

Determination of the characteristics of the wheat straw bale, as an agro-industrial waste for use as a construction material

Paulina Viera ^{*,a} , Darío Aguirre ^a , José María Monzó ^b 

^a*Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.*

^b*Instituto Universitario de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de València, Valencia, España.*

Abstract.- The objective of this research is to determine the physical-mechanical characteristics of the straw bales produced in Ecuador, in order to define their possible use in the construction of earthquake-resistant housing. For this purpose, experimental methods proposed by Vardy (2006) were used on the bales varying their position for flat and edge load tests. Thus obtaining the modulus of elasticity of the bundle bare and plastered on their faces, with a mortar based on lime cement and natural fibers previously designed. It was determined that the maximum modulus of elasticity of the plastered bundle varies between 12,98 and 18,67 MPa. These values were used to perform the structural modeling of a typical house through the use of a software to propose a housing solution that promotes the use of the straw bale produced in Ecuador for the construction of earthquake-resistant housing. From the analysis of this model, it is concluded that the maximum inelastic drifts of the proposed structure, with supporting masonry made with the straw bales, are less than 2 %, with a rendering of thickness between 2 and 4 cm, concluding that the structural responses obtained comply with what is established for seismic-resistant housing in the Ecuadorian Construction Standard.

Keywords: modulus of elasticity; straw bale; housing; sustainability.

Determinación de las características del fardo de paja de trigo, como desecho agroindustrial para su aprovechamiento como material de construcción

Resumen.- El objetivo de esta investigación es determinar las características físico-mecánicas de los fardos de paja producidos en Ecuador, para definir su posible uso en la construcción de viviendas sismorresistentes. Para lo cual, se utilizaron métodos experimentales propuestos por Vardy (2006) en los fardos, variando su posición para pruebas de carga en plano y canto. Obteniendo así el módulo de elasticidad del fardo desnudo y revocado en sus caras, con un mortero en base de cal, cemento y fibras naturales previamente diseñado. Se determinó que el máximo módulo de elasticidad del fardo revocado varía entre 12,98 y 18,67 MPa. Estos valores fueron utilizados para realizar el modelamiento estructural de una vivienda tipo, mediante el uso de un software, para proponer una solución habitacional que fomente el uso del fardo de paja producido en Ecuador para la construcción de viviendas sismorresistentes. Del análisis de este modelo se concluye que las derivas inelásticas máximas de la estructura propuesta, con mampostería portante realizada con los fardos de paja, son menores al 2 %, con un revoco de espesor de entre 3 y 4 cm, concluyendo que las respuestas estructurales obtenidas cumplen con lo establecido para viviendas sismorresistentes en la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Palabras clave: módulo de elasticidad; fardo de paja; vivienda; sustentabilidad.

Recibido: 26 de septiembre, 2020.

Aceptado: 28 de noviembre, 2020.

1. Introducción

En Ecuador, según datos oficiales INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) [1] y RIMISP (Rimisp-Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural) [2], la tasa de pobreza extrema multidimensional a nivel rural creció de 39,9 % a 42 % en el año 2019. La falta de

* Autor para correspondencia:

Correo-e: lviera@uce.edu.ec (P. Viera)

recursos económicos, se refleja también en el déficit cualitativo de vivienda para esta misma zona a nivel nacional de 95,3 % según datos del último censo INEC [3].

Una de las principales fuentes de sustento económico de la población rural es la actividad agrícola. La cosecha y siembra de diversos productos representa una de la amplia gama de actividades relacionadas con la explotación de recursos naturales, la cosecha y siembra de trigo es una de ellas, sobre todo en la región rural de la Sierra. De acuerdo al MAGAP (Ministerio de Agricultura y Ganadería) [4], las provincias de producción triguera son Pichincha, Imbabura, Chimborazo, Bolívar, Carchi. Siendo Pichincha la que más producción aporta con un 27 %, le sigue Imbabura con 26 %, para un total de superficie sembrada y cosechada de trigo de aproximadamente 9.140 y 8.980 hectáreas respectivamente. Cabezas [5] cita un rendimiento de producción de trigo en el país de 2,5 toneladas por año. Sin embargo, en la zona rural de estas provincias se registra un déficit cualitativo de vivienda de 6,6 %; 2,4 %; 3,2 %; 1,7 % y 1,3 % respectivamente [6].

Dentro de la producción de trigo, la paja es un desecho que se empaca en forma de fardos prismáticos y constituye aproximadamente la mitad de la vegetación que se puede cosechar de un cultivo además de ser reutilizable, término referido al hecho que normalmente este desecho es empleado para el alimento del ganado. También se usa para cubrir suelos en contra de heladas, para oxigenar los suelos de cultivos, abono o simplemente como piso para establos. De acuerdo con varios autores, Martínez [7] y [8], en el mundo se registran más de 600 millones de hectáreas de cereal, por cada tonelada que se cosecha para el consumo, se generan 1,5 toneladas de paja como un residuo o desecho agrícola y de aquello el 90 % se quema. Ponce [9] afirma que en Chile se queman mas de 4 toneladas de paja, material que de ser utilizado se aprovecharía para construir 100 viviendas. Por consiguiente el porcentaje que se desperdicia de este material es significativo y puede aprovecharse haciéndose un enfoque en la bioconstrucción con paja mediante

una caracterización del material.

La paja es un desecho agroindustrial que está constituida por el tallo seco de los cereales y plantas fibrosas, específicamente entre la raíz y la espiga, conociendo que existen pajas de trigo, escanda, centeno y arroz [7]. Minke [10] afirma que la paja es un material sostenible debido a los beneficios que ofrece no solo en el ámbito de la agricultura (necesidad de reducción de CO₂) sino también en que es un material que no emite CO₂ u otros gases que pudieran afectar y generar un impacto ambiental negativo. Según Bernal [11], 10 kilogramos de paja de trigo absorben 14 kilogramos de dióxido de carbono, los cuales retienen durante el plazo de su vida.

Es necesario acotar que el impulso de utilizar este material sobre todo en las zonas rurales del país recae también en el hecho de que al ser un material amigable con el ambiente y que a su vez se complementa con materiales propios de la zona, el emplazamiento de viviendas unifamiliares aprovechando el porcentaje de fardos de paja que se quema, representa una opción viable de vivienda digna, accesible económicamente y de fácil construcción para la sociedad que vive en dichas zonas. Pachala [12] realiza una comparación de presupuesto referencial para tres tipos de viviendas ubicadas en la provincia de Bolívar-Guaranda: Casa unifamiliar con muros de paja portantes, con estructura metálica y mampostería de bloque, y con estructura de hormigón y mampostería de bloques, obteniendo \$10.066,18 \$17.856,25 y \$20.456,38 respectivamente, en donde se evidencia la diferencia económica notable del uso del fardo de paja con respecto a los materiales de construcción generalmente utilizados.

Con el aprovechamiento de este desecho; la actividad agrícola puede ser redireccionada a una gestión sostenible en el ámbito de la construcción [13]. El fardo de paja en conjunto con otros materiales comúnmente empleados en la edificación de viviendas, tales como madera, barro, arcilla cal y cemento, garantizan la posibilidad de levantar estructuras sostenibles con el medio ambiente, por tal motivo, el compósito empleado que conforma la cara del fardo, es un revestimiento con menor coste energético y

suficientes propiedades resistentes para ser usado en la construcción, la investigación incorpora cal hidráulica para disminuir la cantidad de cemento en la fase matriz, y en la fase dispersa, usa fibras naturales extraídas de la planta de yute (*corchorus capsularis*) [14]. Su diseño además tiene como beneficio la reducción del impacto ambiental negativo, fomentando el uso de materiales alternativos, ecológicos y sustentables cuya fabricación reduzca la energía que se ocupa durante su elaboración, y que, en conjunto con los fardos de paja garantizan una obra ecológica.

Con los fardos de paja, se asegura la inclusión de una alternativa con bioconstrucción sostenible, de hecho, las construcciones más antiguas registradas y que actualmente siguen en pie datan entre 1900 y 1914 [15], en Europa tenemos “La Maison Feuillate” construida en 1921 y que actualmente se usa como sede del Centro Nacional para la Construcción con Paja de Francia [10], poco después de 1993 en Holanda se presentó el auditorio para la feria internacional de horticultura y jardinería “Floriade 2002”, considerado el edificio público más grande de Europa construido con fardos de paja. Martínez [7], plantea que gracias a estas obras, las construcciones con paja se han extendido por todo el mundo; EE.UU., Francia, Canadá, Inglaterra, Austria, Dinamarca, Australia; de manera que en la actualidad la construcción con este material esta presente en casi todos los continentes: África, Sudamérica, Norteamérica, Europa, Asia, entre otros.

La importancia de este estudio radica en que aporta datos, que antes de esta investigación no existían, acerca de las características físicas y mecánicas de los fardos producidos en el Ecuador para posibilitar a los profesionales de la construcción, el modelamiento estructural de edificaciones a ser construidas con este material. Esta caracterización se realizó mediante ensayos de laboratorio en base a normativa nacional e internacional (INEN-ASTM), estudiando al material con y sin revoco de acuerdo a la metodología aplicada por varios autores, Garas [16], Maraldi [17], Romans [18]; [19] y Rodríguez [20], especialmente Vardy [21]. El uso de mortero como recubrimiento de la mampostería portante

realizada con fardos, permite que el conjunto fardo-revoco funcione como una estructura del tipo sándwich donde la piel es el elemento mortero, y el núcleo es el fardo de paja, cuyo principio se basa en que los revestimientos absorben parte de los esfuerzos y cargas además proporcionan rigidez al conjunto.

Esta investigación, por tanto, representa además una alternativa al desarrollo rural del Ecuador en la construcción de vivienda. Por tal razón, y acompañado de las crecientes soluciones sostenibles a nivel mundial, se espera que los resultados obtenidos sirvan como punto de partida para otros estudios que permitan el desarrollo e implementación de una normativa constructiva técnica nacional respecto del uso de fardos de paja en la construcción. Los resultados obtenidos del módulo de elasticidad, esfuerzos a compresión, densidades y contenidos de humedad son un aporte para la tecnificación de la construcción con fardos de paja producidos en el Ecuador y posibilita el modelamiento estructural. Como ejemplo se presenta una vivienda tipo de 120,35 m², en donde se comprueba que las respuestas estructurales (derivadas de piso) cumplen con los requisitos estipulados en la Norma Ecuatoriana de la Construcción [22], por lo tanto, el fardo de paja, es apto para su uso en la construcción.

2. Metodología

2.1. Recolección, procesamiento y análisis de datos

Esta investigación es experimental y se basa en procedimientos establecidos en la normativa nacional ecuatoriana INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) y normativas internacionales ASTM (American Society of Testing Materials) esencialmente para la elaboración y diseño de las mezclas, elaboración de especímenes de prueba, aproximación de metodología basada en investigaciones internacionales como el de Vardy [21] para la obtención del módulo de elasticidad de los fardos de paja.

2.2. Materiales

Los materiales que conforman el mortero se pueden visualizar en la Tabla 1.

Tabla 1: Materiales del mortero

Material	Especificación
Cemento Hidráulico tipo GU-HOLCIM	NTE INEN 2380 [23](ASTM C 1157) [24]
Cal hidráulica T-30 (NHL)	NTE INEN 247 (ASTM C207) [25, 26]
Arena gradada	Cantera Fucusucu III-San Antonio-Quito.
Fibras naturales-yute (<i>corchorus capsularis</i>)	Longitudes nominales de 2,5 a 5 cm
Agua	Red-Distrito Metropolitano de Quito



Figura 1: Enfardadora

2.3. Mortero

En la presente investigación se utilizó un revoco con características estructurales [21] que incorpora fibras en su dosificación, cuyo mortero de resistencia de 14,10 MPa cumple con la resistencia mínima de 6,89 MPa establecida por RB473 [27] para morteros cal-cemento aplicados en la construcción con fardos, valores que se puede observar en la Tabla 2, en concordancia además con Avon [28] y Solé [29], en donde se construyen muros con fardos de paja y se establece una resistencia mínima de 8 MPa para que el mortero sea suficientemente resistente. El diseño de este mortero se estableció en función de la Norma ASTM 305-14 y ASTM C192-16, así como la realización de ensayos de pruebas de carga para esfuerzo a compresión, módulo estático de elasticidad y coeficiente de Poisson, las condiciones de ensayo para Elasticidad y Poisson fueron lecturas cada 2,5 kN, gradiente de aplicación de carga 0,03 MPa/s, finalización de carga a 15 % de la rotura y una velocidad mínima de 0,10 s⁻¹.

2.4. Fardos de paja

2.4.1. Provisión de fardos

Los fardos de paja para el estudio fueron obtenidos directamente desde la parroquia rural Calacali (Figura 1), donados por el Ing. Jorge Dávila.

El trigo es un producto propio de dicha zona, en el cantón de Pichincha, específicamente Calacali existe área de producción de trigo de paja de 605 hectáreas [39]. Los fardos fueron trasladados hacia la Universidad Central del Ecuador para

su almacenamiento adecuado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Modelos ubicándolos y apilándolos cuidadosamente sobre tabiques de madera evitando el contacto directo con el suelo y protegiéndolos de la humedad.

2.4.2. Almacenamiento

Los fardos son almacenados encima de pallets de madera (Figura 2) evitando el acercamiento directo con el suelo para evitar el contacto con residuos y principalmente la humedad, los mismos deben ser cubiertos en su totalidad y así evitar el deterioro debido al contacto de agua, lo que genera por consiguiente su pudrición e inhabilita su uso.



Figura 2: Fardos almacenados en laboratorio

Maraldi y colaboradores en [40] y [41] coinciden en que, para revocar al fardo, ya sea con un mortero hecho con cal o con yeso, es necesario pulirlo, de tal forma que los restos de la paja que sobresalen de cada una de las caras puedan definirse en una longitud aproximada, de esta manera se garantizó un recubrimiento adecuado con un espesor definido en toda el área de la cara del fardo.

Tabla 2: Esfuerzo a compresión, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

Id.	Dosificación	Esfuerzo a compresión axial (MPa)			Módulo estático de elasticidad (MPa)	Coef. de Poisson
		7 días	14 días	28 días		
M4	0.75C 0.25 cal 3A 1 %FY 20 %H ₂ O	7,45	8,43	14,1	28	28
					24859,08	0,21
Normativa	ASTM C 305, NTE 3124 [30](ASTM C 192 [31]) y NTE INEN 2518 [32] (ASTM C 270 [33])	NTE INEN 1573:2010 [34] (ASTM C 31 [35]), ASTM C 496-17 [36], NTE INEN 3124 (ASTM C 192M-18 [31] y ASTM C 511 [37])			ASTM C 469 [38]	

2.4.3. Densidad y Contenido de humedad

Para la caracterización del fardo desnudo (no revocado), es necesario determinar su contenido de humedad y densidad aparente, de manera que cumplan con los requisitos previo a su uso, por tal motivo se realizó la medición de las dimensiones de los fardos de paja, su respectivo pesaje según se muestra en la Figura 3 y la determinación de su contenido de humedad.

Para la obtención del contenido de humedad se utilizó el equipo F-2000, este aparato mostrado en la Figura 4 se utiliza mundialmente para asegurar y a su vez mejorar el control de calidad en cuanto a contenido de humedad se refiere, ya que dispone dentro de sus características un rango de humedad de entre 6–40 % y es empleado para verificar dicha característica del heno en la hilera o en los fardos.



Figura 3: Obtención del peso de fardo

Acotándose que para caracterizar el fardo de paja en cuanto a densidades, es necesario realizar la corrección por humedad del peso de cada uno de los especímenes, todo ello conforme la normativa estadounidense RB476-13 [27].



Figura 4: Ensayo de contenido de humedad

2.5. Revocado de los fardos de paja

Con la dosificación especificada, se procede al cálculo de la cantidad de materiales. Para el encofrado de los fardos se empleó tabla típica rústica de 5 cm de espesor, material que se presenta en la Figura 5, se programaron dos días para el trabajo donde los encofrados presentados se emplean para revocar el primer lado de los fardos, para posteriormente al día siguiente desencofrar y realizar la colocación del mortero en la otra cara de la mampostería. Cada encofrado tiene señalado en su interior el nivel de referencia para cumplir un espesor adecuado de variación entre 3–4 cm, en la Figura 6 se pueden observar los primeros fardos revocados, con el mismo procedimiento se revocaron los siguientes fardos.

Se programó el ensayo de Módulo de Elasticidad-Resistencia a la compresión a los 28 días.

2.6. Módulo estático de elasticidad en fardos de paja desnudos (no revocados)

Para la determinación de la propiedad se toma como base la investigación de Maraldi [41]



Figura 5: Encofrado tipo para revoco



Figura 6: Revoco de fardos de paja

denominada “Analysis of the parameters affecting the mechanical behavior of straw bales under compression”. En esta investigación se caracterizan fardos de diferente tipo, el estudio clasifica al fardo hecho con trigo, avena y “otros materiales” prediciendo el módulo de elasticidad mediante el modelo $E \propto p^2$ ecuación cuyo concepto establece que el módulo de elasticidad se puede predecir mediante la densidad del material al cuadrado, por consiguiente es una relación directamente proporcional. La investigación citada se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3: Relación entre el módulo de elasticidad del fardo de paja y la densidad para diferentes subgrupos

Relación	Denominación	Posición	Relación $E \propto p^2$
1	Otros	Plano	$26,25p^2$
2	Otros	Canto	$25,53p^2$
3	Trigo	Plano	$12,05p^2$
4	Trigo	Canto	$11,51p^2$
5	Avena	Plano	$16,65p^2$
6	Avena	Canto	$13,90p^2$

Donde el valor del módulo de elasticidad se encuentra en Pa y la densidad en kg/m^3 .

2.7. Módulo estático de elasticidad en fardos de paja revocados

Para la determinación del módulo estático de elasticidad se empleó 2 deformímetros ubicados en la parte izquierda y derecha del fardo de paja revocado los cuales se observan en la Figura 7 y 8; y se ocupó la norma ASTM C469 [38] para dicho ensayo con el método de la tangente cuerda, para la obtención del módulo se utilizó la ecuación (1).

$$E = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \right), \quad (1)$$

donde E : módulo de elasticidad cuerda en MPa, σ_2 : esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga de rotura, σ_1 : esfuerzo correspondiente a una deformación longitudinal ε_1 de 5 millonésimos MPa, ε_2 : deformación longitudinal producida por el esfuerzo σ_2 .

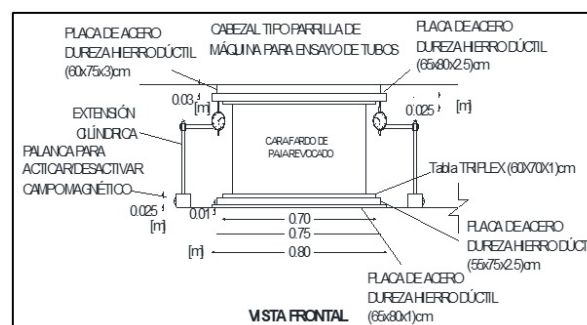


Figura 7: Ubicación de los deformímetros longitudinales para ensayo de módulo de elasticidad

En la Figura 9 se presenta un esquema general de un ensayo típico, se visualizan los datos a considerar en el método tangente-cuerda para la obtención del módulo, según la ecuación (1). Se ha seleccionado el método de la tangente cuerda ya que dicho procedimiento toma en consideración el mayor número de datos para el cálculo del módulo de elasticidad, además de la deformación longitudinal de 5 millonésimos MPa la cual se considera el valor más real para obtener esta propiedad.

Cabe recalcar que, inicialmente se obtuvieron 2 módulos de elasticidad para cada fardo revocado



Figura 8: Dispositivo de acoplamiento para deformímetro longitudinal

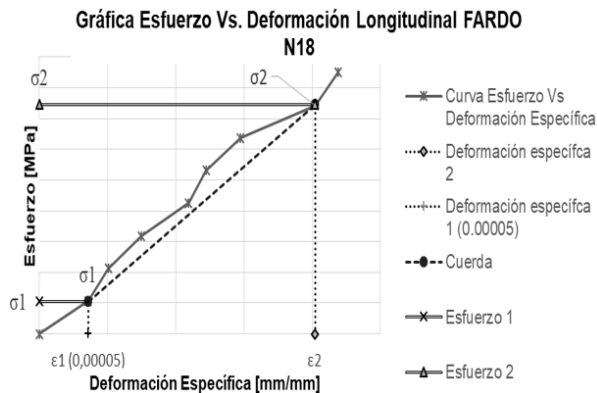


Figura 9: Método de la tangente-cuerda, gráfico esfuerzo vs deformación

debido al empleo de 2 deformímetros por ensayo, posteriormente a aquello, se consideró necesario realizar un promedio de las deformaciones obtenidas por cada nivel de carga, realizando las correspondientes curvas σ vs ε y diferenciándose de acuerdo a las condiciones de los ensayos (orientación en plano o canto y de acuerdo a espesor del recubrimiento); determinando de esta manera el módulo de elasticidad promedio experimental

para fardos de paja en posición plano, canto y con espesor de 3 a 4 cm.

Para el caso de σ_1 se tomó el rango de datos de esfuerzo y deformación determinándose la pendiente de esta sección al momento del asiento del cabezal en el revoco del fardo para multiplicarse por la deformación de 5 millonésimos, obteniéndose σ_1 y ε_1 (0,00005). Para σ_2 se consideró la toma de datos hasta el 40 % de la carga de rotura y por ende esfuerzo proyectado, se tomó el rango de esfuerzo y deformación para el cálculo de su pendiente, calculándose de esta manera σ_2 y ε_2 y por ende el cálculo del módulo E . Vardy [21] realiza el cálculo del módulo de elasticidad con la metodología del módulo cuerda, la diferencia en el cálculo de la propiedad con la presente investigación recae en la consideración del σ_2 más allá del 40 % de la carga de rotura, esto no fue posible para el estudio dado que fue necesario el retiro de los equipos antes de la rotura para asegurar la integridad de los mismos.

2.8. Modelación de vivienda unifamiliar en ETABS

Para comprobar el posible uso del desecho agroindustrial estudiado en la construcción, se realizó la modelación estructural de una vivienda (120,35 m²) con muros portantes de fardos de paja en donde se utilizó como dato necesario el módulo de elasticidad obtenido en esta investigación.

La estructura modelada posee 2 pisos, misma que se observa en la Figura 12, con una altura de entrepiso de 2,75 m; con cubierta y el sistema estructural conformado por muros portantes de fardos de paja revocados con las propiedades obtenidas. El entrepiso es un entablado de madera con espesor de 3,5 cm; cubierta con altura de onda (espesor modelado) de 3,7 cm. Vigas perimetrales de entrepiso de 20 × 25 cm, para soporte de cercha más cubierta de 6,5 × 14 cm, longitudinales e interiores 6,5 × 14 cm y para conformación de cerchas de 4,5 × 9 cm. Todo el material a excepción de los muros, corresponde a madera tipo B, madera denominada “Colorado” [42], misma que no presenta ningún ataque microbiológico o de insectos, no tiene deficiencias de secado, alabeos, fendas, deformaciones ni desgarros y que cumple

con todas las especificaciones tanto mecánicas, técnicas y tecnológicas. Un detalle de aquellas especificaciones se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4: Especificaciones técnicas para madera tipo B [15]

Esfuerzo a la flexión	150 kg/cm ²
Tracción paralela a las fibras	105 kg/cm ²
Compresión paralela a las fibras	110 kg/cm ²

Se presenta la configuración arquitectónica en planta para el piso 1 y 2 en las Figuras 10 y 11, en la mismas se pueden observar la distribución de espacios.



Figura 10: Vista en planta, primer piso de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja

A continuación, se puede observar la vivienda modelada en 3D y en la Figura 13 se presenta una sección de la configuración del material tipo sánduche (revoco-fardo-revoco), sistema a modelar en ETABS más adelante.

Se presenta una sección del material tipo sánduche caracterizado, y su ubicación en la vivienda.



Figura 11: Vista en planta, segundo piso de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja

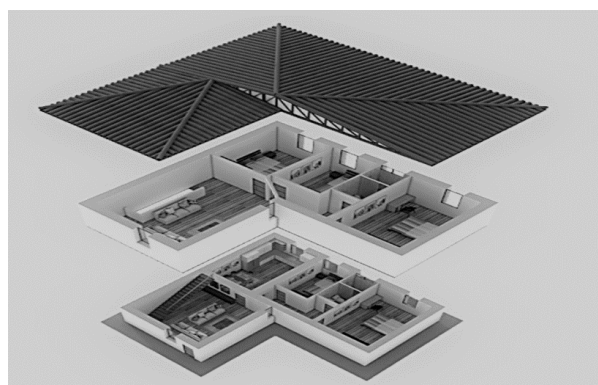


Figura 12: Vista en 3D de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja revocados

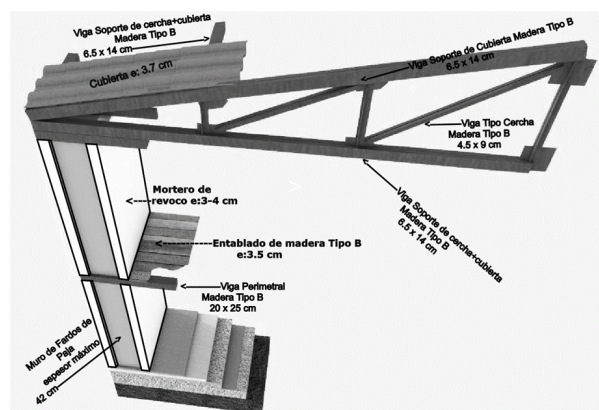


Figura 13: Muro de fardo de paja, sección vista tipo sánduche

3. Resultados y discusiones

3.1. Resultados

Se presentan los resultados obtenidos realizada la caracterización del fardo de paja antes y después del revoco aplicado.

3.1.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad promedio de los 20 fardos que conforman la muestra es 10,3 %. Para una mejor observación e interpretación de estos resultados con el límite máximo de contenido de humedad, se presenta la Figura 14, la misma que detalla el contenido de humedad obtenido en cada fardo de paja.

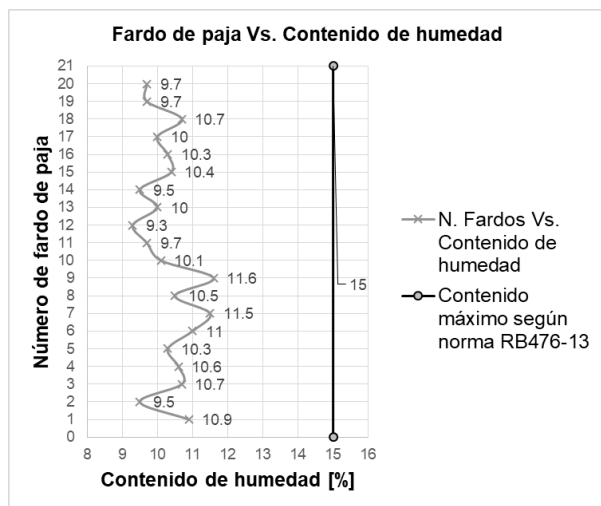


Figura 14: Fardo de paja vs. Contenido de humedad

Por consiguiente, los fardos de paja cumplen con dicha disposición ya que los resultados obtenidos no sobrepasan el límite máximo permisible.

3.1.2. Densidad aparente

La normativa estadounidense RB473 [27] en su apéndice denominado “Construcción con fardos de paja”, estipula la necesaria corrección por humedad que se debe realizar en el peso de los fardos de paja previo cálculo de la densidad aparente. Dicha corrección consiste en determinar el valor representativo del contenido de humedad en el fardo de paja, posteriormente restarlo del peso del material y proceder al cálculo de la densidad mediante la relación masa sobre volumen de acuerdo con la ecuación (2).

$$D.A = \frac{\text{Peso}_{\text{fardo}} - (\text{Peso} \cdot \text{Cont}_{\text{Humedad}})}{\text{Volumen}} \quad (2)$$

En la Figura 15 se presenta el esquema representativo de los valores de densidades aparentes corregidas cuyo promedio fue 88,83 kg/m³, de tal forma que se puede observar que ningún valor es inferior al valor mínimo permisible ni superior al valor máximo permisible, por consiguiente, todos los fardos de paja cumplen los requisitos de caracterización para su uso.

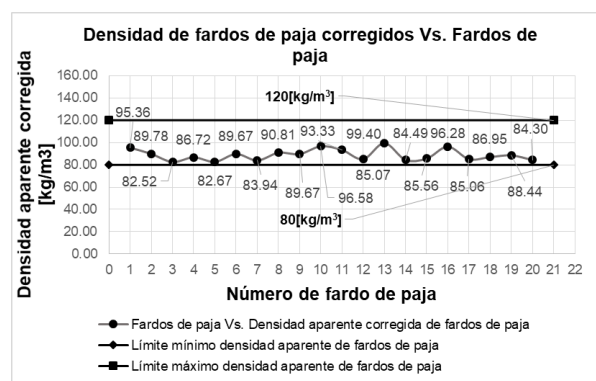


Figura 15: Densidad de fardos de paja corregidos vs. Fardo de paja

3.1.3. Módulo de elasticidad en fardo de paja desnudo

La investigación se enfocó únicamente en el fardo hecho a base de trigo, por tal motivo, se seleccionó la relación 3 y 4 de la Tabla 3, no obstante, es necesario aclarar que los resultados de los investigadores en las ecuaciones seleccionadas se determinaron con una densidad promedio del fardo de paja de 146,1 kg/m³. Se realizó una relación entre dicha densidad y la obtenida de manera experimental de los fardos recogidos en Calacalí, que es en promedio 88,83 kg/m³, determinándose en la Tabla 5 las siguientes ecuaciones para el presente estudio.

Con esta relación se procede al cálculo del módulo de elasticidad del fardo de paja desnudo (no revocado), se diferencian por posición y espesor de revoco con la finalidad de discutir el módulo con y sin revestimiento, estos resultados se observan en la Figura 16.

Tabla 5: Relación $e^\infty p^2$ obtenida

N	Identificación	Posición	Relación Maraldi et al	Relación obtenida
3	Trigo	Plano	$12,05p^2$	$7,33p^2$
4	Trigo	Canto	$11,51p^2$	$6,99p^2$

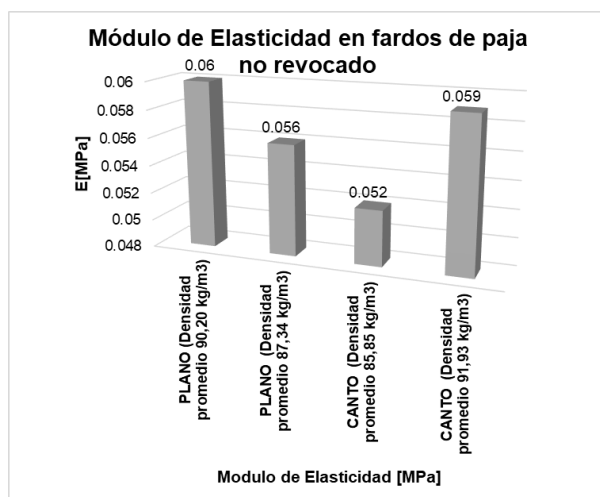


Figura 16: Cálculo del módulo de elasticidad del fardo de paja sin recubrimiento

3.1.4. Módulo de Elasticidad Promedio Experimental de fardo de paja revocado

Una vez realizada la gráfica esfuerzo vs deformación experimental para obtener el módulo de elasticidad de la mampostería, será necesario ponderar los esfuerzos a compresión obtenidos, para el caso de posición plana e: 3 cm, posición plana e: 4 cm, posición canto e: 3 cm y en posición canto e: 4 cm. Además, así como se obtuvo un módulo de elasticidad promedio, es ideal asumir una sola constitución (dimensiones de los fardos para cada caso) diferenciando la posición y el espesor. Con estos datos y habiéndose obtenido las deformaciones generalizadas (promedio) para cada caso se presentan en la Figura 17 los valores generalizados promedios previo al cálculo del módulo de elasticidad en fardos de paja revocados.

Determinándose los siguientes módulos de elasticidad en la Tabla 6, aplicado la metodología de Vardy [21].

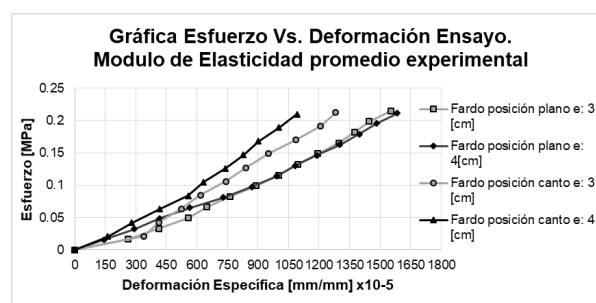


Figura 17: Datos de deformaciones y esfuerzos para módulo de elasticidad promedio experimental

Tabla 6: Esfuerzo y módulo de elasticidad en fardos de paja revocados

Posición	e (cm)	Prom $\delta_{m\acute{a}x}$ (MPa)	A (cm)	L (cm)	H (cm)	E (MPa)
Plano	3	0,43	48	63	33,9	13
	4	0,48	49,6	62	34,2	13,1
Canto	3	0,37	38	62	47,3	15,7
	4	0,42	38	61,4	46,7	18,7

3.1.5. Módulo de elasticidad y densidad de fardos de paja revocados

En lo referido a la Figura 18, se puede observar la relación directamente proporcional que existe entre la densidad de los fardos de paja revocados y el módulo de elasticidad ($E \propto D$), a medida que más alto sea la densidad de los fardos de paja revocados, mayor será el módulo de elasticidad para los mismos. Se obtienen mejores resultados en cuanto a módulo de elasticidad se refiere cuando el fardo se encuentra dispuesto en posición canto, derivado de una densidad mayor con respecto a los fardos en posición plano, esto se debe a la posición propia del fardo, al ser revocado en posición canto el peso del mortero empleado es superior comparado con la posición plano.

3.1.6. Derivas de piso

Con la caracterización realizada al mortero y fardo de paja, se procedió a realizar la modelación, empleando un sistema de muros portantes cuya base de la vivienda es el propio material estudiado (revoco-fardo-revoco), visto en la Figura 13. De la modelación planteada posterior a la caracterización para la evaluación del fardo de paja como material

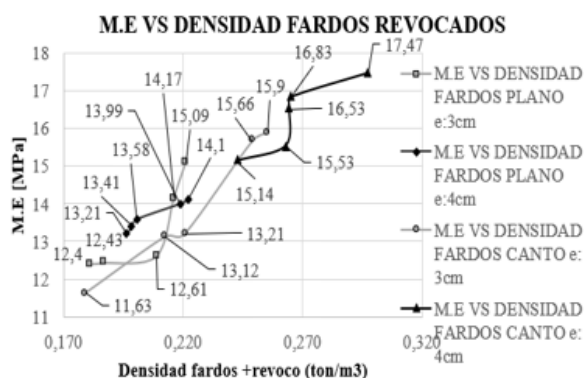


Figura 18: Relación módulo de elasticidad vs. Densidad de fardos de paja revocados

de construcción, se obtuvieron las derivas de piso para los casos de muros con fardos de paja en posición plano y canto, variando el espesor del revoco de 3 a 4 cm, se presenta las derivas máximas obtenida para el caso posición plano e: 3 cm en la Figura 19.

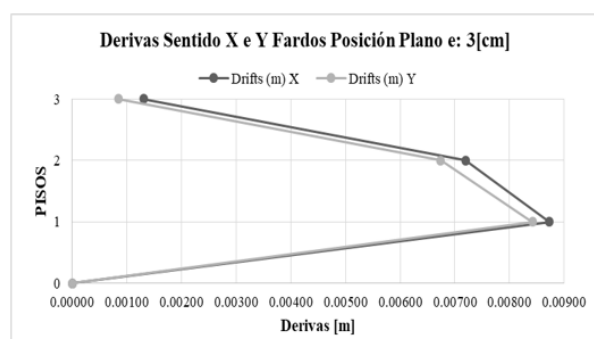


Figura 19: Deriva de piso sentido x e y para modelo fardos posición plano e: 3 cm

De los resultados obtenidos para derivas inelásticas máximas, se puede analizar que la mismas se reducen para posición de plano en sentido x en 4,08 % y en sentido y en 4,23 %, posición de canto en sentido x en 14,77 % y en sentido y en 14,43 % cuando se emplean fardos con un espesor de recubrimiento de 4 cm, por consiguiente, se obtienen mejores resultados cuando el revoco es mucho mayor como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7: Derivas inelásticas máximas

Espesor (cm)	Posición			
	Plano		Canto	
	x	y	x	y
3	1,96 %	1,89 %	2,03 %	1,94 %
4	1,88 %	1,81 %	1,73 %	1,66 %
mínimo	1,88 %	1,81 %	1,73 %	1,66 %

3.2. Discusiones

3.2.1. Densidad aparente corregida

Réseau Francais RFCP [43], RB473 [27] y [40], coinciden en que para el empleo del fardo de paja como material para la construcción, se debe cumplir con una densidad de entre $80\text{--}120\text{ kg/m}^3$. Si se empleara el fardo tomando en consideración los valores, previa corrección por humedad, se obtiene que el promedio general de densidades con respecto al límite máximo permisible cumple con este requisito en un 82,52 %, es decir un porcentaje aceptable e idóneo. No obstante, es necesario realizar la corrección por humedad debido a las consecuencias que conlleva el uso de fardos húmedos, por tal motivo al realizar la corrección por humedad el cumplimiento de este requisito y que se visualiza en la Figura 15 se disminuye en un 74,03 %. Cabe recalcar que este último porcentaje representa la densidad promedio aparente de $88,83\text{ kg/m}^3$. Investigaciones como las de varios autores, [16], [44], caracterizan al fardo previo a su uso con un contenido de humedad general de 11,02–19 %, es decir, superior al valor representativo usado en la presente investigación y para densidad promedio $84,75\text{ kg/m}^3$.

3.2.2. Contenido de humedad

Según varios autores [45], [27] y Resa [46], para el uso de fardos en la construcción estos deben cumplir con un contenido de humedad menor al 15 %, se puede observar en la Figura 14 que las muestras cumplen con dicho requisito. Por ende la caracterización del fardo de paja sigue un cumplimiento totalmente aceptable.

3.2.3. *Módulo de elasticidad de fardo de paja sin revoco*

En la Figura 16 se presenta los resultados correspondientes a la determinación del módulo de elasticidad de los fardos de paja sin la aplicación de un revoco, de acuerdo al modelo propuesto Maraldi [40] de predicción de módulo de elasticidad en función de la densidad del material, los resultados obtenidos identifican a un material con un módulo pequeño de entre 0,052–0,06 MPa característico de un espécimen totalmente flexible que incursiona en el rango no lineal de manera brusca debido a las solicitaciones de carga. En el caso de Maraldi [41] obtienen resultados entre 0,08–0,11 MPa, valores más altos debido a la densidad superior de 146,1 kg/m³ por encima con respecto a la del presente trabajo que fue de 88,83 kg/m³, corroborándose la relación que afirma que el módulo aumenta a medida que la densidad de este material es mayor, lo que se relaciona típicamente con una mejora en el comportamiento del material.

3.2.4. *Módulo de elasticidad de fardo de paja revocado*

Debido a este comportamiento impredecible por la constitución propia del fardo, varios investigadores citados anteriormente recomiendan la caracterización del fardo de paja con un mortero de recubrimiento, evidentemente el módulo de elasticidad para este caso aumenta, debido al cambio a material compuesto. Tal como se evidencia en la Tabla 6 el valor máximo del módulo de elasticidad en fardo desnudo (no revocado) fue de 0,10 MPa, este valor aumenta considerablemente cuando el fardo es analizado individualmente con un revoco donde el módulo máximo obtenido es de 18,67 MPa.

3.2.5. *Esfuerzo a compresión de fardos de paja*

Para el caso de esfuerzo a compresión se obtiene que para fardos en posición plano con espesor de 3 cm se reduce 9,86 % la resistencia con respecto a fardos con espesor de 4 cm; para el caso de fardos en posición canto con espesor de 4 cm se reduce en 12,29 % la resistencia con respecto a fardos con espesor de 4 cm.

3.2.6. *Relación Densidad Vs Módulo de Elasticidad*

Referido a la Figura 18 se puede afirmar que la relación presentada por Maraldi [40] denominada “*Assessment and modelisation of the mechanical performance of straw bales for use in construction*” donde establecen una relación directamente proporcional entre el modulo de elasticidad del fardo en función de la densidad del mismo; se cumple para el presente estudio.

4. Conclusiones

Los fardos en posición canto presentan un mejor comportamiento del material, debido a su aumento en el módulo de elasticidad, por otro lado para fardos en posición plano su módulo es más pequeño pero resisten mejor las solicitaciones a compresión; esto significa que se puede disponer los fardos en posición plano debido a que estos resisten mucho más, pero también se puede considerar el empleo en posición canto por ahorro de espacio en el área de emplazamiento de una vivienda, tomando en cuenta la configuración arquitectónica.

Respecto al comportamiento mecánico general de los fardos de paja se puede concluir que la configuración de los fardos puede generar la suficiente rigidez para que esta sea capaz de soportar cargas producidas por un muro portante, de tal forma que su resistencia esta en función de su posicionamiento (plano-canto), sus dimensiones, densidad, el pretensionamiento de las cuerdas de los fardos y fundamentalmente por el espesor de recubrimiento que se le aplique.

El control de la forma y dimensiones estándar de los fardos de paja representan un aspecto importante para el aseguramiento de mejores resultados estructurales, la forma de los fardos y particularmente su esbeltez influye directamente en la rigidez de un muro hecho a base de este material.

La falta de un control estricto sobre las dimensiones de los fardos y por consiguiente su densidad, afecta en ultima instancia a las propiedades mecánicas de los mismos, razón por la cual los resultados fueron bastante variables y apenas controlables en un fardo con respecto a otro. Este problema debe solucionarse en la producción,

de esta manera se asegura la repetibilidad de los resultados post-ensayo destructivo referido al comportamiento mecánico del fardo de paja. Es decir la caracterización del material y el comportamiento mecánico están directamente relacionados.

La caracterización física realizada en los fardos locales cumplen con los requisitos previos a su uso en la construcción, este comportamiento favorable en conjunto con las propiedades mecánicas se comprueba con los resultados obtenidos en la modelación, puesto que de la simulación realizada mediante software ETABS se concluye que las derivas inelásticas máximas de la vivienda tipo son menores al 2 % para los casos de sentido plano y canto en sentido x e y con espesor de 3–4 cm, por lo que cumple con los requisitos constructivos establecidos por NEC “Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente” y por consiguiente el material es apto para su uso en la construcción.

Se obtuvieron mejores resultados a compresión a medida que el espesor del revoco aumenta, registrando un incremento de resistencia del 36,29 % en posición plano cuando el revoco pasa de 3 a 4 cm, así como un crecimiento del 53,93 % en posición canto cuando el revoco aumenta.

Los resultados servirán para aumentar el conocimiento general de la construcción con fardos de paja y su comportamiento estructural, a su vez ayudará a aumentar la credibilidad de uso aplicando este material como una técnica de construcción convencional y proporcionará una base para las futuras investigaciones sobre el rendimiento estructural de paredes de fardos revocados en el país.

5. Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, “Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo (ENEMDU), diciembre 2019, Ecuador,” Gobierno de Ecuador, Reporte Técnico, 2019.
- [2] RIMISP, “Pobreza y Desigualdad. Informe Latinoamericano,” Centro Latinoamericano para el desarrollo rural, Reporte Técnico, 2019.
- [3] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, “Las Condiciones de vida de los Ecuatorianos. Resultados de la Encuesta de Condiciones de Vida-Quinta Ronda, Ecuador,” Gobierno de Ecuador, Reporte Técnico, 2010.
- [4] Ministerio de Agricultura y Ganadería MAGAP, “Sistema de información pública agropecuaria. Boletín Situacional. Trigo, Ecuador,” Gobierno de Ecuador, Reporte Técnico, 2017.
- [5] E. Cabezas and A. Sotelo, “Relación del sector agrícola del trigo en la producción de harina en la provincia de Pichincha-Ecuador,” Trabajo Especial de Grado para optar al título de Economista, Universidad Central del Ecuador, 2017.
- [6] M. Villegas and G. Rodríguez, “Cambios en la estructura de créditos hipotecarios ecuatorianos luego de la aplicación de políticas públicas habitacionales. Período 2005–2015,” Trabajo Especial de grado para optar al título de Magister en Finanzas, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, 2017.
- [7] C. Martínez, “Estudio y Aplicaciones de las Construcciones con fardos de paja,” Trabajo de grado para optar al grado en Fundamentos de Arquitectura, Universidad de Valladolid, 2019.
- [8] B. Jones, *Building with Straw Bales: A Practical Manual for Self-Builders and Architects*. United Kingdom: Green Books, 2015.
- [9] V. Ponce, “Análisis de eficiencia energética de muro con fardos de paja y revoques de tierra cruda,” Trabajo para optar al grado de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 2017.
- [10] G. Minke and F. Manlke, *Manual de Construcción con fardos de paja*. Uruguay, Montevideo: Editorial Fin de Siglo, 2006.
- [11] M. Bernal y E. Montañez, “Uso de la paja en la construcción de panales aislantes o estructurales, aprovechamiento de residuos de cereales de la agricultura,” Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales, Universidad Militar Nueva Granada, 2018.
- [12] J. Pachala and H. Rosero, “Sistema Constructivo de casas unifamiliares con muros de paja portantes,” Tesis de Maestría, Universidad Central de Ecuador, 2016.
- [13] F. Pauta, “La sostenibilidad en la construcción desde las perspectivas de la ordenación territorial y urbanística en Ecuador,” *Estoa. Revista De La Facultad De Arquitectura Y Urbanismo De La Universidad De Cuenca*, vol. 3, no. 4, pp. 55–69, 2014.
- [14] V. Arroba, L. Morales, y J. Monzo, “Diseño y caracterización de un compuesto a base de cal, cemento y fibras naturales para edificaciones,” in *VII Congreso REDU Universidad Yachay Tech, Urcuquí, Ecuador*, ser. Diseño, Arte, Geo-Ciencias, Arqueología, Paleontología, Arquitectura, Patrimonio, Ciudad y Territorio, Geo-Parques, S. Agathos, M. Cevallos, F. Alexis, G. Salum, J. Chacon, A. Sommer, E. Piispa, M. Larrea, M. Alonso, J. Ventura, I. Pineda, O. Chang, y C. Serrano, Ed., vol. 1, 2019, pp. 903–910.

- [15] R. Nitzkin and M. Termens, *Casas de Paja, una Guía para autoconstrucción*. Ediciones EcoHabitar, 2010.
- [16] G. Garas, M. Allam, H. El Kady, and A. El Alfy, "Compressibility of single un-rendered rice straw bales: Characteristics of bales used for building," *ARPVN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 5, no. 5, pp. 84–99, 2009.
- [17] M. Maraldi, L. Molari, and G. Molari, "Construction for Sustainability, Green Composites, Materials and Technologies," in *16 th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (16th NOCMAT 2015) Winnipeg, Canada*, ser. The Alternative Villages, K. Dick, D. Ruth, D. Mann, F. Delijani, M. Friesen, C. Cowan, A. Skrabek, J. Premak, N. Balakrishnan, M. Riesmeyer, M. Wurkat, Ed., vol. 1. University of Manitoba, 2015, pp. 1–7.
- [18] I. Romans, M. Iborra, y A. López, "Estudio y Análisis de la construcción con balas de paja. Comparación del sistema estructural CUT con la construcción convencional de H.A," Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2014.
- [19] M. Cebada-Sánchez, "Construir con balas de paja," *CERCHA Revista de Arquitectura Técnica*, vol. 1, no. 132, pp. 74–77, 2017.
- [20] C. Rodríguez y G. Lira, "Construcción con fardos. Una alternativa para la Región de la Araucanía ," Tesis de Maestría, Universidad de la Frontera, Temuco, Chile, 2007.
- [21] S. Vardy and C. MacDougall, "Compressive Testing and Analysis of plastered Straw Bales," *Journal of Green Building*, vol. 1, no. 1, pp. 63–79, 2006.
- [22] NEC-SE-DS., *Norma Ecuatoriana de la Construcción. Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente*, Ecuador, Ministerio del Desarrollo Urbano y Vivienda, Gobierno de la República de Ecuador, 2015.
- [23] NTE INEN 2380, *Cemento Hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011.
- [24] ASTM C1157M-17, *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [25] ASTM C207-18, *Standard Specification for Hydrated Lime for Masonry Purposes*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [26] NTE INEN 247, *Cal hidratada para uso en mampostería. Requisitos*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2015.
- [27] International Code Council, Inc, *2015 International Residential Code*. International Code Council, Inc, 2016, ch. Appendix S Strawbale Construction.
- [28] B. Avon and B. Swartchick, "Straw bale seismic design capacities 2," SENIOR DESIGN PROJECT REPORT, Santa Clara University, 2014.
- [29] A. Solé, "Muros estructurales de fardos de paja: Relación entre los esfuerzos axial y cortante en muros de carga de fardos precomprimidos y revestidos con mortero de cemento," Tesis de Maestría, Universidad Politècnica de Catalunya., 2014.
- [30] NTE INEN 3124, *Obtenido de Hormigón. Elaboración y curado de especímenes de ensayo en el laboratorio*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017.
- [31] ASTM C192M-18, *Standard Practice for Preparation and Curing of Concrete Specimens for Laboratory Testing*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [32] NTE INEN 2518, *Morteros para unidades de mampostería. Requisitos*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010.
- [33] ASTM C270-19ae1, *Standard Specification for Mortar Unit Masonry*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [34] NTE INEN 1573, *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010.
- [35] ASTM C31/C31M-19a, *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes.*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [36] ASTM C496/C496M-17, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [37] ASTM C511-19, *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [38] ASTM 469/C469M-14, *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*, Ecuador., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [39] Sistema Nacional de Información, "Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial. Obtenido de Parroquia Calacali, Ecuador." Gobierno de la República de Ecuador, Reporte Técnico, 2015.
- [40] M. Maraldi, L. Molari, G. Molari, and N. Regazzi, "Construction for Sustainability, Green Composites, Materials and Technologies," in *17 th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (17th NOCMAT 2017) Mérida, Yucatán, México, November 26th-29th, 2017*, ser. Construction materials and technologies to deliver affordable housing, P. Herrera, G. Canché, P. González, A. Valadez, F. Avilés, C. Rios, J. Uribe, J. Carrillo, and E. Flores, Eds. CICY CONACYT, 2017, pp. 242–254.
- [41] M. Maraldi, L. Molari, and G. Molari, "Analysis of the parameters affecting the mechanical behaviour of straw bales under compression," *Biosystems Engineering*, vol. 160, no. 1, pp. 179–193, 2017.

- [42] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, *Guía de diseño. Guía práctica para el diseño de estructuras de madera, de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015*. Ecuador, 1era ed., Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI, 2016.
- [43] Réseau Français de la construction en paille, *Règles professionnelles de construction en paille. Remplissage isolant et support d'enduit*, 2nd ed. Francia: Moniteur, 2014.
- [44] H. Abba and M. Abbagana, "Compressive Strength Testing of plastered straw bale," *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 554–568, 2015.
- [45] L. Viera, O. Coox, and J. Rivera, "Determinación de la inercia, conductividad y transmitancia térmica de mampuestos producidos en el cantón Mejía, provincia de Pichincha," Trabajo Especial de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Central del Ecuador, 2019.
- [46] F. Resa, "Propuesta de técnicas de autoconstrucción sostenible en la comunidad Tupí Guaraní Río Banda Sur Iguopeigenda (Argentina)," Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.