

Conference Paper

Structural Modeling of Straw Bale Load-bearing Wall

Modelación estructural de muro portante de fardos de paja

L. P. Viera Arroba^{1,2}, G. D. Pacheco Coronel¹, and J. M. Vásquez Amaguaña^{1*}

¹Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Central del Ecuador.

²Universitat Politècnica de València, Valencia, España

IX CONGRESO
INTERNACIONAL DE
INVESTIGACIÓN DE LA RED
ECUATORIANA DE
UNIVERSIDADES Y
ESCUELAS POLITÉCNICAS Y
IX CONGRESO
INTERNACIONAL DE
CIENCIA TECNOLOGÍA
EMPRENDIMIENTO E
INNOVACIÓN
SECTEI-ESPOCH 2022

Corresponding Author: J. M.
Vásquez Amaguaña; email:
jmvasqueza@uce.edu.ec

Published: 9 November 2023

Production and Hosting by
Knowledge E

© L. P. Viera Arroba
et al. This article is distributed
under the terms of the
[Creative Commons
Attribution License](#), which
permits unrestricted use and
redistribution provided that
the original author and
source are credited.

Abstract

In Ecuador, there are qualitative and quantitative housing deficits that must be covered with materials that produce seismic-resistant, energy-efficient buildings that do not require a large amount of energy to be produced. Several studies indicate that the answer lies in straw bale structures. However, for these to be considered by designers, aids are needed to facilitate their structural modeling in specialized computer programs. Through literature reviews, the present research proposes a model that adapts the specific structural considerations of straw bale buildings to the tools available in a design program.

Keywords: structure, bales, straw, model, program, design.

Resumen

En el Ecuador existe un déficit cualitativo y cuantitativo de viviendas que debe ser cubierto con materiales que produzcan edificaciones sismo resistentes, energéticamente eficientes y a la vez que no requieran gran cantidad de energía para ser producidos. Varios estudios señalan que la respuesta está en las estructuras elaboradas con fardos de paja. Sin embargo, para que éstas sean consideradas por los diseñadores son necesarias ayudas para facilitar su modelamiento estructural en programas informáticos especializados. La presente investigación, a través de revisiones bibliográficas, propone un modelo que adapta las consideraciones estructurales específicas de las construcciones con fardos de paja a las herramientas disponibles en un programa de diseño.

Palabras Clave: estructura, fardos, paja, modelo, programa, diseño.

1. Introducción

Según el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda del Ecuador, en el país hacen falta 2.7 millones de viviendas [1]. Para cubrir esta demanda, los materiales de construcción más utilizados son el acero y el cemento [2]. Sin embargo, estos son cada vez más costosos [3]. Esto es un gran problema, ya que Ecuador se ubica en el “Cinturón de Fuego del Pacífico” que es una zona muy propensa a terremotos [5]. Por esta razón todas las estructuras que se construyen aquí deben tener un cálculo estructural de respaldo que garantice su sismo resistencia.

 OPEN ACCESS



También se debe considerar que el cemento y el acero para su producción requieren gran cantidad de energía, la cual proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles, produciendo gases de efecto invernadero causantes del cambio climático [6].

Ante esta problemática urgen propuestas para realizar construcciones que sean económicas, sismo resistentes y ecológicas [7]. Una alternativa puede ser la construcción con fardos de paja, este material ha demostrado tener excelentes cualidades físicas y mecánicas además de ser secuestrador de dióxido de carbono (CO₂), y necesitar muy poca energía para ser producidos [8].

En el Ecuador existen sembradas 15000 hectáreas de cebada [9] y 6880 hectáreas de trigo [10]. Después de la cosecha de estos cereales se obtiene como desecho la paja, la cual podría ser utilizado para construir viviendas resistentes a sismos a costos más bajos [11]. El uso de la paja, producida en el país, ha sido estudiada determinando su factibilidad para ser usada en forma de fardos como material de construcción [8,12,13]. No obstante, para poder facilitar su introducción en la industria de la construcción, es necesario ayudar a que los diseñadores estructurales puedan modelar elementos resistentes a carga realizados con fardos de paja. Es común que los ingenieros civiles usen programas informáticos para este efecto. Uno de los más difundidos es el Seismic Analysis Structure SAP 2000 [14].

Ante la problemática planteada, este trabajo busca aportar con una metodología de modelamiento que permita el uso del SAP 2000 en el análisis de estructuras de fardos de paja. Para ello, se toma como estructura tipo un muro construido con marco de madera, relleno de paja y revocado con mortero de cal, cemento y arena [12]. (Figura 1).

Para cumplir el objetivo planteado, se ha tomado referencias de resultados experimentales realizados con estructuras similares a la analizada. Por ejemplo, según un estudio realizado en el año 1999 [15], sobre el desempeño sísmico de dos paredes de un piso hechas con fardos de paja que fueron sometidas a cargas laterales cíclicas repetidas, los revestimientos son la parte que más resiste ante carga lateral, el muro de paja es flexible y el marco de madera transmite poca fuerza lateral [15,16]. Así también, la investigación realizada por Solé 2014, relaciona los esfuerzos axial y cortante en muros estructurales de fardos de paja pre comprimidos y revestidos con mortero de cemento y, a través de modelos de cálculo de elementos finitos llegan a determinar que los muros de fardos de paja soportan adecuadamente las cargas gravitatorias y horizontales [17].

A nivel del Ecuador, Aguirre 2021, estudia los fardos de paja como un material de construcción alternativo y determina que su comportamiento estructural cumple los requerimientos constructivos establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción "Cargas Sísmicas Diseño Sismo Resistente" [18]. Además, Pachala 2016, realiza la

primera investigación documentada en el país sobre los fardos de paja como material para la construcción logrando construir una estructura segura, técnica y económicamente viable [19].

Como resultado de la presente investigación se obtiene parámetros de diseño estructural aplicables a las opciones y recursos que tiene el SAP 2000 para el modelamiento de estructuras.

2. Materiales y Métodos

El modelo del muro que se estudiará (Figura 1) está basado en experiencias constructivas y en recomendaciones dadas por literatura especializada en construcción de edificaciones con fardos de paja [20,21,22,23]. Es así que, se planteó una estructura compuesta por un marco conformado por escalerillas de madera y tableros OSB (Oriented Strand Board) [24]. El cuerpo del muro lo constituye fardos de paja confinados dentro del marco, además, se considera que las caras del muro están revocadas con mortero de cal, cemento, arena y fibras [12].

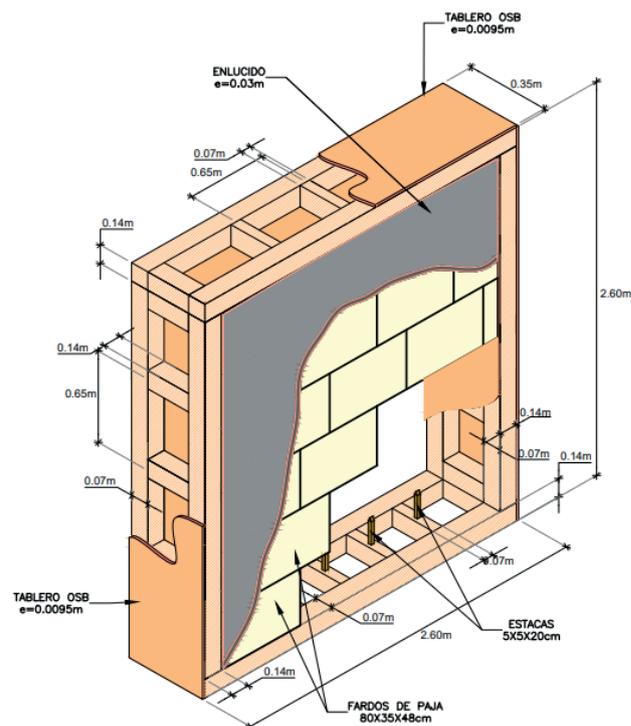


Figura 1

Muro de fardos de paja.



Para modelar el marco del muro (Figura 1), usando el software SAP 2000, se consideró una sección hueca de 35cm*15cm*1.85cm (Figura 2) que representa a las escalerillas de madera con tapas de OSB. Esta sección es resultado de la investigación realizada en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE [25], con datos experimentales obtenidos de una edificación de fardos de paja de configuración similar a la que se plantea en el presente estudio.

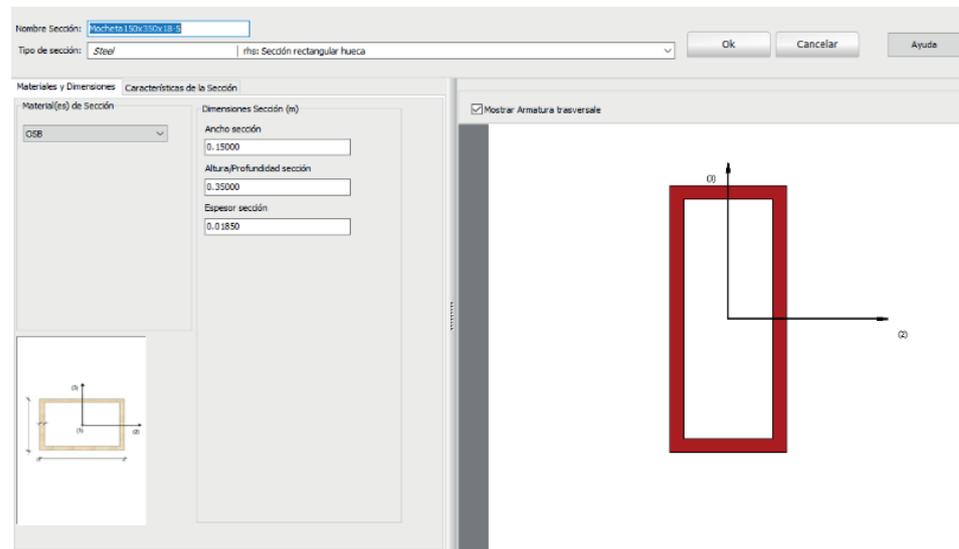


Figura 2

Sección equivalente [25].

Para representar el cuerpo del muro en la modelación se consideró que los fardos de paja trabajan como un puntal a compresión de largo 368 cm, ancho de 43 cm y un espesor de 35 cm (Figura 3). Este puntal representa un modelo elástico lineal, similar a lo que se modela en un pórtico de hormigón y mampostería de bloques [26].

Para el cálculo del ancho del puntal se aplicaron las ecuaciones recomendación por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias FEMA 356 - 2 000, donde: α = ancho del puntal [cm]; h_{col} = alto de pie a cabeza de columna [cm]; L = longitud del puntal [cm]; E_{me} = módulo de elasticidad esperado de la mampostería [Kg/cm^2]; t_{infill} = espesor de la mampostería [cm]; θ = ángulo entre el alto y el largo de la mampostería [$^\circ$]; E_{fe} = módulo de elasticidad esperado de la columna [Kg/cm^2]; I_{col} = Inercia de la columna [cm^4]; h_{infill} = alto de la mampostería [cm]; λ_1 = factor dependiente de la mampostería y columna [26].

$$\alpha = 0.175(\lambda_1 h_{col})^{-0.4} L(1)$$

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me} t_{infill} \sin 2\theta}{4 E_{fe} I_{col} h_{infill}} \right]^{1/4} \quad (2)$$

Nótese que los valores del módulo de elasticidad considerados corresponden a la mampostería de fardos de paja y a la columna respectivamente, obteniéndose así un ancho de puntal de 43 cm (Tabla 1).

Tabla 1

Parámetros considerados para representar la mampostería como un puntal.

Parámetro	Valor	Unidad
α	43.00	cm
f	0.175	
h_{col}	260.00	cm
L	367.70	cm
E_{me}	159.89	kg/cm ²
t_{infill}	35.00	cm
θ	45.00	°
E_{fe}	15 297.70	kg/cm ²
I_{col}	24 718.20	cm ⁴
h_{infill}	260.00	cm
λ_1	0.01	

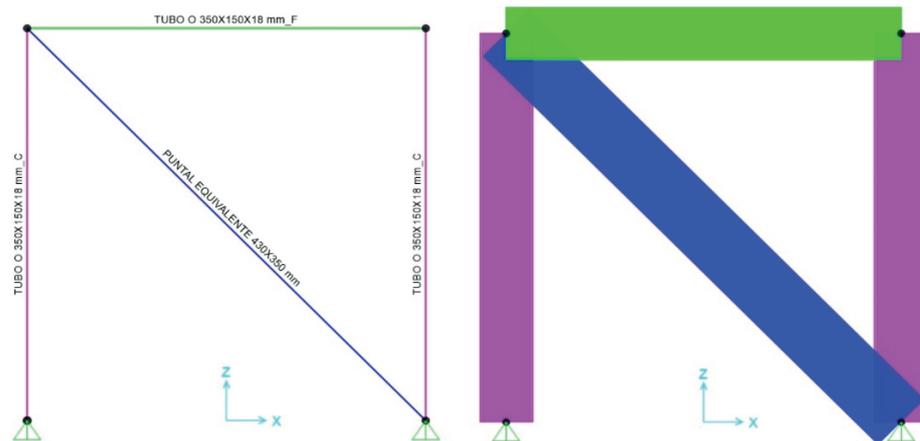


Figura 3

Configuración del modelo.

En la (Figura 3) también se presenta la configuración general del modelo en estudio. No se consideró la escalerilla inferior ya que no trabaja a cortante ni a compresión, pero es necesario en el modelo constructivo para conformar el marco de muro y sujetarlo mediante este elemento a la cimentación que generalmente es de hormigón. Dado que la estructura del muro y las cargas que se aplican en él están en el plano XZ los elementos tipo frame se analizaron en dos dimensiones, además, los apoyos de la estructura son fijas en ambas bases.



3. Resultados y discusión

Luego de elaborar el modelo, como se detalló en la sección anterior, se aplicaron cargas gravitacionales uniformemente distribuidas, consistentes a las aplicadas en el experimento de Michael Faine Y John Zhang, 2002 y se obtuvieron deformaciones negativas verticales en el plano XZ (Tabla II).

Tabla 2

Parámetros considerados para representar la mampostería como un puntal.

Carga Aplicada (kg/m)	Deformación (mm)		
	Izquierda	Derecha	Promedio
0,00	0,00	0,00	0,00
167,31	0,20	0,30	0,25
348,47	0,40	0,60	0,50
777,26	1,00	1,20	1,10
1 170,16	1,50	1,90	1,70
1 540,99	2,00	2,50	2,25
1 977,31	2,60	3,20	2,90
2 368,45	3,10	3,80	3,45
2 860,34	3,70	4,60	4,15
3 456,84	4,10	5,10	4,60
3 546,45	4,60	5,70	5,15
3 943,79	5,10	6,30	3,20
4 340,89	5,60	7,00	6,30
4 734,50	6,10	7,60	6,85
4 933,31	6,40	7,90	7,15

En la tabla anterior se puede apreciar que las deformaciones son directamente proporcionales al incremento de la carga gravitacional impuesta.

Las deformaciones obtenidas en el estudio “A Pilot Study examining and comparing the load bearing capacity and behaviour of an earth rendered straw bale wall to cement rendered straw bale wall” [27], varían entre 0 - 112 mm, en función de la carga aplicada. Por otro lado, en la presente investigación se obtuvieron deformaciones de 0 - 7.15mm. Esta variabilidad puede atribuirse a que en el modelo experimental no se utilizaron elementos estructurales rígidos, como las escalerillas utilizadas en vigas y columnas.

Además, se realizó una simulación de carga lateral, basada en el estudio “Racking shear resistance of prefabricated straw-bale panels [28], donde se analizan las deformaciones horizontales a distintas magnitudes de carga. Al imponerse una carga de 10 kN los autores registraron una deformación lateral de 10 mm. Al aplicar esta misma carga



sobre el modelo que se propone en este trabajo, se obtiene que el comportamiento del muro es consistente en el plano de carga, con una deformación de 19,55 mm.

4. Conclusiones

El modelo presentado en este trabajo es consistente con los resultados obtenidos en investigaciones experimentales realizadas por los autores antes citados, además se concluye que el modelo descrito en la presente investigación puede ser utilizado por diseñadores estructurales que requieran usar un programa de diseño estructural, como por ejemplo SAP 2000 para modelar estructuras de fardos de paja que estén conformadas por muros reforzadas con columnetas en forma de escalerilla y tapas de OSB.

Para facilitar la modelación estructural es recomendable utilizar elementos tipo "wall". Esto se logra calibrando el modelo. Variando el módulo de elasticidad del material de la mampostería. De modo que el pórtico relleno asemeje los desplazamientos obtenidos mediante el método del puntal equivalente; obteniendo así, resultados comparativos como los desplazamientos o derivas de piso según la normativa a considerar.

References

- [1] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. Déficit Habitacional Nacional. [Internet]; 2020 [cited 2022 August 28. Available from: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/deficit-habitacional-nacional/>
- [2] Diario El Universo. El hormigón es el mas usado para construir viviendas en Ecuador.; 2018 [cited 2022 October 28. Available from: <https://www.eluniverso.com/noticias/2018/09/14/nota/6951929/hormigon-es-mas-usado-construir-viviendas-ecuador/>
- [3] Plaza A. Los precios de los materiales de construcción se disparan: "Si seguimos así, la vivienda nueva subirá mas". Quito; 20 [cited 2022 August 25. Available from: https://www.eldiario.es/economia/precios-materiales-construccion-disparan-si-seguimos-vivienda-nueva-subira_1_8149821.html
- [4] Diario La Hora. 1,5 millones de ecuatorianos viven hacinados y en casas 'autoconstruidas' [1,5 millones de ecuatorianos viven hacinados en casas 'autoconstruidas']. Quito; 2022 [cited 2022 August 30. Available from: <https://n9.cl/2blrt>
- [5] NotiAugust 30. Available from: <https://actualidad.rt.com/actualidad/261428-ecuador-tercer-pais-mas-volcanes-mundo>



- [6] BBC NEWS. La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías.; 2018 [cited 2022 August 30. Available from: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- [7] Chang Y, Ries R, Wang Y. The quantification of the embodied impacts of construction projects on energy, environment, and society based on I-OLCA. *Energy Policy*. 2011;(October):39.
- [8] Viera P, Rivera J, Coox O, Monzó J. Thermal conductivity of straw bales and other materials used in Ecuador's masonry by the thermal needle probe method. *Revista Científica Tecnológica Departamento Ingeniería de Obras Civiles*. 2021 agosto; 11(1/2021).
- [9] Moreta M. La siembra de cebada se extiende a 15000 hectáreas en 8 provincias. 2022 [cited 2022 August 30. Available from: <https://n9.cl/ye6wta>
- [10] Diario El Comercio. Agricultores carchenses reviven la producción del trigo nacional. 2021 [cited 2022 agosto 28. Available from: <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/agricultores-carchi-produccion-trigo-sierra.html>
- [11] Universidad de Nevada. Reno. Straw Bale house survives violent shaking at earthquake lab. [Internet].; 2009 [cited 2022 August 25. Available from: <https://www.sciencedaily.com/releases/2009/04/090403104229.htm>
- [12] Viera P, Aguirre D, Monzó M. Determination of the characteristics of the wheat straw bale, as a agro-industrial waste for use as a construction material. *Revista Ingeniería Universidad de Carabobo*. 2020 diciembre; 27(3).
- [13] Viera P. Factibilidad de construcción de viviendas sismo resistentes en la zona andina del Ecuador utilizando fardos de paja. *CAMICON*. 2020 November;8(8).
- [14] CSI SPAIN. [SAP 2000]. 2022 [cited 2022 August 28. Available from: <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000>
- [15] Ramírez JC. Cyclic in-plane testing of post and beam walls with straw-bale in-fill and stucco / Plaster. 1999.
- [16] Ash C, Aschheim M, Mar D, King B. Reversed cyclic in-plane tests of load-bearing plastered Straw Bale Walls. In *13th World Conference on Earthquake Engineering*; 2004; Vancouver:15.
- [17] Solé Neila A. Murs estructurales de bales de palla: relació entre l'esforç axial i tallant en murs de càrrega de bales de palla precomprimits i revisits amb morter de ciment. 2014.
- [18] Aguirre Zambrano D. Determinación del módulo de elasticidad de fardos de paja, para definir su comportamiento estructural como material de construcción



- alternativo. Trabajo de Titulación modalidad proyecto de investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil. Quito: Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas; 2021.
- [19] Pachala Curi L. Sistema constructivo de casas unifamiliares con muros de paja portantes. 2016.
- [20] Pete Walker A, Thomson D. Maskell. Straw bale construction. *Nanconventional and Vernacular Construction Materials*; 2020.
- [21] Xunzhi Y, Mike L, Maskell D. Straw bale construction in northern China - Analysis of existing practices and recommendations for future development. *Journal of Building Engineering*. 2018;18:408–417.
- [22] Platt S, Maskell D, Walker P. Laborel-Préneron A. Manufacture and characterisation of prototype straw bale insulation products. *Constr Build Mater*. 2020;262(120035).
- [23] Nitzkin R, Termens M. Casas de paja. Una guía para autoconstructores. EcoHabitar Visiones Sostenibles S.L. ed. España; 2016.
- [24] NaturallyWood. [Tablero de Virutas Orientadas OSB]; S.F. [cited 2022 August 28. Available from: <https://www.naturallywood.com/products/oriented-strand-board/>
- [25] García Peñaloza MA. Validación analítica de resultados experimentales de vibración ambiental de casas realizadas con fardos de paja y mochetas de madera. Maestría de Investigación en Ingeniería Civil Mención Estructuras. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas, Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología; 2022.
- [26] Viera P, Caiza P. Diseño de mampostería de relleno en base a la experiencia del sismo de 16 de abril del 2016. Proceedings of the “Second Annual State-of-the-Art in Civil Engineering Structures and materials”. 2016 July.
- [27] Faine M, Zhang J. A Pilot Study examining and comparing the load bearing capacity and behaviour of an earth rendered straw bale wall to cement rendered straw bale wall. International Straw Bale Building Conference. 2002 December.
- [28] Lawrence M, Drinkwater L, Heath A, Walker P. Racking shear resistance of prefabricated straw-bale panels. *Construction Materials*. 2008 December; 162(800023).
- [29] López Letón S. [Las casas de paja viven su momento más dulce]. Madrid; 2021 [cited 2022 August 25. Available from: <https://elpais.com/economia/2021-01-15/las-casas-de-paja-viven-su-momento-mas-dulce.html>
- [30] MIDUVI. Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente NEC-SE-DS. Norma Ecuatoriana de Construcción. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda; 2015.