto, se concluye que con una dosificación adecuada de fibras de bagazo de caña se puede disminuir la cantidad de cemento y mantener estables la propiedad mecánica de resistencia a la compresión, haciendo que el material sea más sostenible y viable ambientalmente.

4.2 Resistencia a la flexión

Por su parte, se identifica un incremento de resistencia a la flexión de los BTCB-I y BTCB-II respecto al BTC, con un 0.37 Mpa y 0.44 Mpa de diferencia en promedio respectivamente. A comparación del BTCE, los bloques con adición de fibra y cemento presentan menores resistencias, no obstante, el BTCB-II presenta una mínima diferencia del 26% respecto al BTCE. Además, los bloques propuestos cumplen con la mínima resistencia de 0.3 MPa planteado por la Norma NZS 4298 (1998) [22] y 0.4 MPa planteado por la Norma HB 195 (2002) [23].

4.3 Estabilización con cemento

Los descubrimientos de la investigación, sustentan que, con la adición de fibras naturales, en los suelos de arcilla con baja plasticidad, la cantidad del cemento tipo 1 podría disminuirse sin arriesgar las propiedades mecánicas del BTC como la resistencia a la compresión y flexión. De acuerdo a los resultados, se concluye que la muestra con mejor comportamiento mecánico y el más beneficioso a comparación de los BTCE es el BTCB-II que cuenta con 4% de cemento y 1% de fibra de bagazo de caña. A pesar de ello, se necesitan mas investigaciones para identificar la efectividad de agregar fibra con cemento en términos de durabilidad del BTC, analizando a través de pruebas de inmersión y absorción.

5 REFERENCIAS

- [1] León, Juan. (2017). En Lima se generan 19 mil toneladas de desmonte al día y el 70% va al mar o ríos. El Comercio. Adopted by: <https://elcomercio.pe/lima/sucesos/lima-generan-19-mil-toneladas-desmonte-dia-70-mar-rios-noticia-453274-noticia/>
- [2] Castañeda Félix, P. G. (2019). La fiscalización ambiental de las actividades de extracción de material de acarreo de los álveos y cauces de los ríos: una propuesta de mejora normativa. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10757/625601>.
- [3] M.S. Islam, T.E. Elahi, A.R. Shahriar, N. Mumtaz, Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction, *Constr. Build. Mater.* 255, 119392, 2020.
- [4] Jayasinghe, C., Fonseka, W.M.C.D.J., Abeygunawardhene, Y.M. Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. *Constr. Build. Mater.* 102, 471–477, 2016.
- [5] Y .Millogo , J. Morel , J .Aubert, K .Ghavami, Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, vol.52, pp 71-78, 2014.
- [6] B .Taallah, A .Guettala, S .Guettala , A .Kriker , Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Construction and Building Materials*, vol.59, pp 161-168, 2014.
- [7] K .Thanushan , Y .Yogananth , P .Sangeeth , J .Gracian, N. Sathuparan ,Strength and Durability Characteristics of Coconut Fobre Reinforced Earth Cement Blocks. *Natural Fibers*, pp 1-16, 2019.
- [8] S .Raj , S. Mohammad , R .Das , S. Saha. , Coconut Fibre Reinforced Cement Stabilized Rammed Earth Blocks. *World Journal of Engineering*, vol.14 , no. 3, pp 208-216, 2017.
- [9] H.Danso , D .Martinson , M .Ali , J.Williams , Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres. *Construction and Building Materials*, vol.101, pp 797-809 , 2015.
- [10] ASTM D 2974-14, Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014

- [11] ASTM D 854-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
- [12] ASTM D 4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [13] ASTM C 136 / C 136M-14, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [14] T, Casusol (2019) Origen y elaboración agroindustrial de la caña de azúcar (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, Facultad de Agropecuaria y desarrollo sostenible. Lima.
- [15] K. Ghavami, R.D.T. Filho, N.P. Barbosac, Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers. *Cement & Concrete Composites*, vol.21, pp 39-48, 1999.
- [16] NTP 334.009, Cementos. Cemento Pórtland. Requisitos. Recuperado de: <https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/1/jer/corrigendastecnicas/files/corrigendas/NTP%20334.009%20MT-01.pdf>, 2018
- [17] ASTM C-150, Estandard Specification for Portland Cement. Adopted by: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C150-07-SP.htm>, 2017.
- [18] Bogas, J., Silva, M., & Glória Gomes, M. (2019). Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(4), 569-584.
- [19] ASTM D 5102-09, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- [20] ASTM C78, Standard Test Method for Determination of Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) .Adopted by: <https://www.scribd.com/doc/187747328/ASTM-C78>, 2002.
- [21] Reglamento Nacional de Edificaciones (2017). "Norma Técnica de Edificación E.080 Diseño y construcción con tierra reforzada". Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, Perú
- [22] NZS 4298, [Materials and workmanship for earth Buildings](https://www.standards.govt.nz/sponsored-standards/building-standards/nzs4298/). Adopted by: <https://www.standards.govt.nz/sponsored-standards/building-standards/nzs4298/>, 1998.

- [23] HB 195, [The Australian Earth Building Handbook](https://www.standards.org.au/standards-catalogue/sa-snz/building/bd-083/hb--195-2002,2002). Adopted by: <https://www.standards.org.au/standards-catalogue/sa-snz/building/bd-083/hb--195-2002,2002>.
- [24] M .Mostafa , N .Uddin, Experimental analisis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces. Case Studies in Construction Material, vol.5, pp 53-63, 2016.
- [25] S. Alvarez (2018) Comparación de las propiedades mecánicas de unidades y prismas de bloques de tierra comprimida estabilizada con cemento y geo polímero de puzolana (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Católica Del Perú, Facultad de Ingeniería. Lima.