



## Trabajo Fin de Grado

Muros estructurales de balas de paja: Estudio de diferentes soluciones constructivas

Structural walls of straw bales: study of different constructive solutions

Autor/es

**CARLOS SALINERO ASO**

Director/es

Sergio Puértolas Broto

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)  
Año 2018

## Resumen

La construcción con balas de paja es una alternativa sostenible de bajo coste que asegura un excelente rendimiento térmico. Estas características hacen de los residuos derivados de la agricultura, un material muy interesante para la edificación. En las últimas dos décadas se han realizado investigaciones y proyectos piloto en todo el mundo. La mayor parte de las investigaciones realizadas hasta el momento se centran en determinar el comportamiento mecánico de las balas de paja. Se ha publicado un gran número de artículos que han aportado resultados relevantes acerca de la densidad de las balas, dimensiones y orientación óptima [1], módulo de Young de las balas de paja y coeficiente de Poisson [2], coeficiente de rozamiento. Etc. Por otro parte se ha estudiado cómo se comporta un muro ante distintas cargas y se han analizado sus modos de fallo

Las propiedades de la paja son ideales para utilizarla como aislante térmico en pequeñas edificaciones de hormigón o madera, sin embargo, desde el punto de vista estructural genera dudas. Estudios Anteriores autores analizado la capacidad de las balas de paja para actuar como estructura autoportante, es decir, actuando las balas de paja como elemento estructural. Los resultados muestran problemas de rigidez y de estabilidad que provoca desplazamientos longitudinales (flecha) muy elevados.

Mediante el software de elementos finitos, Abaqus 2017, Se ha tratado de analizar el comportamiento de un muro estructural de balas de paja y comprender las fortalezas y debilidades desde el punto de vista estructural. Los muros de balas trabajan correctamente a compresión, ante cargas altas están muy lejos de la tensión de rotura, sin embargo, ante cargas laterales bajas, como el viento, los muros se descomponen. Para solventar este problema se han planteado dos soluciones constructivas, el uso de barras verticales para unir las balas y el uso de un recubrimiento adecuado que mejore la estabilidad del muro.

Existe documentación y proyectos en los que se han utilizado este tipo de barras para rigidizar la estructura [3]. Sin embargo, no hemos encontrado estudios acerca de la mejora que producen en la estructura. Se han creado varios modelos en los que se estudia como varía la flecha en función del número de barras y su distribución.

Por último, se ha analizado el comportamiento de la estructura con balas y barras al añadirle un recubrimiento exterior e interior. Se mostrará que elegir el recubrimiento adecuado mejora la rigidez y la estabilidad de la estructura. Se muestran las distintas flechas obtenidas para cada una de las configuraciones y se compararan con los exigidos por la normativa de madera.

---

[1] T. Lecompte, A. Le Duigou (2017). Mechanics of straw bales for building applications

[2] Mirko Maraldi, Luisa Molari, Nicolo Regazzi, Giovanni Molari (2016). Method for the characterisation of the mechanical behaviour of straw bales

[3] Xunzhi Yin, Mike Lawrence, Daniel Maskell, Wen-Shao Chang (2018). Construction and monitoring of experimental straw bale building in northeast China

## Índice

Resumen.....	1
Índice.....	2
Introducción.....	3
Método.....	7
Creación de un modelo en Abaqus.....	7
Componentes del modelo.....	7
Tipo de malla utilizada.....	9
Contactos.....	11
Cargas aplicadas.....	12
Forjado.....	12
Carga del viento.....	13
Condiciones de contorno.....	13
Flecha máxima permitida y límite de rotura de las balas de paja.....	13
Simulaciones.....	15
Refuerzo con barras.....	15
Modelo básico.....	15
Modelo dos barras por bala.....	17
Modelo con cuatro barras por bala.....	18
Modelo con pasadores.....	19
Modelo con cuatro pasadores por bala.....	21
Modelo barras pretensadas.....	22
Refuerzo con revestimiento.....	24
Modelo con revestimiento rigidez 1 MPa.....	25
Modelo con revestimiento rigidez 1000MPa.....	26
Modelo con revestimiento rigidez 2000MPa.....	27
Modelo con Recubrimiento y dos barras por bala.....	28
Conclusiones.....	29
Bibliografía.....	31

## Introducción

Los residuos derivados de la producción agraria presentan cualidades muy interesantes para ser utilizada en la construcción. Estos residuos se compactan en módulos llamados balas, las dimensiones de las balas para la construcción son 40x50x100cm, la densidad de las balas es un factor determinante para su uso en la construcción los valores recomendados oscilan entre (50–150 kg/m<sup>3</sup>).

Los muros se crean apilando balas, del mismo modo que si fuesen ladrillos. Cuando ya se han apilado las balas son recubiertas por una malla metálica llamada Tenax. Posteriormente se les aplica un recubrimiento llamado Stucco [4]. Este recubrimiento, de unos pocos centímetros (entre 2 y 6 cm), protege a las balas de la humedad e impide que el oxígeno circule libremente por su interior aumentando su resistencia frente al fuego. Una vez finalizado el proceso, el muro, Posee unas excelentes propiedades como aislante acústico y térmico [5].

En los últimos años, este tipo de construcción ha despertado interés en los investigadores, el número de publicaciones relacionadas con la construcción a base de balas de paja ha aumentado, así como el conocimiento sobre el comportamiento de este tipo de construcción. Se han hecho toda clase de ensayos para cuantificar sus propiedades y establecer que aplicaciones pueden tener para la edificación. Básicamente se podrían dividir en dos aplicaciones: el uso de la paja como aislante térmico y el uso de balas como estructura autoportante

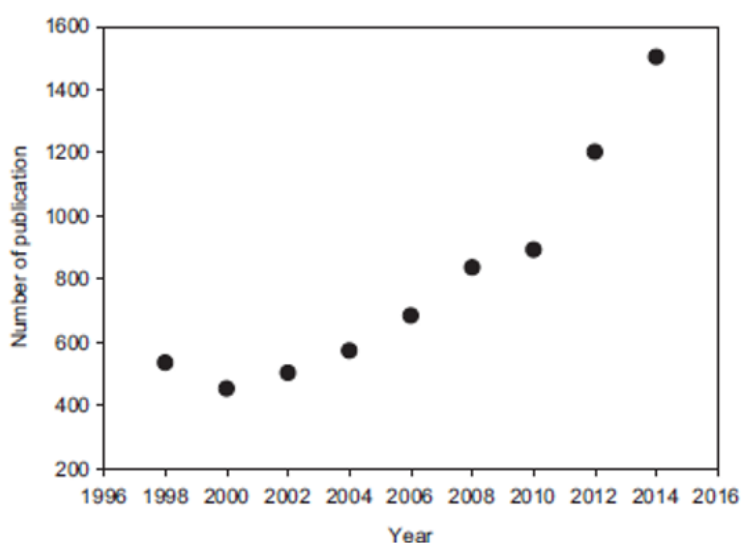


ILUSTRACIÓN 1. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE PUBLICACIONES EN ELSEVIER QUE CONTIENEN LAS PALABRAS: STRAW + BUILDING. RECUPERADA DE: MECHANICS OF STRAW BALES FOR BUILDING APPLICATIONS

T. LECOMPTE, A. LE DUIGOU

[4] Matts Myhrman and S. O. MacDonald (1997). Build it with Bales: A Step-by-Step Guide to Straw-Bale Construction;

[5] Heiko Georg b, Wei Wu (2011). Performance of straw bale wall: A case of study Taha Ashoura,

El uso de la paja como aislante térmico, ha sido utilizado desde la antigüedad, generalmente combinado con estructuras de madera. Hoy en día esta solución sigue estando vigente, y tiene mercado, un buen ejemplo se encuentra en Reino Unido, donde se realizó un proyecto de casas de paja de bajo coste [6]. Este concepto usa módulos prefabricados de balas de paja y madera [7].



ILUSTRACIÓN 2. RECUPERADA DE: DEVELOPMENT AND TESTING OF A PROTOTYPE STRAW BALE HOUSE, KATHARINE WALL, PETE WALKER, CHRISTOPHER GROSS

La segunda aplicación, objeto principal de estudio en este trabajo, es su uso como elemento autoportante. Esta forma de construcción proviene de Nebraska, donde fue utilizada hasta entrado el siglo pasado, sin embargo, con la llegada de nuevos materiales prácticamente desapareció. En las últimas décadas la conciencia medio ambiental y la necesidad de crear edificios sostenibles ha hecho resurgir esta forma de construcción.

Pese a que existen edificaciones con balas de paja como elemento autoportante [8], no existe normativa o código técnico que regule este tipo de construcciones. Esta técnica constructiva plantea preguntas acerca de las dimensiones que puede alcanzar manteniendo su rigidez y estabilidad. Ya que hay muy poca información acerca de edificios de más de una altura.

El objetivo es simular por ordenador el comportamiento de los muros de paja, encontrar una solución que mejore el comportamiento y aportar datos para determinar qué dimensiones podría alcanzar un edificio de estas características. Se comparará el comportamiento de estas paredes con los exigidos por la normativa relativa a la madera, cuyo tipo de construcción puede ser el que más se aproxime al basado en balas de paja [9].

[6] The Guardian, first straw homes go on sale, 9th February 2015

[7] K., Walker, P., Gross, C., White, C., & Mander, T. (2012). Development and testing of a prototype straw bale house Wall

[8] Adrien Chaussinand a, Prof. J.L Scartezzini b, Dr. Vahid Nik (2015).

Straw bale A waste from agriculture, a new construction material for sustainable buildings

[9] UNE-EN 1995-1-2:2011. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera.

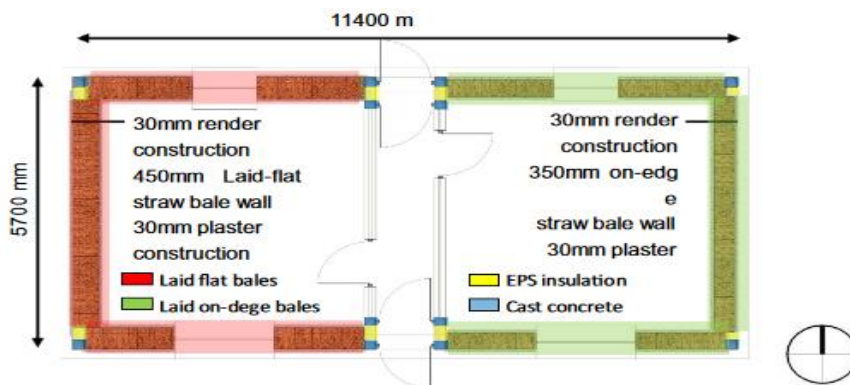


Fig. 2. Floor plan and applied bale stacking.

ILUSTRACIÓN 3. VISTA EN PLANTA DE UN EDIFICIO CONSTRUIDO CON BALAS DE PAJA. RECUPERADA DE: CONSTRUCTION AND MONITORING OF EXPERIMENTAL STRAW BALE BUILDING IN NORTHEAST CHINA. XUNZHI YIN, MIKE LAWRENCE, DANIEL MASKELL, WEN-SHAO CHANG

Las propiedades mecánicas de las balas de paja han sido analizadas en las últimas décadas, así como la densidad, dimensiones y orientación óptima para su uso en construcción. En base a estos estudios experimentales se han escogido valores de las siguientes magnitudes para realizar las simulaciones: módulo de Young, densidad, coeficiente de Poisson y dimensiones comerciales de las balas de paja para su uso en construcción.

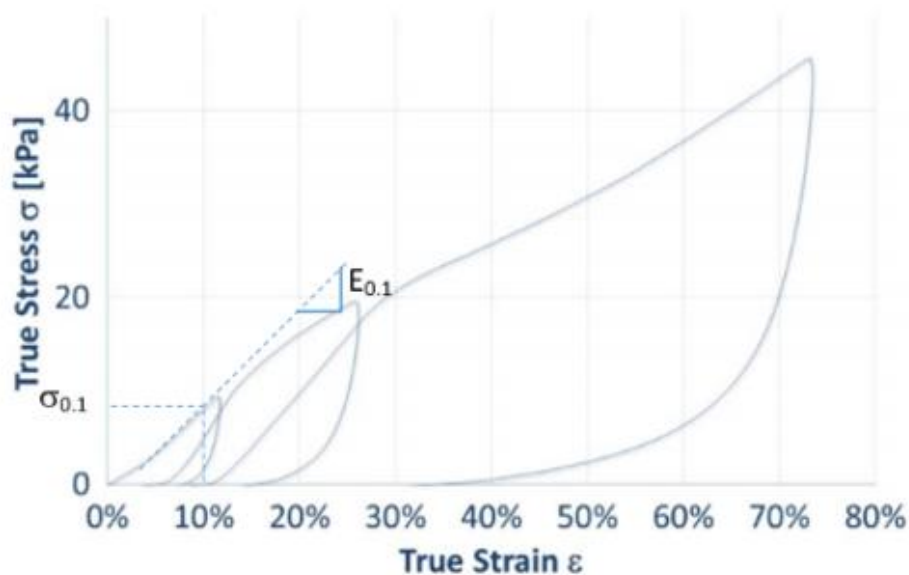


ILUSTRACIÓN 4. CURVA TÍPICA DEL CICLO DE COMPRESIÓN DE UNA BALA DE PAJA. RECUPERADA DE: MECHANICS OF STRAW BALES FOR BUILDING APPLICATIONS

T. LECOMPTE, A. LE DUIGOU

Como ya se ha dicho las propiedades mecánicas de las balas se han estudiado en profundidad en los últimos años. Sin embargo, la mayor parte de los estudios se centran en analizar el comportamiento de un número reducido de balas, existe muy poca documentación acerca del comportamiento de un muro construido con balas de paja. Por esta razón se ha planteado realizar un modelo por ordenador, mediante el uso de un software de elementos finitos, Abaqus, tratando de simular el comportamiento como estructura autoportante ante distintos estados de carga.

De esta manera se han planteado distintas soluciones constructivas para mejorar sus propiedades. El acero se utiliza en el hormigón para mejorar su comportamiento a tracción. Esta analogía es equivalente a la solución utilizada desde la antigüedad para mejorar la estabilidad de las balas. Introducir barras verticales de madera. Partiendo de modelos sencillos con 4 balas y dos barras, se han estudiado como afecta la distribución y número de barras a la estructura. Posteriormente estos modelos han sido probados en modelos complejos de más de 200 componentes.

La mayoría de las construcciones de bala de paja están recubiertas con una mezcla de cemento y cal, llamado stucco, este compuesto se ha utilizado tradicionalmente para proteger a las balas de la humedad. Un estudio realizado en los últimos años [10] indica que los recubrimientos tradicionales a base de cemento y cal aproximadamente tienen un módulo de elasticidad de 1 MPA. En el mismo estudio se analizaron otros recubrimientos. Los más relevantes desde el punto de vista constructivo resultaron ser los recubrimientos de arena y arcilla, los cuales alcanzan un módulo de elasticidad de 2086(MPA). También se comprobó que los recubrimientos a base de arcilla tenían un módulo de elasticidad de 1731 MPA.

Estos datos plantean nuevas vías de desarrollo ya que, utilizando los recubrimientos adecuados, podrían influir en el comportamiento general de la estructura, obteniéndose una mejora sensible en la estabilidad.

Por esta razón se han hecho simulaciones de los modelos con barras, de los modelos con recubrimiento y de modelos con recubrimiento y barras. De este modo podemos obtener una serie de resultados para entender mejor el comportamiento de este tipo de estructuras.

---

[10] Brendon Taylor, Stephen Vardy and Colin MacDougall (2006). Compressive strength testing of earthen plasters for straw bale wall application.

## Método

### Creación de un modelo en Abaqus

El modelo básico está compuesto solamente de balas. Se ha ensamblado un modelo de una luz de 5,5 metros y una altura de 3 metros dichas dimensiones son aproximadamente la distancia entre pilares cubierta por una estructura de hormigón y la altura habitual de un piso. Como se ha dicho este es el primer modelo y más simple y es el punto de referencia desde el cual se han cuantificado las mejores de los siguientes modelos.

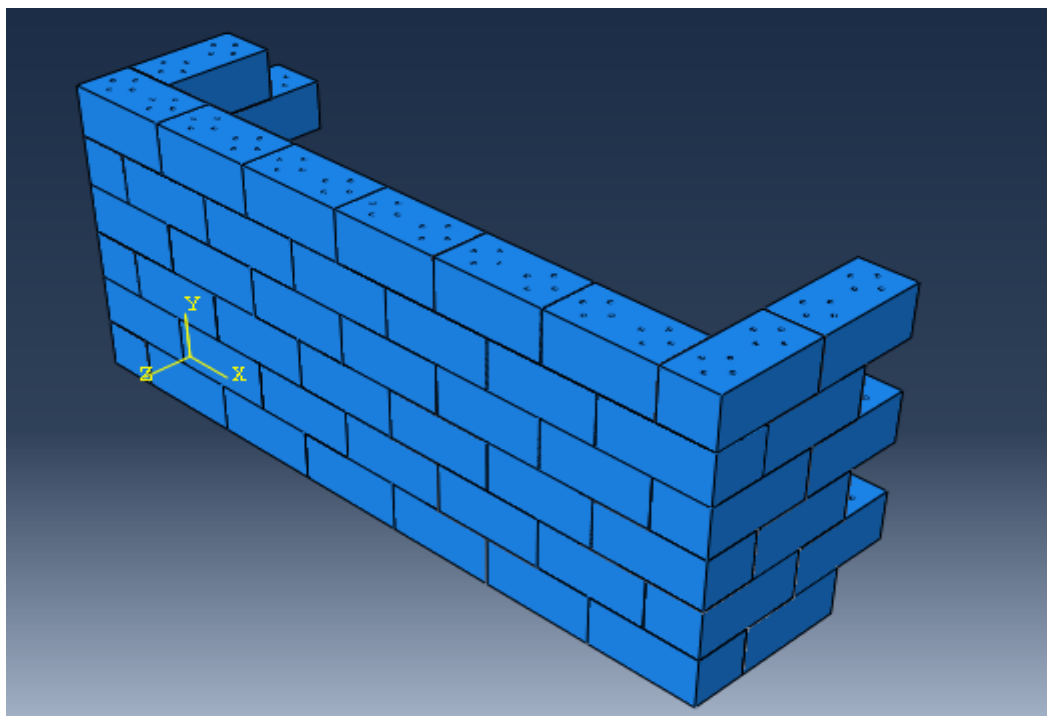


ILUSTRACIÓN 5. MODELO DEL MURO DE BALAS DE PAJA

### Componentes del modelo

Las balas utilizadas son de 100x50x50x cm. Se han perforado para poder introducir las barras. Se puede apreciar que cada bala tiene un total de 8 perforaciones.

Han sido creados distintos modelos de bala, con distinto número de perforaciones y distribución. Finalmente, por simplicidad y reproducibilidad de los modelos se ha optado por utilizar una bala estándar para todos los modelos, con las dimensiones previamente especificadas y con 8 perforaciones distribuidas de la siguiente manera.

El valor de las propiedades mecánicas de las balas se ha obtenido de un estudio anterior [11].

- Densidad de las balas: 122 Kg/m<sup>3</sup>
- Módulo de Young: 260 kPa
- Coeficiente de Poisson: 0.4

[11] Roberto Ascorbe Campo; Sergio Puértolas Broto (2017). Modelado y análisis del comportamiento estructural de edificaciones realizadas con balas de paja.



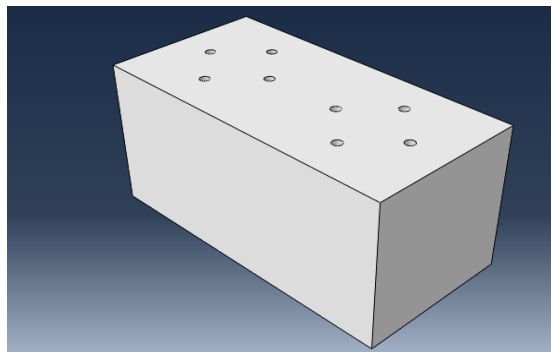


ILUSTRACIÓN 6. BALA DE PAJA

Las barras se han modelado como un componente continuo de 3m de altura y 15 mm de radio se han probado distintas configuraciones de barras huecas y macizas de acero y de madera. Las simulaciones con barras de acero fueron descartadas ya que se producían problemas de convergencia debido a la gran diferencia del valor del módulo elástico.

En el caso de las barras se ha escogido madera de pino. Se ha decidido utilizar este material ya que tiene propiedades mecánicas adecuadas y se ha utilizado tradicionalmente en este tipo de construcciones:

- Resistencia a flexión estática 1057 kg/cm<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidad 94.000 kg/cm<sup>2</sup>
- Resistencia a la compresión 406 kg/cm<sup>2</sup>
- Resistencia a la tracción paralela 1020 kg/cm<sup>2</sup>

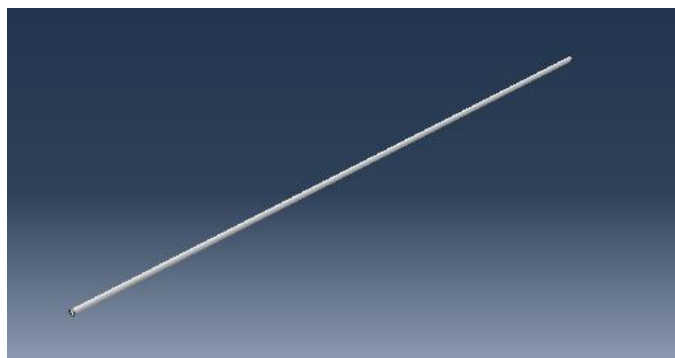


ILUSTRACIÓN 7. BARRA DE MADERA

También se ha creado una parte para unir dos barras. De esta forma conseguimos una 'grapa'. Este 'codo' tiene el mismo diámetro que las barras y se ha definido con las mismas propiedades que la barra. Es un elemento auxiliar necesario para las simulaciones, ya que no hemos encontrado la forma de hacerlo de manera continua.

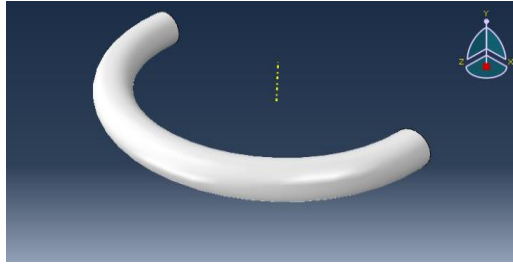


ILUSTRACIÓN 8. CODO PARA UNIR DOS BARRAS

Por último, se ha creado un componente para simular los efectos del recubrimiento. Simplemente es una placa rectangular de 30 mm de espesor. Se ha creado una placa para la cara frontal y otra dorsal.

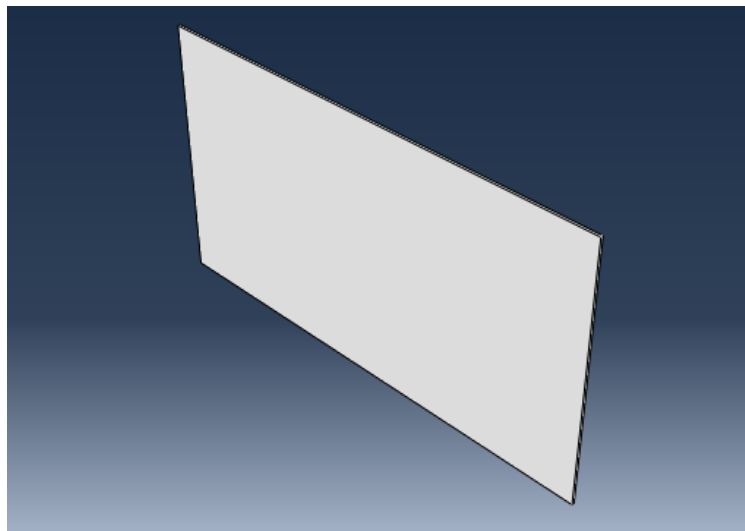


ILUSTRACIÓN 9. COMPONENTE CREADO PARA SIMULAR EL RECUBRIMIENTO

### Tipo de malla utilizada

En todos los modelos, se han usado para el mallado elemento tetraédricos cuadráticos de 8 nodos, con integración reducida y hourglass control cuya denominación en Abaqus es "C3D8R".

Para el mallado de las balas se han generado 14560 elementos.

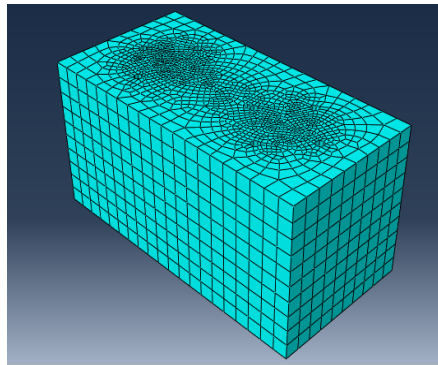


ILUSTRACIÓN 10.MALLA DE LAS BALAS

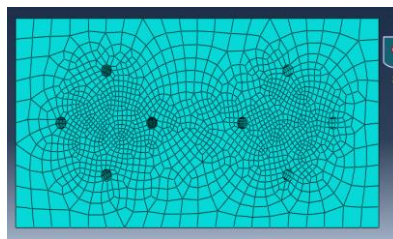


ILUSTRACIÓN 11.DETALLE DEL MALLADO

El mallado de cada barra genera 840 elementos

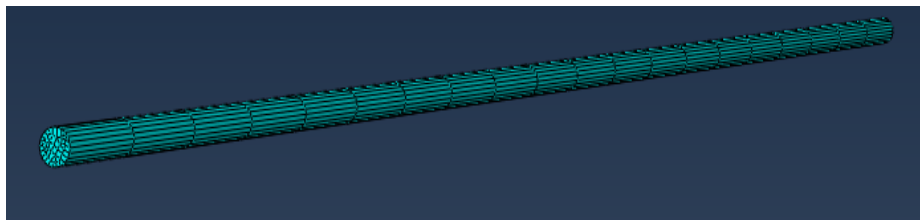


ILUSTRACIÓN 12.MALLADO DE UNA BARRA

El mallado de cada codo genera 4482 elementos-.

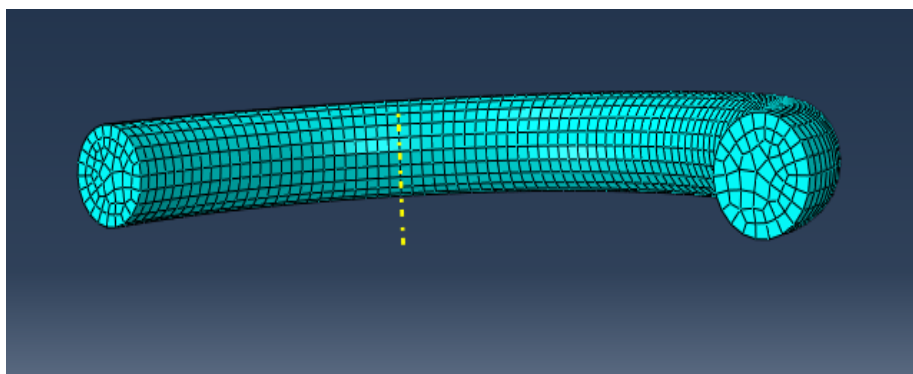


ILUSTRACIÓN 13.MALLADO DEL CODO

El mallado de cada Recubrimiento general 6600 elementos.

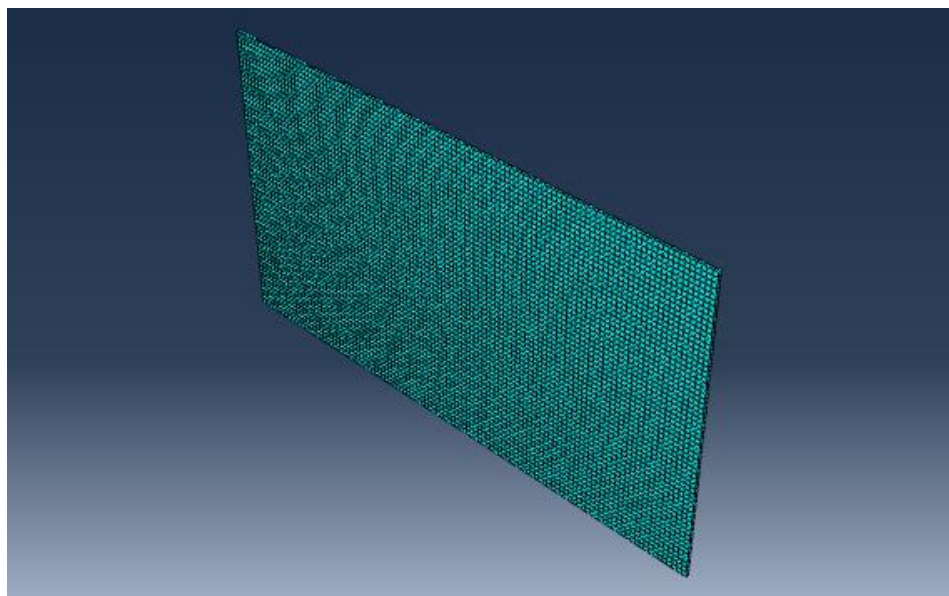


ILUSTRACIÓN 14.MALLADO DEL RECUBRIMIENTO

## Contactos

La complejidad de este proyecto reside en la gran cantidad de contactos, los problemas de convergencia derivados de ellos y la gran cantidad de memoria necesaria para llevar a cabo el cálculo. Abaqus tiene una herramienta capaz de seleccionar automáticamente las caras de distintos componentes que están en contacto. Esta herramienta ha sido de gran ayuda para poder realizar un cálculo preciso y con mayor rapidez, de otro modo habría que haber seleccionado todos los contactos manualmente en cada uno de los modelos.

Se ha utilizado la opción de hard contact, que evita que una bala se introduzca dentro de otra, también se ha definido un coeficiente de rozamiento: 0.716, extraído de un estudio anterior [12]-

Se han definido dos tipos de contacto: surface to surface y tie. El contacto Tie se ha utilizado para unir las barras verticales con los tramos curvos (codo) su función es unir los nodos de los dos elementos, consiguiendo que se comporten como una sola pieza. También se ha utilizado este tipo de contacto en los modelos con recubrimiento para unir el recubrimiento con las balas.

En total, tenemos más de 400 contactos surface-surface con rozamiento, cada bala está en contacto con dos balas en su parte superior, otras dos en su parte inferior y con una por cada lado. A su vez en los modelos que contienen barras, cada bala está en contacto con una barra.

---

[12] Roberto Ascorbe Campo; Sergio Puértolas Broto (2017). Modelado y análisis del comportamiento estructural de edificaciones realizadas con balas de paja.

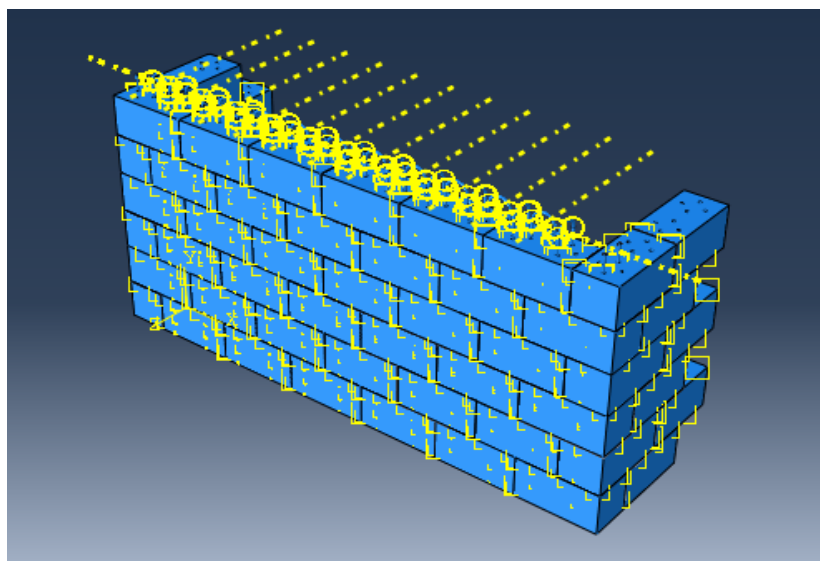


ILUSTRACIÓN 15.DETALLE DE LOS CONTACTOS EN EL MODELO

## Cargas aplicadas

Se han definido tres cargas: el peso propio del muro, el peso propio del forjado y la carga del viento. Estas son las tres cargas principales que tiene soportar cualquier estructura, tanto la carga del forjado como la debida a la carga del viento han sido estimadas. No se han hecho comprobación de las ELS Y ELU ni se ha tratado de hacer un modelado de las cargas riguroso ya que aumentaría la complejidad de los cálculos y el alcance de este trabajo simplemente que soluciones constructivas mejoran las propiedades del muro. No obstante, este es el primer paso para llegar a hacer un cálculo más realista en un futuro.

## Forjado

Para estimar la carga del forjado se ha decidido usar un elemento estructural comercial de madera llamado Kielsteg. Se trata de un forjado unidireccional, formado amarrando elementos de 120 cm de anchura mediante tornillos, como se puede observar en la Figura 15. Al ser ligero y fácil de instalar, parece encajar bien en este tipo de construcción. Concretamente se ha elegido el modelo KSE 380 REI 30.

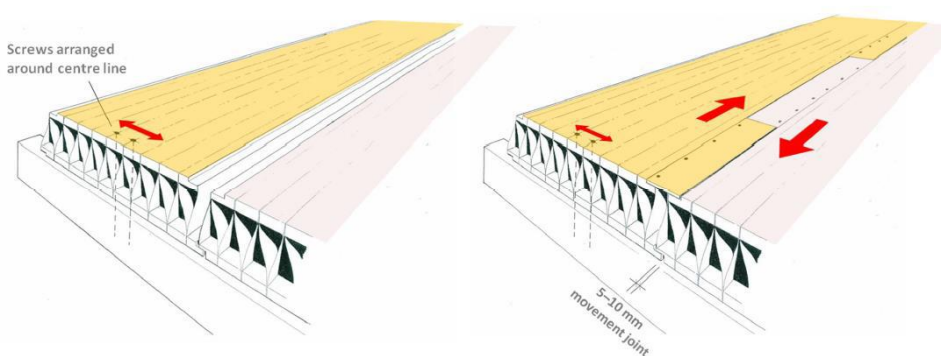


ILUSTRACIÓN 16.FORJADO KIELSTEG

El Peso superficial del forjado es:45,3 kg/m<sup>2</sup>.Este es el valor que se ha introducido en Abaqus. Ya que es simplemente una estimación no se han tenido en cuenta otros factores como la sobre carga. Las balas de paja, cuanto más peso superficial soportan, mejoran trabajan, ya que se comprimen y aumenta la fuerza de rozamiento. Por lo tanto, la situación más desfavorable para trabajar es cuando solo soportan la carga del forjado.

### Carga del viento

La presión de viento se expresa en el DB SE-EA [8] como:  $q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$

siendo  $q_b$  la presión dinámica del viento,  $c_e$  el coeficiente de exposición y  $c_p$  el coeficiente eólico. La presión dinámica en Zaragoza (lugar elegido para esta comprobación) es de 0,45 kN/m<sup>2</sup>, el coeficiente de exposición para zona urbana general en alturas de hasta 3 metros es 1,3, y el coeficiente eólico en edificios con esbeltez mayor de 0,5 es 0,8. Por tanto, la presión de viento en este caso queda: :  $q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p = 0,45 \cdot 1,3 \cdot 0,8 = 0,468$  KN/m<sup>2</sup>. El valor introducido en Abaqus es ligeramente mayor, los cálculos se han realizado con una carga de 0,5KN/m<sup>2</sup>.

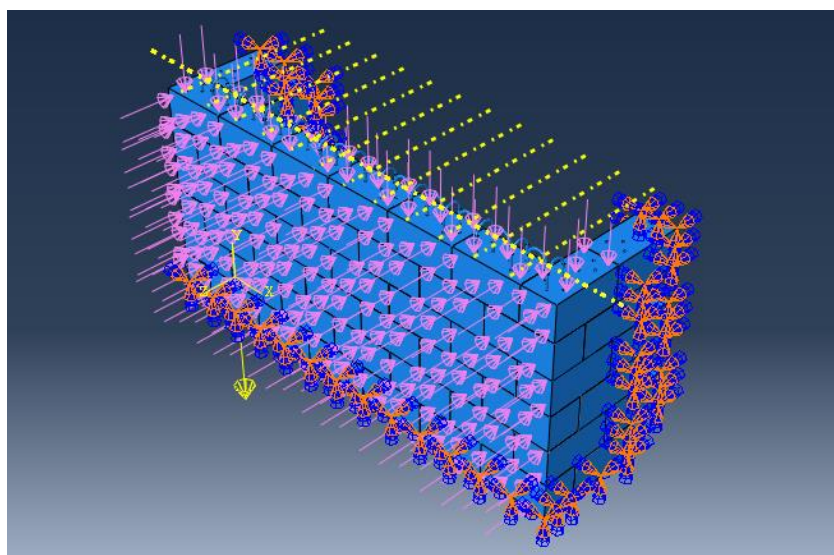


ILUSTRACIÓN 17.CARGA DEL VIENTO, FORJADO Y PESO PROPIO

### Condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno, como podemos ver en la Ilustración 17 están repartidas tanto por la parte inferior del muro y en las secciones laterales. En todos los puntos se ha aplicado un encastrado:  $U_x=U_y=U_z=\theta_x=\theta_z=\theta_y=0$ .

### Flecha máxima permitida y límite de rotura de las balas de paja

Los valores obtenidos para estudiar la resistencia última de la edificación han sido comparados con los valores mostrados en el ensayo de compresión de balas de paja [13]. En este ensayo se muestran valores de tensión de hasta 50 kPa, sin que el fallo resistente parezca inminente. Por tanto, se considerarán válidas tensiones de hasta 80 kPa.

Se ha decidido comparar las deformaciones obtenidas con las permitidas a una estructura de madera equivalente. Según el Eurocódigo 5 [14], la máxima flecha horizontal permitida a una estructura de madera es de  $h/300$ , siendo  $h$  la altura de cada planta. La altura de una planta son 3000 mm, por lo que la máxima flecha permitida será:  $Flecha\ máxima=h/300=3000/300=10\ mm$ .

---

[13] Heiko Georg b, Wei Wu (2011). Performance of straw bale wall: A case of study Taha Ashoura,  
[14] UNE-EN 1995-1-2:2011. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera.

## Simulaciones

En todos los modelos se han aplicado las mismas condiciones de contorno y cargas anteriormente citadas. Se compararán los desplazamientos obtenidos en la dirección normal al plano del muro (z) con los desplazamientos máximos permitidos en estructuras de madera, 10 (mm). Se han mostrado los desplazamientos de las balas situadas en la posición central de la fila en una gráfica en función de la carga del viento. Se ha decidido mostrar solamente este desplazamiento ya que en todos los modelos es el punto más vulnerable de la estructura.

En el cálculo, Abaqus realiza varias interacciones, en cada una de ellas aplica un incremento, hasta aplicar la carga total. De este modo podemos obtener el valor del desplazamiento en función de la carga aplicada. Se han realizado una serie de gráficas que muestran el desplazamiento en z en función de la carga aplicada la cual varía entre 0 y 50 Kg/m<sup>2</sup>.

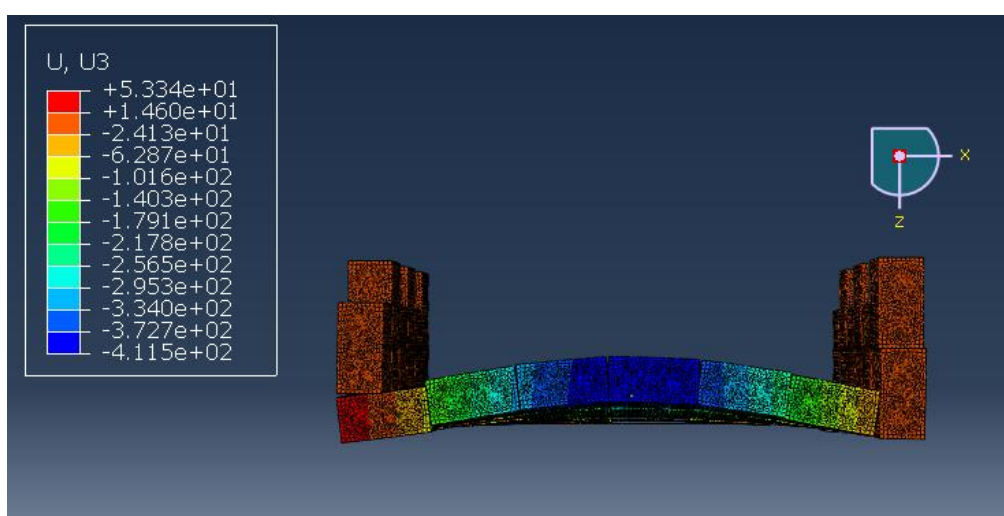


ILUSTRACIÓN 18. DESPLAZAMIENTOS EN Z DEL MODELO BÁSICO

## Refuerzo con barras

### Modelo básico

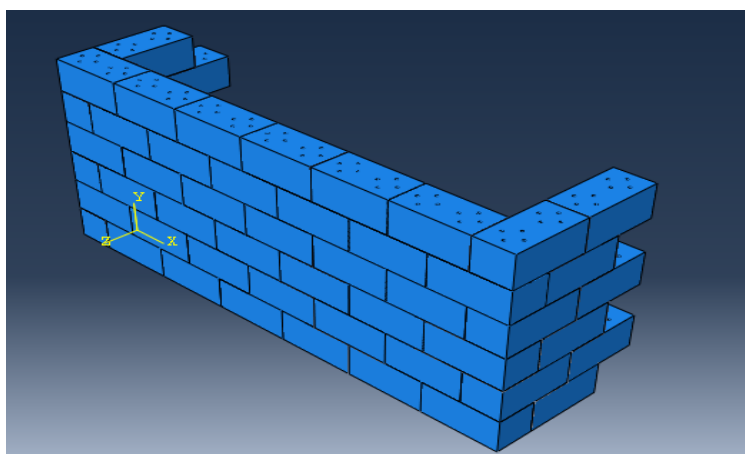


ILUSTRACIÓN 19. MODELO BÁSICO



Como ya hemos dicho este modelo es el punto de partida de nuestro proyecto. Tras aplicar las cargas vemos que su comportamiento como estructura autoportante es muy limitado. Puede apreciarse como el cálculo termina con una carga aplicada de 10Kg/m<sup>2</sup>, el muro ha colapsado con solo una quinta parte de la carga que debería de resistir y los desplazamientos en la parte superior del muro superan los 30 cm. La tensión de la parte inferior del muro alcanza 12 KPa, lejos del límite de carga de las balas de paja.

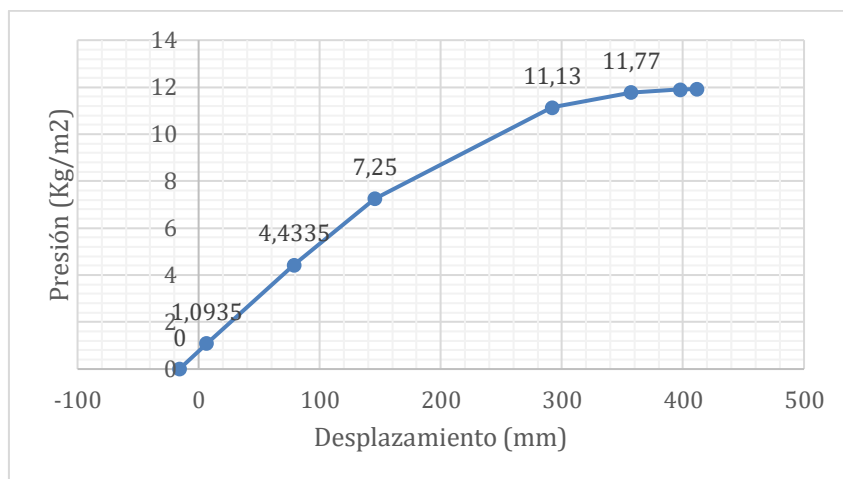


ILUSTRACIÓN 20. DEFORMACIÓN DEL MURO EN FUNCIÓN DE LA FUERZA DEL VIENTO EN EL MODELO BÁSICO

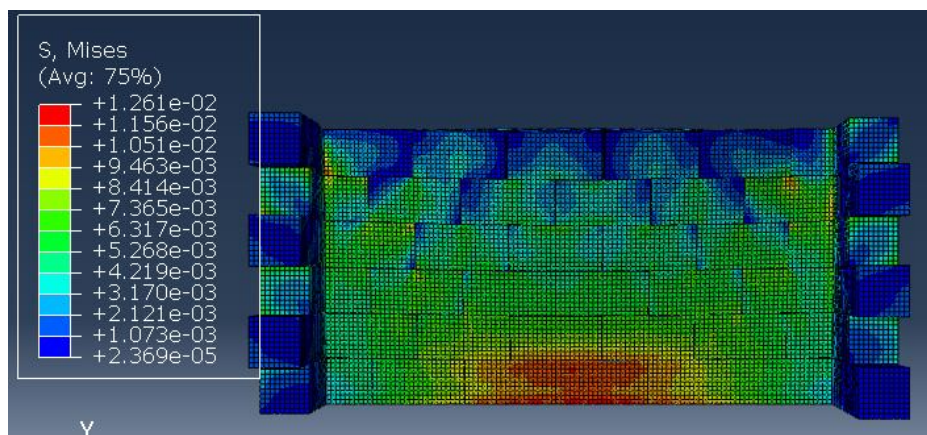


ILUSTRACIÓN 21. TENSIONES DE VON MISES

Modelo dos barras por bala

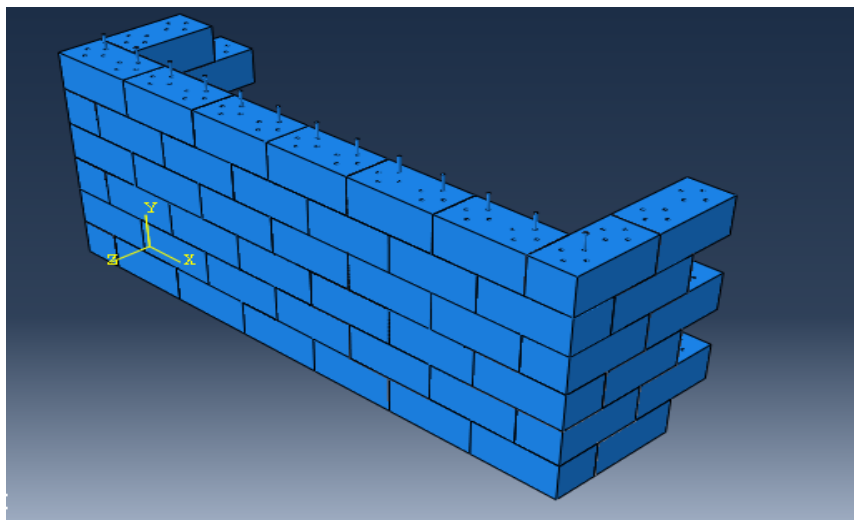


ILUSTRACIÓN 22.MODELO CON DOS BARRAS POR BALA

La primera mejora es introducir una fila de barras, inicialmente se creó un modelo con una barra en la zona central de la bala. Descartamos ese modelo y se decidió situar la barra más alejada del centro, para que absorba el momento generado por el viento. Al comparar los resultados con el modelo anterior no se aprecia una disminución clara en la flecha máxima para valores pequeños de carga frontal. Sin embargo, sí que se aprecia una mejora en la estabilidad ya que alcanza valores de carga mayores que el modelo anterior que colapsaba a los 11.77 Kg/m<sup>2</sup>.

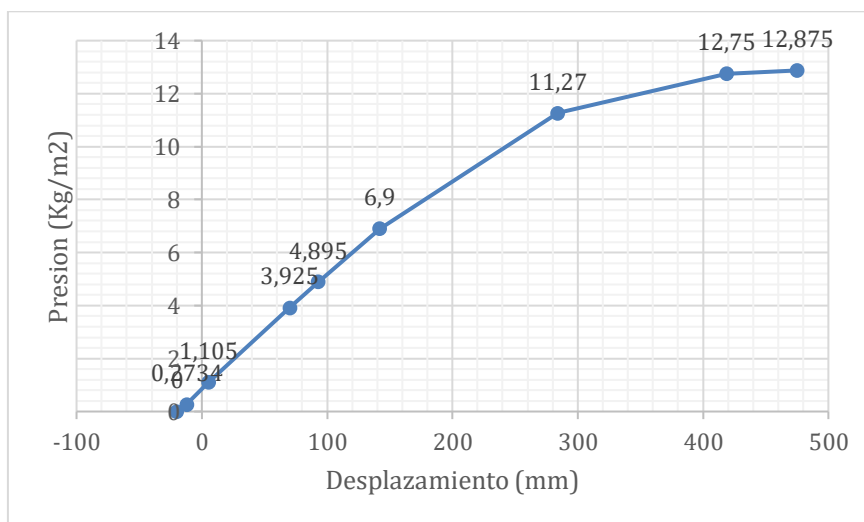


ILUSTRACIÓN 23.DESPLAZAMIENTO EN Z EN FUNCIÓN DE LA CARGA DEL VIENTO

Por otra parte, también se aprecia una mejoría en el campo de tensiones del muro, en el modelo inicial se observa una distribución heterogénea de tensiones en el muro, mientras que en este modelo la distribución de tensiones es homogénea de valor 0,02KPa

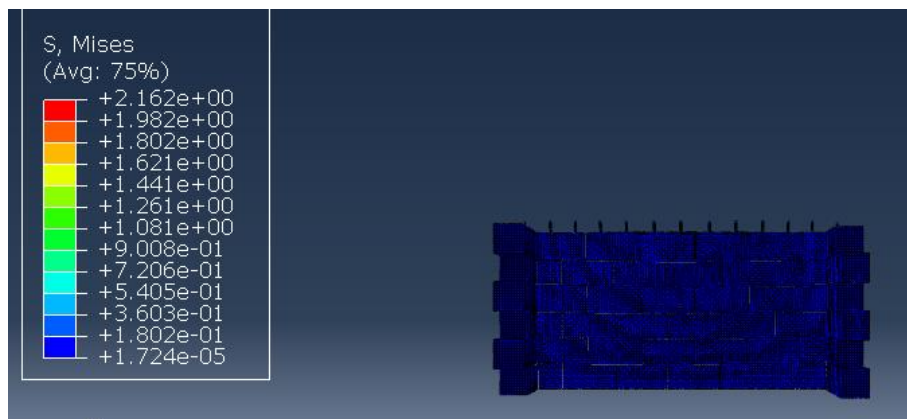


ILUSTRACIÓN 24. TENSIONES DE VON MISES

Modelo con cuatro barras por bala

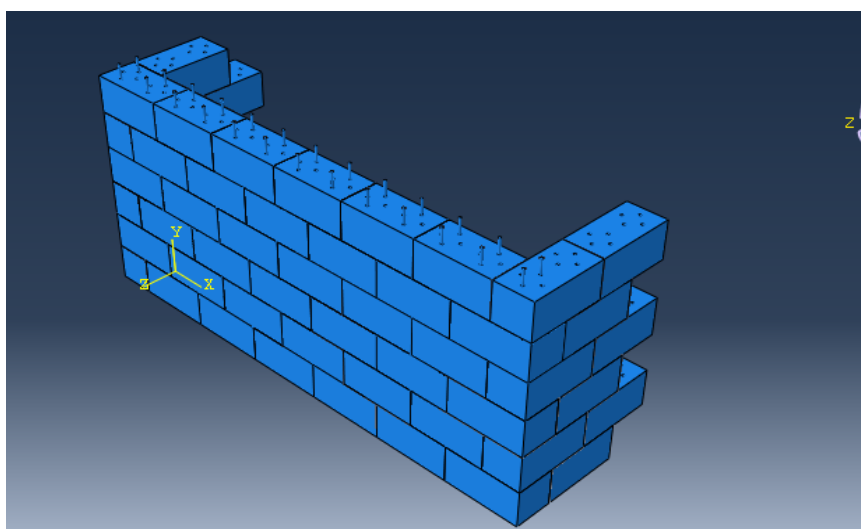


ILUSTRACIÓN 25. MODELO CON CUATRO BARRAS CADA BALA

En este modelo se han introducido dos barras más por bala. El objetivo de este modelo es comprobar cómo afecta introducir una fila de barras paralela a la anterior. Como podemos ver en la siguiente ilustración el desplazamiento al aplicar una presión del 10 Kg/m<sup>2</sup> no se ha mejorado pero la estructura es capaz de resistir más presión.

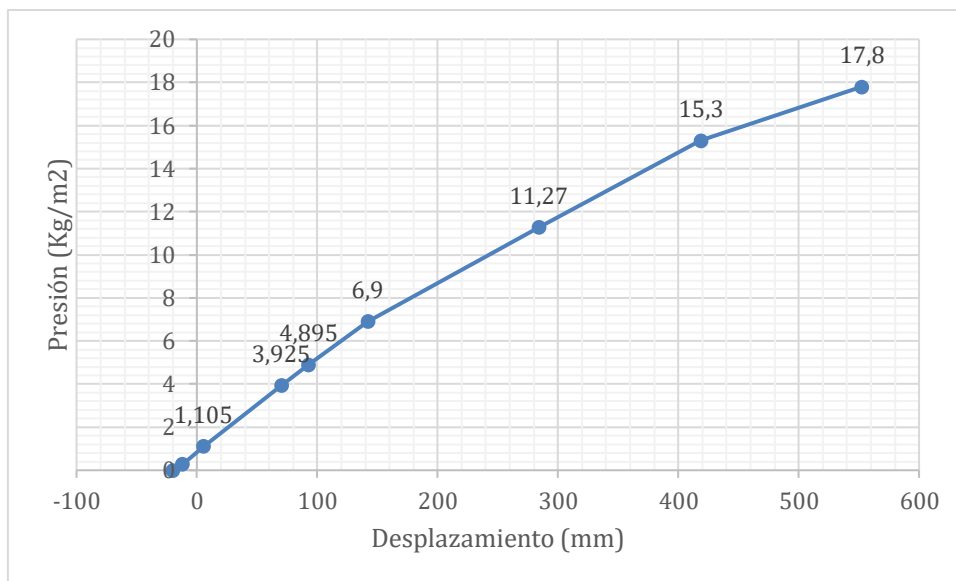


ILUSTRACIÓN 26. DESPLAZAMIENTO EN Z EN FUNCIÓN DE LA CARGA APLICADA

### Modelo con pasadores

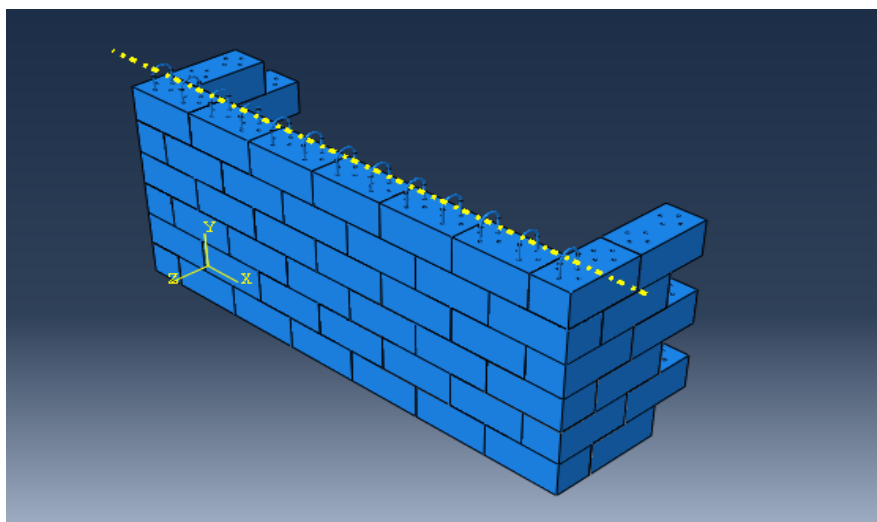


ILUSTRACIÓN 27. MODELO CON DOS PASADORES POR BALA

El siguiente paso es unir las barras, por medio de dos pasadores o grapas. Este modelo intenta reproducir los pasadores utilizados tradicionalmente en Nebraska y cuantificar la mejora en el comportamiento de la estructura. Como vemos se produce una mejora notable en el aumento de la carga soportada por el muro. El muro es capaz de soportar 10 Kg/m<sup>2</sup> más que el modelo anterior antes de colapsar.

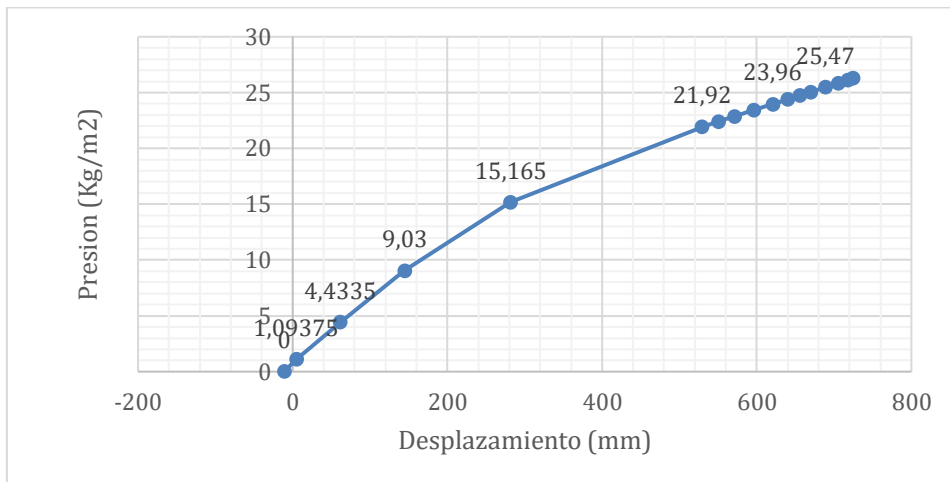


ILUSTRACIÓN 28. DESPLAZAMIENTO U3 FRENTE A LA CARGA DEL VIENTO APLICADA

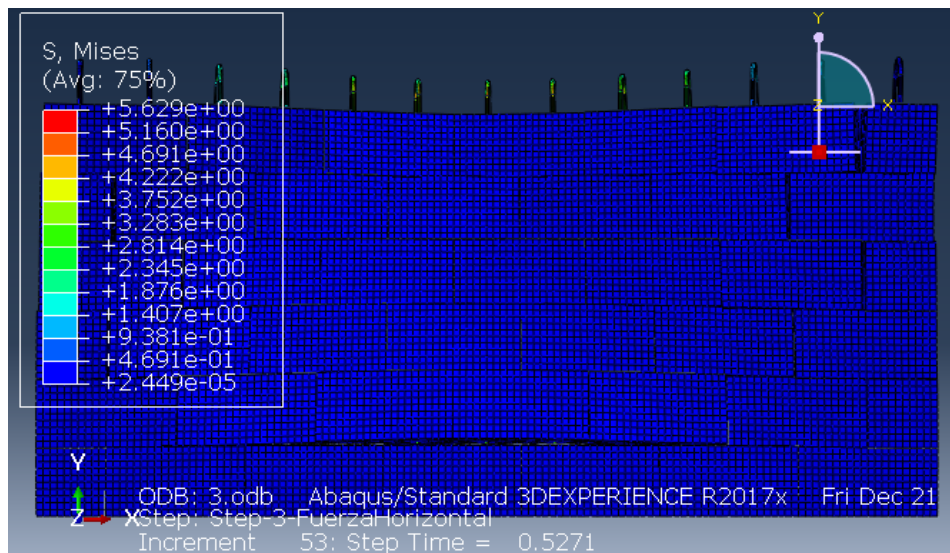


ILUSTRACIÓN 29. TENSIONES DE VON MISES

Modelo con cuatro pasadores por bala

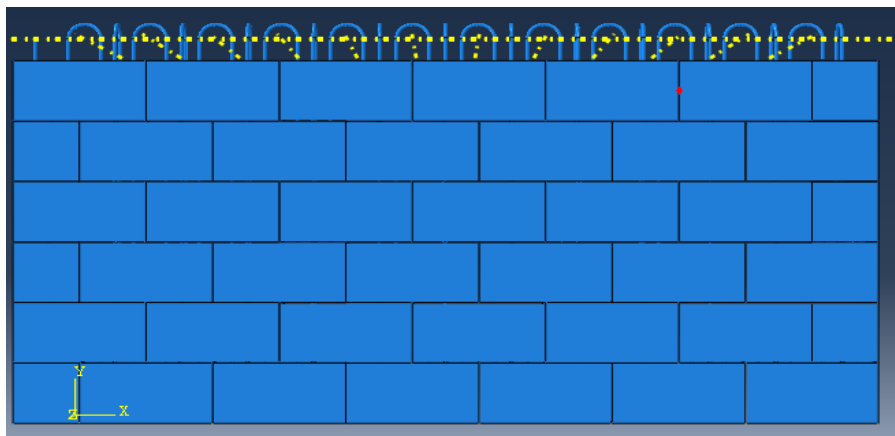


ILUSTRACIÓN 30. MODELO CON CUATRO PASADORES CADA BALA

Por último, se ha decidido añadir una serie de pasadores que unen cada bala con sus adyacentes, de esta forma todas las balas están atadas. Como en los casos anteriores, el desplazamiento ante cargas pequeñas no ha disminuido. Si que ha mejorado notablemente la carga soportada antes de colapsar, así como un comportamiento prácticamente lineal de los desplazamientos en función de la carga.

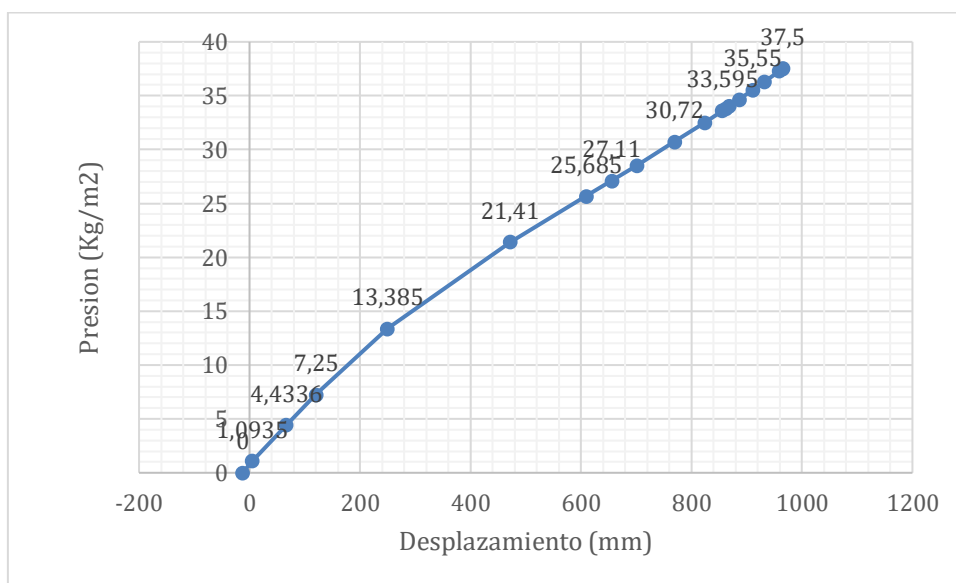


ILUSTRACIÓN 31. DESPLAZAMIENTO EN DIRECCIÓN Z EN FUNCIÓN DE LA CARGA DEL VIENTO

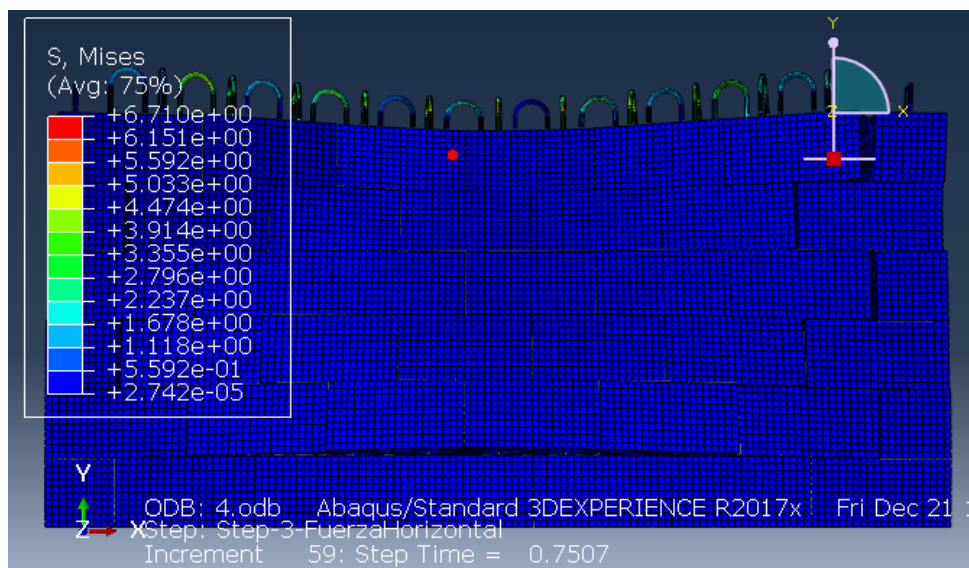


ILUSTRACIÓN 32. TENSIONES DE VON MISES

### Modelo barras pretensadas

El refuerzo con barras utilizado no parece ser la solución idónea para la construcción de un muro autoportante de balas de paja. En este apartado se ha tratado de analizar cómo afecta la introducción de unas barras pretensadas en el modelo. Estas barras ejercen en el resto del modelo una compresión inicial que mejora su comportamiento trabajando a flexión.

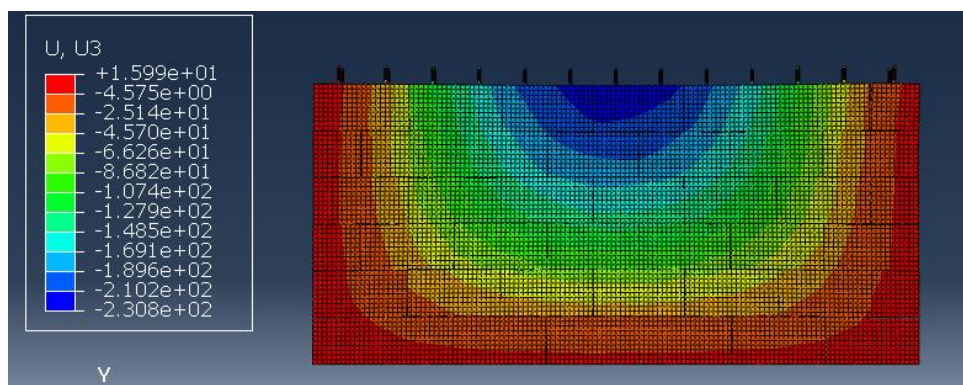


ILUSTRACIÓN 33. DESPLAZAMIENTOS EN Z MURO CON BARRAS PRETENSADAS

Para la simulación se ha partido del modelo de cuatro barras por balas (Ilustración 25). A las barras se les ha aplicado un incremento de temperatura negativo para que trabajen a compresión y se ha utilizado un contacto Tie en la superficie en contacto entre las barras y las balas para conseguir que esa tensión de compresión se transmita.

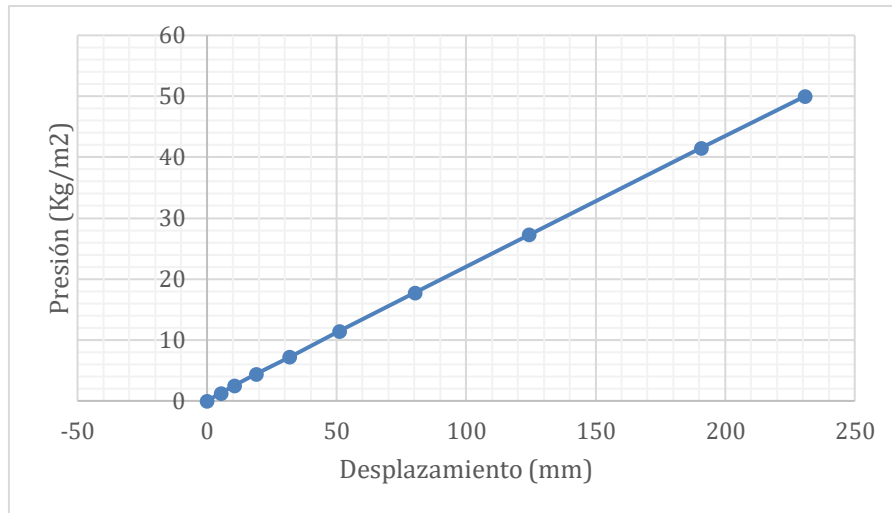


ILUSTRACIÓN 34. DESPLAZAMIENTOS EN Z EN FUNCIÓN DE LA CARGA APLICADA

Esta solución mejora notablemente el comportamiento del muro, es capaz de soportar toda la carga aplicada, además se observa un comportamiento lineal del desplazamiento en función de la presión aplicada y el valor de los desplazamientos es sensiblemente inferior al de los modelos anteriores. En definitiva, este es el modelo con barras que mejor comportamiento presenta y en el que se aprecia una mejora clara



## Refuerzo con revestimiento

La segunda parte de este trabajo ha sido analizar el comportamiento de la estructura al incluir el revestimiento. Como ya se ha dicho, recientes estudios aseguran que los revestimientos a base de arcilla y arena alcanzan módulo de Young de 2086 MPa [15]. Por lo tanto, el uso de recubrimientos con una rigidez elevada podría influir significativamente en el comportamiento de la estructura.

Se han estudiado el modelo básico y el modelo con dos barras por bala, para distintos tipos de recubrimiento. Se ha analizado el comportamiento del recubrimiento utilizado tradicionalmente, llamado Stucco. También se han analizado los recubrimientos a base de Arcilla y los recubrimientos compuesto de arcilla y Arena.

La geometría, condiciones de contorno y cargas aplicadas en este modelo son exactamente iguales a las de los modelos anteriores. El único cambio es añadir una placa de 30 mm en la cara frontal y otra en la cara dorsal del muro. El tipo de contacto utilizado para unir las placas con el muro es de tipo Tie, une los nodos de las caras de ambas superficies que están en contacto. Se ha tomado un valor de 2000 MPa para el cálculo y una densidad conforme a la documentación, se ha elegido la densidad de la arcilla seca: 1420 kg/m<sup>3</sup>. Se ha comprobado también que la tensión del recubrimiento permanezca por debajo del límite de rotura, 1MPa

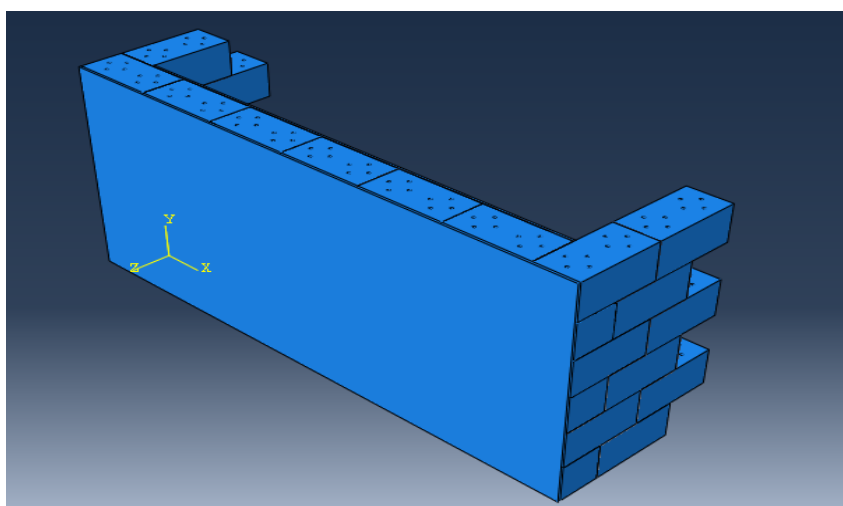


ILUSTRACIÓN 35. MODELO CON RECUBRIMIENTO

[15] Brendon Taylor, Stephen Vardy and Colin MacDougall (2006). Compressive strength testing of earthen plasters for straw bale wall application.

### Modelo con revestimiento rigidez 1 MPa

En primer lugar, se ha analizado el comportamiento del modelo básico añadiéndole un recubrimiento con una rigidez de 1MPa. Esta rigidez es el valor aproximado del recubrimiento utilizado en la antigüedad llamado Stucco.

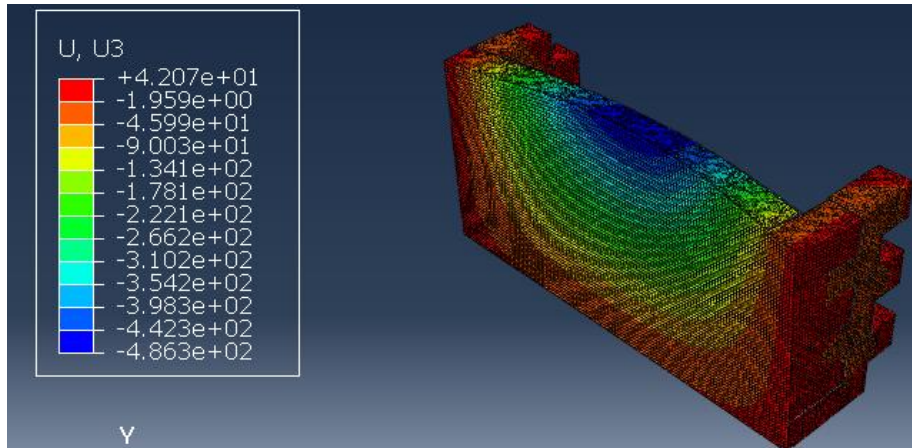


ILUSTRACIÓN 36. DESPLAZAMIENTOS EN Z DEL MURO CON STUCCO

En la Ilustración 36 se aprecia como el muro es capaz de soportar La carga total del viento, la tensión máxima del recubrimiento es de 0.052Mpa, inferior al límite de rotura.

Estos resultados no habían sido alcanzados por ninguno de los modelos anteriores. Sin embargo, los desplazamientos siguen siendo elevados: 48 cm.

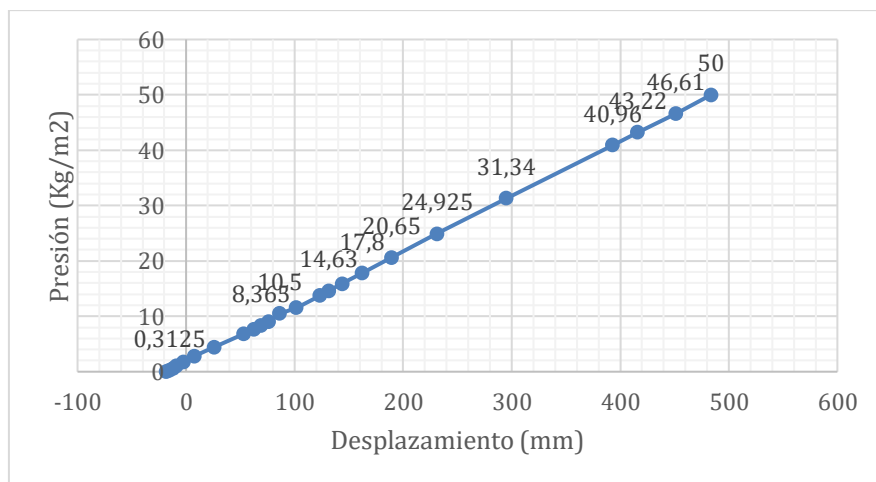


ILUSTRACIÓN 37. DESPLAZAMIENTO EN Z EN FUNCIÓN DE LA CARGA DEL VIENTO

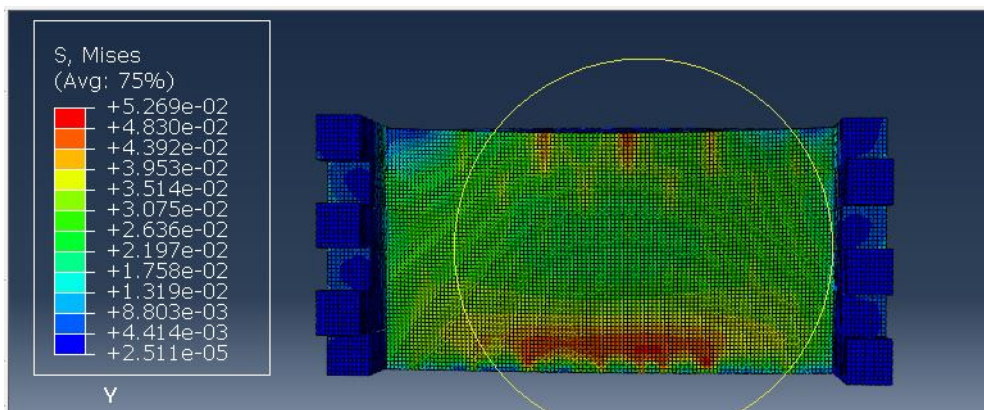


ILUSTRACIÓN 38. MAPA DE TENSIONES RECUBRIMIENTO 1MPa

### Modelo con revestimiento rigidez 1000MPa

Este modelo trata de simular el comportamiento de un muro de balas de paja con un recubrimiento a base de arcilla. Recientes estudios han estudiado el comportamiento de la arcilla para su uso como recubrimiento sometiendo este material a ensayos en el laboratorio, el ensayo a compresión dio como resultado un módulo de elasticidad aproximado de 1000 MPa y un límite de rotura de 0,8MPa.

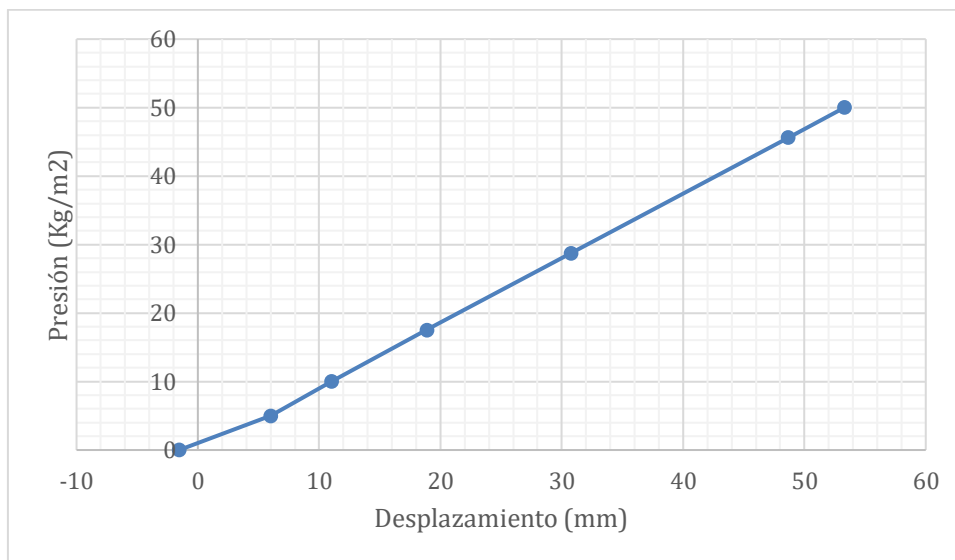


ILUSTRACIÓN 39. DESPLAZAMIENTOS EN Z EN FUNCIÓN DE LA CARGA VERTICAL

En ilustración 39 se puede ver como la mejoría respecto al modelo anterior es importante el desplazamiento de la parte superior del muro es de 53 mm, la decima parte del desplazamiento del modelo anterior. Por otra parte, en la ilustración 40 podemos ver el mapa de tensiones del muro, los valores más elevados se encuentran en la pared interior del muro, en la zona inferior, donde se alcanza valores cercanos al límite de rotura, en la zona central las tensiones son de 0,2 MPa.

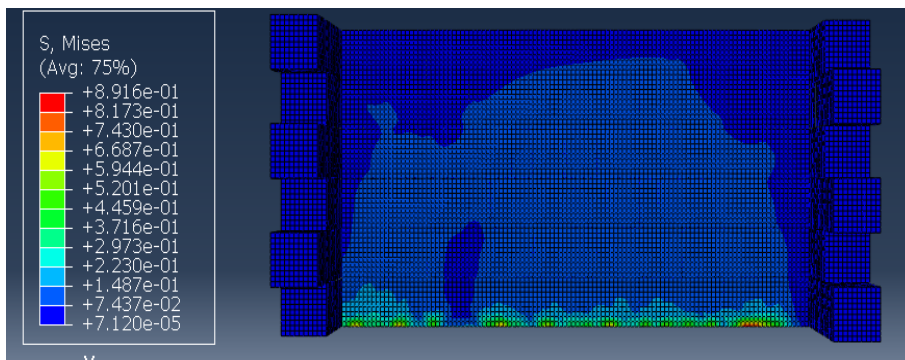


ILUSTRACIÓN 40. MAPA DE TENSIONES DE VON MISES

### Modelo con revestimiento rigidez 2000MPa

Este modelo trata de simular el comportamiento de un muro de balas de paja con un recubrimiento a base de arcilla y arena. Como podemos observar en la gráfica, el desplazamiento disminuye 8 mm respecto al modelo anterior. En cuanto a las tensiones se mantienen en valor prácticamente idénticos a los del modelo anterior.

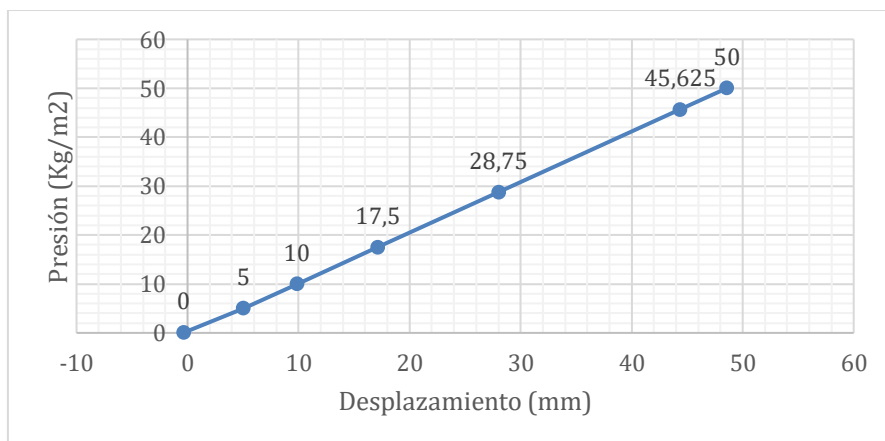


ILUSTRACIÓN 41. DESPLAZAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA CARGA DEL VIENTO APLICADA

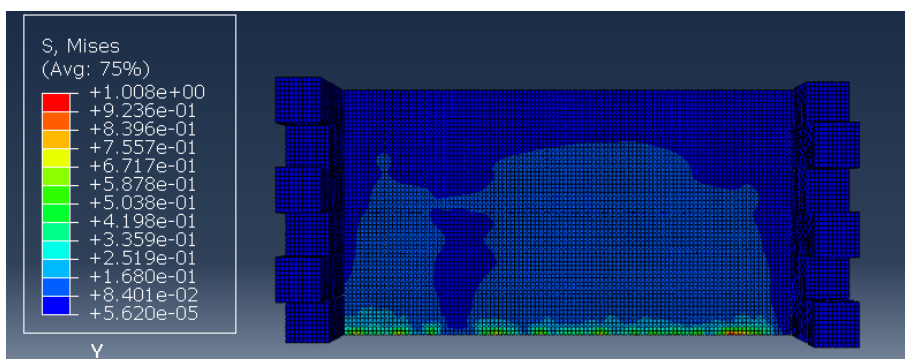


ILUSTRACIÓN 42. TENSIONES DE VON MISES

### Modelo con Recubrimiento y dos barras por bala

En este modelo se ha estudiado la influencia de las barras en el modelo con recubrimiento, el recubrimiento utilizado tiene un módulo elástico de 2000MPa y se han introducido dos barras por bala.

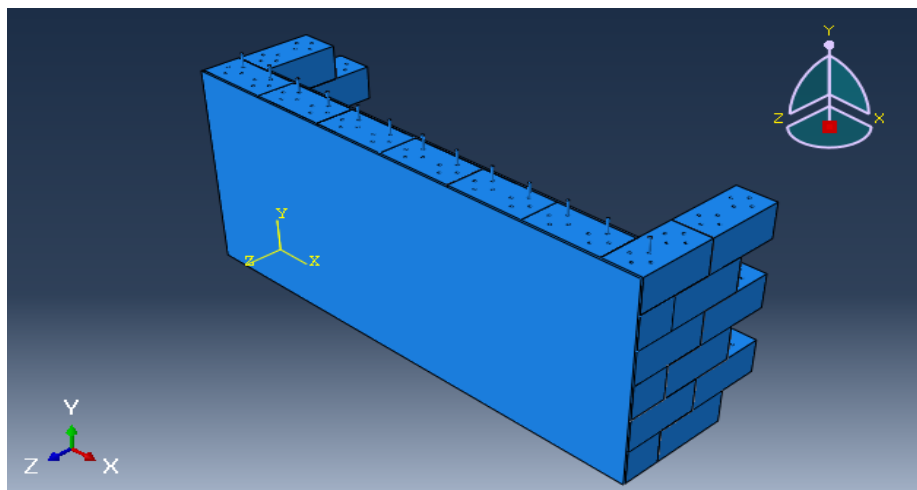


ILUSTRACIÓN 43. MODELO CON RECUBRIMIENTO Y DOS BARRAS POR BALA

No se observa una mejoría en los desplazamientos. En cuanto a las tensiones, se aprecian una mejoría considerable ya que, la tensión ha disminuido en el recubrimiento y su distribución es homogénea en todo el muro.

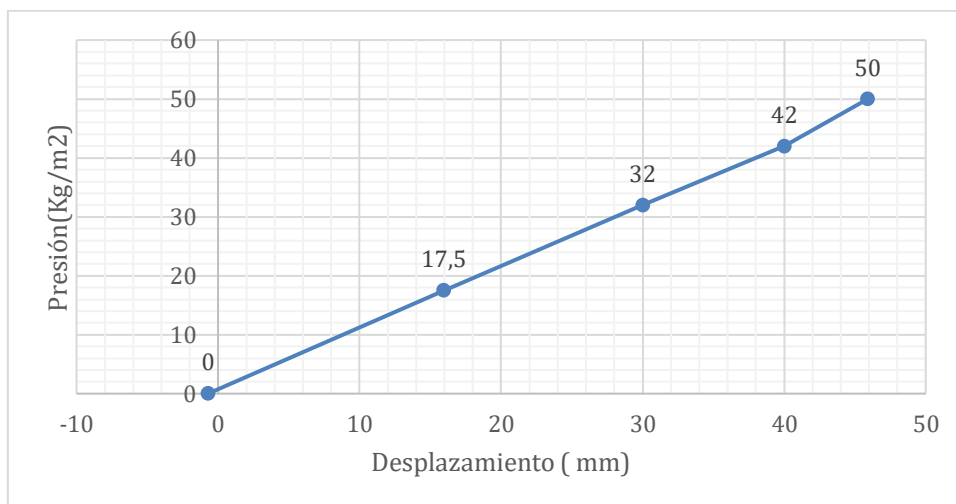


ILUSTRACIÓN 44. DESPLAZAMIENTO EN DIRECCIÓN Z EN FUNCIÓN DE LA CARGA APLICADA

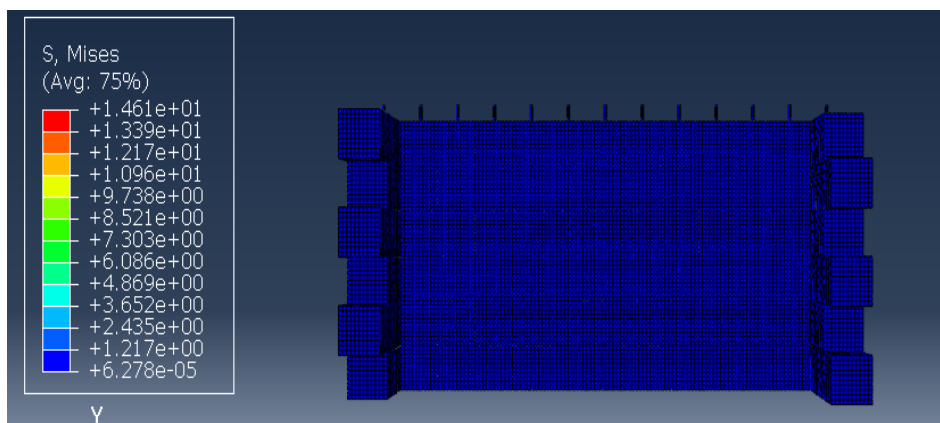


ILUSTRACIÓN 45. DISTRIBUCION DE TENSIONES DE VON MISES

## Conclusiones

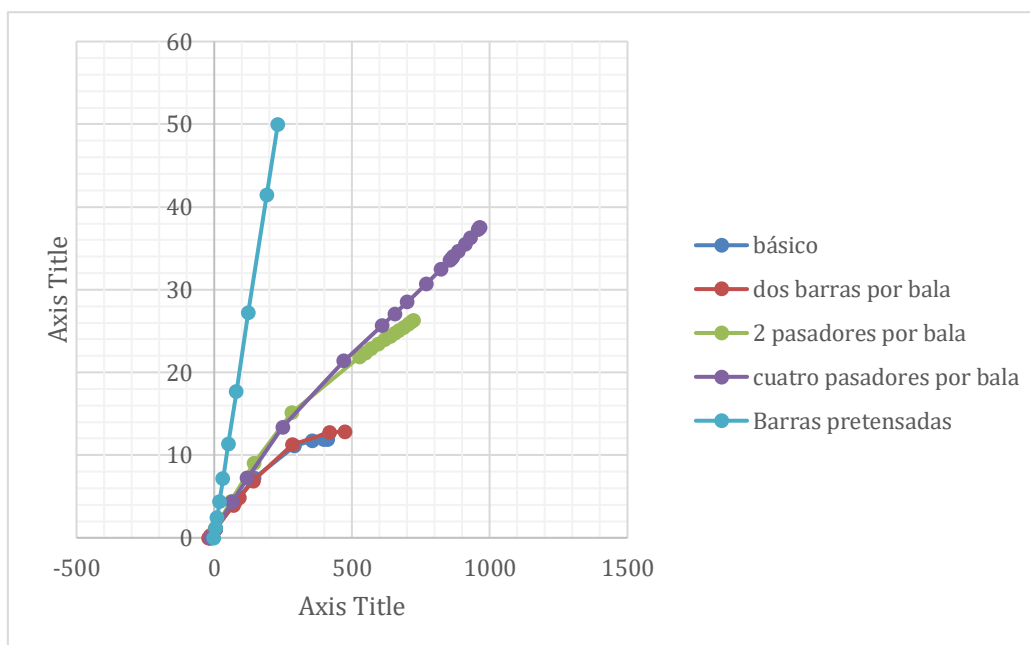


ILUSTRACIÓN 46. COMPARACIÓN MODELOS CON BARRAS

En la ilustración 46 se muestra como aumenta la carga soportada por la estructura en función del número de barras introducidas, las barras mejoran el comportamiento frente al viento e influyen en el campo de tensiones consiguiendo que sea homogéneo. Sin embargo, las barras no consiguen que el muro resista una carga frontal superior a 40Kg/m<sup>2</sup>. Tras analizar los desplazamientos obtenidos se ve claramente como añadir barras prácticamente no tiene efecto alguno en desplazamientos menores de 10 cm. El modelo de barras pretensadas muestra un comportamiento mejor, es capaz de soportar toda la carga aplicada, además se observa un comportamiento lineal del desplazamiento en función de la presión aplicada y el valor de los desplazamientos es notablemente inferior al de los modelos anteriores. En definitiva, este es el modelo con barras que mejor comportamiento presenta y en el que se aprecia una mejoría clara

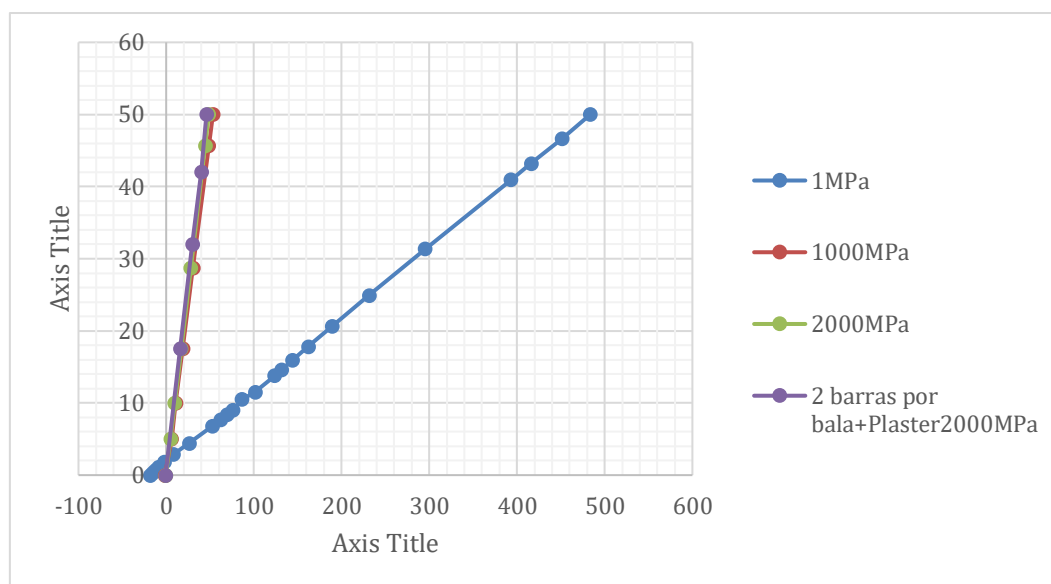


ILUSTRACIÓN 47.COMPARACIÓN MODELO CON RECUBRIMIENTO

Los resultados muestran que añadir un recubrimiento, produce una mejora en el comportamiento estructural del muro mayor que introducir cuatro barras en cada bala. Eligiendo el revestimiento adecuado se consigue una mejora notable, con desplazamientos en la parte superior del muro, inferiores a los 5 (cm). El mapa de tensiones de los modelos indica que todos los modelos con recubrimiento están por debajo del límite de rotura, sin embargo, este resultado es engañoso ya que el límite de rotura extraído de la bibliografía es para revestimientos trabajando a compresión. Al igual que el hormigón, los recubrimientos a base de arcilla no trabajan correctamente a tracción, resquebrajándose fácilmente a bajas tensiones, por lo que el comportamiento del muro se vería afectado. Incluir barras, tanto en los modelos con revestimiento como en los modelos sin revestimiento, mejora la distribución de tensiones en el muro homogeneizando las tensiones y evitando grandes cambios en las tensiones locales. Aunque no se aprecia una mejora significativa en los desplazamientos al aumentar las barras introducidas.

## Bibliografía

- T. Lecompte, A. Le Duigou (2017). Mechanics of straw bales for building applications.
- Mirko Maraldi, Luisa Molari, Nicolo Regazzi, Giovanni Molari (2016). Method for the characterisation of the mechanical behaviour of straw bales.
- Xunzhi Yin, Mike Lawrence, Daniel Maskell, Wen-Shao Chang (2018). Construction and monitoring of experimental straw bale building in northeast China.
- Matts Myhrman and S. O. MacDonald (1997). Build it with Bales: A Step-by-Step Guide to Straw-Bale Construction.
- Heiko Georg b, Wei Wu (2011). Performance of straw bale wall: A case of study Taha Ashoura.
- The Guardian, first straw homes go on sale, 9th February 2015.
- K., Walker, P., Gross, C., White, C., & Mander, T. (2012). Development and testing of a prototype straw bale house Wall.
- Adrien Chaussinand a, Prof. J.L Scartezzini b, Dr. Vahid Nik (2015). Straw bale A waste from agriculture, a new construction material for sustainable buildings.
- UNE-EN 1995-1-2:2011. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera.
- Brendon Taylor, Stephen Vardy and Colin MacDougall (2006). Compressive strength testing of earthen plasters for straw bale wall application.
- Roberto Ascorbe Campo; Sergio Puértolas Broto (2017). Modelado y análisis del comportamiento estructural de edificaciones realizadas con balas de paja.
- V.B. Apte, B. Paroz y A. Bhargava (2003). A fire safety testing and modeling of rendered straw bales for construction in bushfire prone areas. Proceedings of the 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, University of Ulster, Northern Ireland, Septiembre (2003), 537-546.