

# Trabajo Fin de Carrera Ingeniería Civil

## Estudio numérico del comportamiento dinámico de una construcción de tapia en Valverde de Burguillos

Autor: Manuel Prieto Rodríguez

Tutor: Mario Solís Muñiz

**Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría  
de Estructuras**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2020





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Civil

# **Estudio numérico del comportamiento dinámico de una construcción de tapia en Valverde de Burguillos**

Autor:

Manuel Prieto Rodríguez

Tutor:

Mario Solís Muñiz

Profesor titular

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado: Estudio numérico del comportamiento dinámico de una construcción de tapia en  
Valverde de Burguillos

Autor: Manuel Prieto Rodríguez

Tutor: Mario Solís Muñiz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal:

Sevilla, 2020









# Resumen

---

La construcción con tapia es una de las técnicas constructivas más antiguas y relevantes que se presenta como una alternativa de interés con respecto a las técnicas actuales de construcción. Esto se debe al uso de materiales naturales que encontramos en el entorno, por lo que contribuye a la preservación del medio ambiente. Podemos localizar numerosos ejemplos de importantes construcciones en España y, sobre todo, en países en vía de desarrollo.

Bajo estas premisas, el presente trabajo persigue obtener las frecuencias naturales y modos de vibración de una estructura ejecutada con la técnica de la tapia. Se trata de un almacén de libros situado en Valverde de Burguillos en Extremadura (España). Fue una propuesta realizada y ejecutada por la asociación Dehesa Tierra, con el objetivo de estudiar y fomentar este tipo de técnicas sostenibles con el medio ambiente.

Utilizando el software ANSYS, se propone un modelo de elementos finitos para conseguir los objetivos marcados y entender mejor el comportamiento dinámico de la construcción. El análisis de los resultados permite conocer aquellos elementos que pueden condicionar el diseño de construcciones similares en términos dinámicos. Se concluye con la necesidad de continuar investigando las construcciones de tapia con las características que este trabajo presenta.

Palabras clave: construcción de tapia; ANSYS; modelo de elementos finitos; análisis modal



# Abstract

---

The rammed earth is one the most ancient and relevant construction techniques. It is presented as an interesting alternative in contrast to current construction techniques due to the use of natural resources that we can find in our context. Therefore, its use contributes to the preservation of the environment. Diverse examples of important constructions like this can be found in Spain, specifically, in developing countries.

Due to previous premises, the present final degree project aims to obtain the natural frequencies and vibration modes of a structure made with rammed earth technique. This structure is a storehouse for books located in Valverde de Burguillos, Extremadura (Spain). This construction was a proposal conducted by Dehesa Tierra association in order to study and promote this environmentally sustainable technique.

ANSYS software is used to propose a model of finite elements with the aim of obtaining the research objectives and to understand widely the dynamic behaviour of this construction. Analysis of the information allows us to know the influential factors for future similar constructions' design in dynamic terms. The need to continue doing research about rammed earth techniques according to the information that this contribution presents is addressed.



<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Construcción con Tierra</i>	1
1.1.1 Historia de la construcción con tierra	1
1.1.2 Factores de deterioro en construcciones con tierra	3
1.2 <i>Técnicas de construcción con tierra cruda</i>	3
1.3 <i>Antecedentes del Trabajo Fin de Grado: Proyecto Learn BION</i>	5
1.4 <i>Objetivos del TFG</i>	6
<b>2 Descripción de la Construcción</b>	<b>7</b>
2.1 <i>Información Inicial</i>	7
2.2 <i>Información in Situ</i>	10
2.3 <i>Planos</i>	13
2.4 <i>Descripción de los materiales</i>	14
2.5 <i>Detalles constructivos</i>	14
<b>3 Construcción del Modelo</b>	<b>18</b>
3.1 <i>Modelado 3D en AutoCAD</i>	18
3.2 <i>Construcción geométrica y conectividad</i>	20
3.3 <i>Tipos de Elementos</i>	22
3.4 <i>Conexiones entre elementos</i>	23
3.5 <i>Propiedades de los materiales</i>	25
3.6 <i>Criterio de mallado</i>	25
3.7 <i>Organización del código</i>	26
<b>4 Resultados</b>	<b>28</b>
4.1 <i>Resultados del modelo inicial</i>	28
4.2 <i>Análisis de influencia de las propiedades de los materiales</i>	33
4.3 <i>Análisis del modelo con modificaciones geométricas y de elementos</i>	34
<b>5 Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>46</b>
<b>6 Bibliografía</b>	<b>45</b>
<b>Anexo</b>	<b>46</b>
1- <i>GEOMETRIA.txt</i>	46
2- <i>Muros Tapia y Sobrecimiento.txt</i>	51
3- <i>Viga Collar.txt</i>	52
4- <i>Unión Viga Collar–Muro.txt</i>	52
5- <i>Viguetas.txt</i>	53
6- <i>Cubierta.txt</i>	53
7- <i>Pretilos.txt</i>	54



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Elementos utilizados en el modelo de ANSYS	22
Tabla 2: Materiales y sus características utilizadas en el código de ANSYS	25
Tabla 3: Resultados Modelo Inicial	28
Tabla 4: Resultados del modelo Inicial para distintos valores de E uniforme	33
Tabla 5: Resultados Modelo sin Sobrecimiento (1000 MPa)	34
Tabla 6: Resultados del Modelo sin tacón	35
Tabla 7: Comparación de resultados para altura variable del pretil	38
Tabla 8: Resultados del modelo sin estructura de madera	41





# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Ciudad de Shibam, Yemen	1
Figura 2. Mezquita de Djenné, Mali.	2
Figura 3. Muralla de Sevilla	2
Figura 4. Elaboración de bloques de Adobe y posterior secado	3
Figura 5. Proceso de construcción de un muro de quincha	4
Figura 6. Proceso constructivo de un muro de tapia	4
Figura 7. Ubicación de Valverde de Burguillos	5
Figura 8. Flujo de trabajo	6
Figura 9. Modelo 3D elaborado por Dehesa Tierra. Vista general	7
Figura 10. Construcción del sobrecimiento	8
Figura 11. Compactación in situ	8
Figura 12. Construcción de la viga collar	9
Figura 13. Detalle de la unión entre viga collar y viguetas	9
Figura 14. Proceso de construcción de la cubierta	10
Figura 15. Vista frontal de la estructura.	11
Figura 16. A) Lavado de finos en los pretilos. B) Material fino acumulado en el alféizar de las ventanas	11
Figura 17. Heterogeneidad de la tapia en la zona superior del muro	12
Figura 18. Cubierta vegetal	12
Figura 19. Material de ensayos realizados in situ	13
Figura 20. Muestras de material de tapia para su estudio	14
Figura 21. Piedras colocadas para rellenar el espacio entre el sobrecimiento	15
Figura 22. Detalle de la conexión macho-hembra entre elementos de tierra. Elementos que componen el encofrado.	15
Figura 23. a) Sección del muro con ventanas b) Sección del muro con hornacinas	16
Figura 24. Fotografía del interior de la construcción. Detalle del recubrimiento de mortero cercano a la puerta frontal y en las tres hornacinas.	16
Figura 25. Sección de la unión entre el muro, pretil y cubierta vegetal	17
Figura 26. Vista trasera de gárgola de evacuación pluvial y chaflán en las esquinas de los muros	17
Figura 27. Modelo gráfico 3D en AutoCAD	19
Figura 28. Subdivisiones horizontales y verticales de los muros	20
Figura 29. Viga collar y uniones a los muros	21
Figura 30. Áreas para la cubierta	21
Figura 31. Solid185	22

Figura 32. Beam188	23
Figura 33. Shell181	23
Figura 34. Detalle conexión viga collar-muro	24
Figura 35. Mallado del Modelo	26
Figura 36. Modo 1 del modelo Inicial (9.53 Hz)	30
Figura 37. Modo 2 del modelo Inicial (11.32 Hz)	30
Figura 38. Modo 3 del modelo Inicial (14.00 Hz)	31
Figura 39. Modo 15 del modelo Inicial (26.52 Hz)	31
Figura 40. Modo 17 del modelo Inicial (28.39 Hz)	32
Figura 41. Modo 20 del modelo Inicial (30.57 Hz)	32
Figura 42. Modo 1 del modelo sin tacón (9.9 Hz)	36
Figura 43. Modo 2 del modelo sin tacón (13.70 Hz)	36
Figura 44. Modo 14 del modelo sin tacón (26.55 Hz)	37
Figura 45. Modo 18 del modelo sin tacón (30.00 Hz)	37
Figura 46. Modo 1 del modelo sin pretilas (14.57 Hz)	39
Figura 47. Modo 2 del modelo sin pretilas (17.92 Hz)	39
Figura 48. Modo 5 del modelo sin pretilas (21.90 Hz)	40
Figura 49. Modo 7 del modelo sin pretilas (25.18 Hz)	40
Figura 50. Modo 1 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (9.51 Hz)	42
Figura 51. Modo 2 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (9.82 Hz)	42
Figura 52. Modo 3 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (10.75 Hz)	43
Figura 53. Modo 6 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (14.50 Hz)	43
Figura 54. Modo 12 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (24.45 Hz)	44
Figura 55. Modo 16 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (30.59 Hz)	44
Figura 56. Modo 19 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (32.02 Hz)	45





# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Construcción con Tierra

### 1.1.1 Historia de la construcción con tierra

La tierra como material de construcción ha sido utilizada con carácter constructivo alrededor de todo el mundo desde la Prehistoria. Al ser un recurso natural abundante en cualquier zona, podemos encontrar desde construcciones básicas de uso doméstico, como viviendas, hasta distintos tipos de monumentos. Estos últimos han sido clave a la hora estudiar la construcción con tierra y son la mayor parte de fuente de conocimiento, protección, conservación y restauración. De hecho, el uso de la tierra ha estado presente hasta mediados del siglo XX en la mayoría de los países considerados como industrializados. Como parte del uso de la tierra, las dos técnicas más utilizadas en estos países han sido el tapial y el adobe, junto a otras técnicas alternativas en distintas regiones.

En el continente asiático podemos encontrar abundantes ejemplos. Ciudades como Shibam, Yemen, está formada por edificios de hasta 40 metros de altura contruidos en tierra o en oriente próximo como la ciudad de Bam, Irán, en la cual un terremoto en 2003 afectó a este tipo de edificaciones. Otro ejemplo muy importante es la Gran Muralla China que fue construida en su etapa inicial con la técnica del tapial y es considerada Patrimonio de la Humanidad por la Unesco desde 1987. Además, podemos encontrar restos de uso masivo del adobe en el antiguo Egipto, donde se construían desde tumbas o murallas hasta pirámides [1].



*Figura 1. Ciudad de Shibam, Yemen*

En África el uso de estas técnicas es frecuente para la construcción de edificios con carácter religioso, como son la mezquita de Bobo Dioulasso en Burkina Faso, el palacio de Kasbah en Marruecos o la mezquita de Djenné declarada como Patrimonio de la Humanidad. En concreto, esta mezquita es objeto de conservación y estudio debido al uso del adobe como componente principal.



*Figura 2. Mezquita de Djenné, Mali.*

Muchas de las culturas precolombinas en América del Sur como la Chimú o Inca dominaban la técnica del adobe. Ejemplo de ello es la pirámide del Sol en México o la ciudad chimú de Chan Chan en Perú.

Finalmente, en la Península Ibérica encontramos restos del uso de la técnica del adobe y tapial de la época ibérica y posteriores. La primera de ellas fue ampliamente utilizada para construcciones defensivas, por ejemplo, murallas, en ciudades como Emporiae, Tarraco o Cartago Nova. Por otro lado, la técnica del tapial tuvo mayor presencia en construcciones de carácter monumental y defensivo en la época andalusí y feudal, destacando las murallas de ciudades como Granada, Sevilla o Guardamar del Segura, donde se hallaron restos de la Rábida Califal [1].



*Figura 3. Muralla de Sevilla*



### 1.1.2 Factores de deterioro en construcciones con tierra

Muchas de las construcciones anteriormente nombradas, al igual que las de uso doméstico, que constituyen la mayor parte de las estructuras de tierra en el mundo, sufren procesos de erosión debido a fenómenos meteorológicos como la lluvia y la humedad. Las zonas más propensas a deteriorarse suelen ser la superior e inferior. Por ello, es habitual encontrar diferentes medidas de prevención como el uso del sobrecimiento o aleros que protegen la parte baja de la estructura de las salpicaduras de la lluvia.

El viento es otro causante del deterioro de la zona exterior de una construcción. Una medida preventiva y recurrente para evitarlo es el uso de revestimientos de mortero. También los cambios de temperatura asociados al clima y la consecuente expansión-contracción debido a la evaporación del agua puede deteriorar los muros de tierra, manifestándose en forma de fisuras y grietas verticales. La elección de la proporción de agua-tierra y el uso de estabilizantes puede condicionar la aparición de este tipo de patologías.

Por último, es importante una conveniente geometría y un adecuado proceso de construcción. Son muchos los factores que pueden hacer aparecer síntomas de deterioro: muros esbeltos, ángulos rectos, cubiertas pesadas o compactación heterogénea. Algunas consecuencias son la pérdida de material, desprendimientos, desestabilización o asentamientos diferenciales [1].

## 1.2 Técnicas de construcción con tierra cruda

Se pueden encontrar distintos métodos de construcción utilizando la tierra como material principal. Entre ellas destacamos las siguientes:

**Adobe:** esta técnica consiste en la elaboración de bloques individuales hechos de arena, arcilla y agua. Estos bloques se dejan secar al aire libre para obtener su resistencia. Es habitual añadir paja en su elaboración para dotarlos de cierta resistencia a tracción y, así, evitar el agrietamiento debido a fenómenos de retracción.

Para la construcción de una estructura de adobe, se forman muros colocando los bloques unidos entre sí mediante un mortero de barro [1]. Se puede llegar incluso a construir arcos, bóvedas y cúpulas, además de cubiertas planas. Este tipo de estructuras, unido a la heterogeneidad de los bloques, hace que el comportamiento pueda ser impredecible. Los muros de adobes suelen presentar problemas cuando están ubicados en zonas con alta humedad atmosférica, por lo que es frecuente tomar diferentes medidas de protección frente al agua como puede ser el uso de un aislante o un sobrecimiento.



*Figura 4. Elaboración de bloques de Adobe y posterior secado*

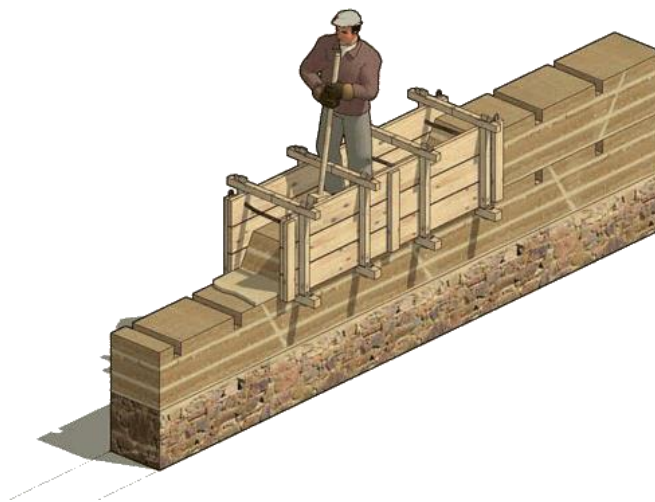
**Quincha:** Consiste en la construcción de un muro continuo de caña o bambú recubierto al menos de 2 cm de barro. Tienen un buen comportamiento frente a sismos gracias a su reducido peso propio y flexibilidad.



*Figura 5. Proceso de construcción de un muro de quincha*

**BTC:** La técnica de los Bloques de Tierra Comprimida es muy similar a la del adobe. En su elaboración se pueden utilizar distintos tipos de tierra como arcilla, cieno o arena. A diferencia del adobe, BTC es un producto más sostenible ya que con 1 litro de diésel se puede llegar a fabricar 145 bloques, disminuyendo las emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, estos bloques son prensados en la etapa de elaboración y suele utilizarse un 5% de cal, lo que mejora sus propiedades mecánicas [2].

**Tapial:** al igual que la quincha, esta técnica consiste en la construcción de muros vertiendo el material húmedo en cajones de madera y compactándolo de manera manual con un pisón o mediante herramientas automatizadas. Una vez secado, se retira el encofrado dando lugar a muros monolíticos de alta resistencia que pueden ser reforzados con elementos verticales de madera.



*Figura 6. Proceso constructivo de un muro de tapia*

Esta técnica requiere un volumen de tierra elevado y es frecuente que se realice en tongadas de entre 10-20 cm de espesor. Generalmente se utiliza en regiones con clima semiáridos [1] ya que demanda menor cantidad de agua que el adobe.

En este trabajo se estudia una estructura construida con dicha técnica y se aportará más información sobre la misma en apartados posteriores.



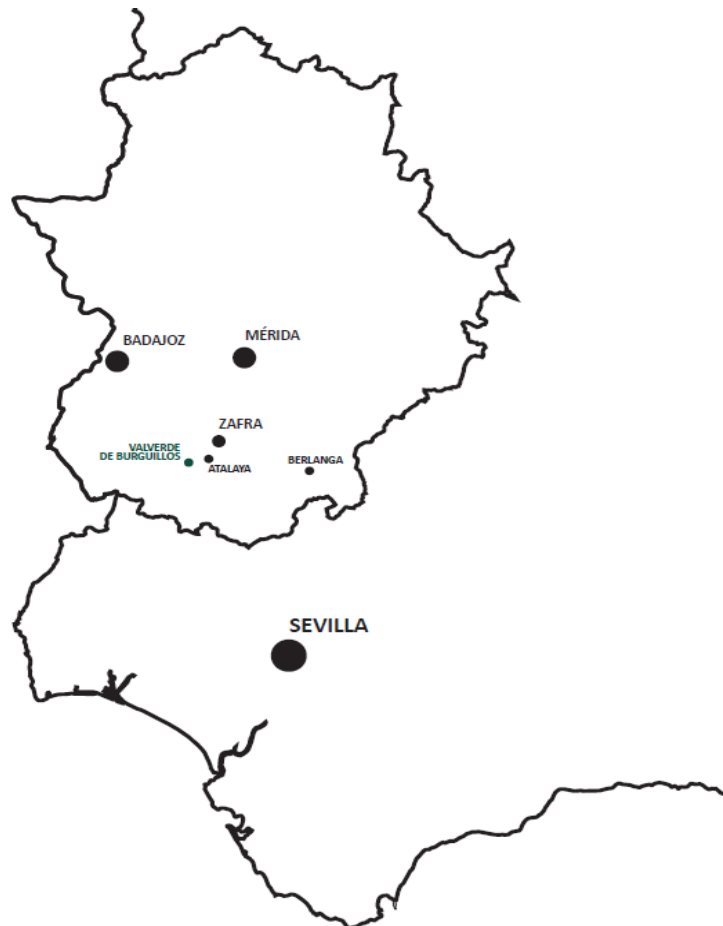
### 1.3 Antecedentes del Trabajo Fin de Grado: Proyecto Learn BION

BION o Building Impact Zero Network es un conjunto de organizaciones cuyo objetivo es promover y compartir conocimiento de estructuras de bajo impacto medio ambiental.

El proyecto Learn BION, cofinanciado por la Unión Europea, presenta una red de países europeos unidos con el objetivo de co-construir y compartir conocimiento relacionado con siete técnicas de construcción específicas [3]. Actualmente, el proyecto se encuentra en su segunda fase, que abarca el periodo 2019-2022, para la realización de trabajos en países como Suecia, Francia, Bélgica, Italia, Portugal y España.

El contexto del presente trabajo es el desarrollo de la técnica 5: diseñar y construir con tierra cruda. La asociación encargada de la ejecución de este proyecto fue Dehesa Tierra, con sede en Extremadura. Concretamente, a 15 minutos de Zafra, Badajoz, encontramos la pequeña localidad de Valverde de Burguillos con tan sólo 290 habitantes. Bajo el proyecto “Activa Valverde”, una iniciativa que persigue promover actividades sociales y culturales para tratar de cambiar la tendencia negativa demográfica de la zona, comenzaron los contactos entre la asociación Dehesa Tierra y el ayuntamiento de esta localidad. El alcalde de Valverde de Burguillos, Carlos, es miembro de “Activa Valverde” y se convirtió en un potencial socio con el que colaborar en futuros proyectos.

De esta manera y tras un año de trabajo entre Dehesa Tierra y el ayuntamiento, nace la construcción sostenible de un pequeño almacén de libros formado por muros a partir de la técnica del tapial, de gran tradición en la zona.



*Figura 7. Ubicación de Valverde de Burguillos*

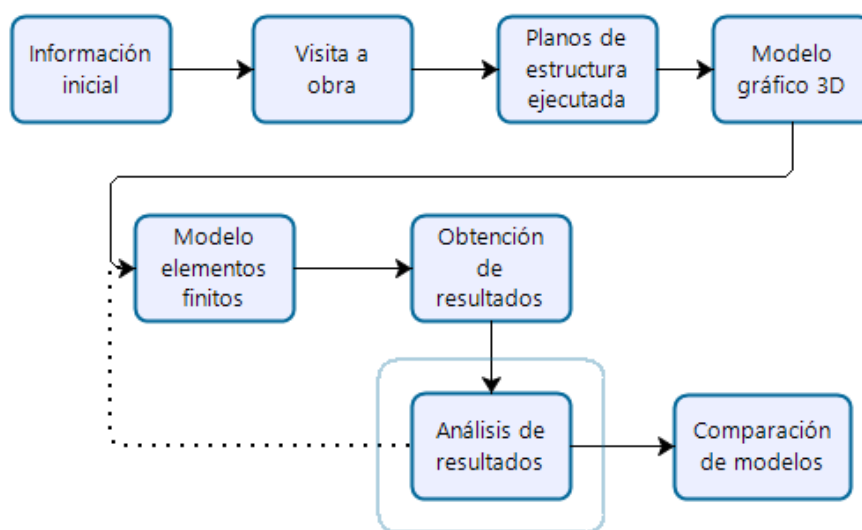
## 1.4 Objetivos del TFG

Este trabajo final de grado persigue analizar cualitativamente el caso de la estructura de tapia de Valverde de Burguillos. Para la consecución de este objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Crear un modelo de elementos finitos *ad hoc*
- Conocer los modos de vibración y frecuencias naturales de la estructura
- Conocer la influencia de los elementos que componen la estructura a través de modificaciones del propio modelo

Para responder a los objetivos anteriormente citados, es necesario un conocimiento suficientemente detallado acerca de los materiales empleados, procesos de construcción, decisiones constructivas y demás elementos influyentes que puedan afectar a los resultados. Todo ello se desarrollará en los apartados siguientes.

A continuación, se presenta el flujo de trabajo llevado a cabo en la siguiente figura:



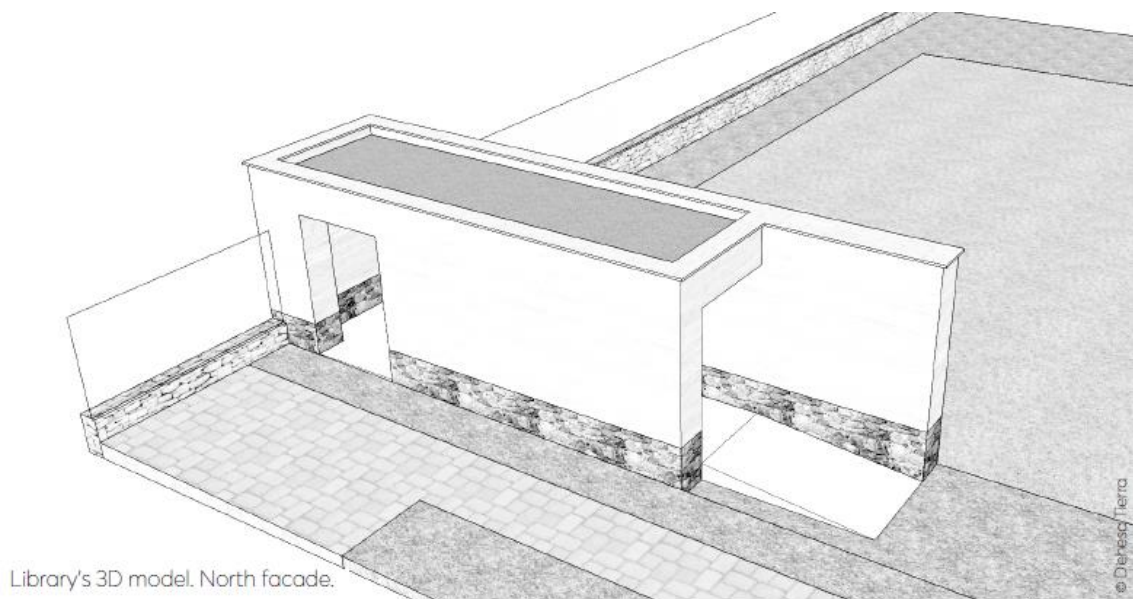
*Figura 8. Flujo de trabajo*

# 2 DESCRIPCIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

## 2.1 Información Inicial

Los datos de partida para la elaboración de este trabajo final de grado los encontramos en el documento “#5 *Desing and Build with Rammed Earth*” elaborado por la asociación Dehesa Tierra en el año 2018. En él se realiza una descripción detallada de todas las fases para construir este pequeño almacén de libros, así como las propiedades de los materiales y elementos utilizados.

Según esta información inicial, el diseño de la construcción es una planta con forma rectangular, cuyas dimensiones son 2,40 metros x 7,5 metros y una altura de 2,90 m<sup>2</sup>, compuesto por dos muros: en forma de L y de I. Esto hace una superficie construida de 18 m<sup>2</sup> y útil de 11,25 m<sup>2</sup> [4]. La orientación del edificio ha sido previamente estudiada en términos de eficiencia energética (luz solar, ventilación, visibilidad), así como los dos accesos: uno desde la piscina y otro desde la cafetería. En el interior encontramos tres hornacinas, que servirán para almacenar libros, y tres ventanas en el muro frontal.



Library's 3D model. North facade.

**Figura 9.** Modelo 3D elaborado por Dehesa Tierra. Vista general

A continuación, se enumeran grosso modo las fases de construcción según su orden de ejecución. Como fases previas: diseño del edificio, testeo de muestras de tierra para la elaboración de los muros de tapia y elaboración manual de los encofrados. A continuación, construcción del cimiento y sobrecimiento, colocación de los encofrados, preparación de la mezcla, colocación de ésta y compactación. Por último, construcción de la cubierta en las siguientes fases: colocación de una viga collar y unión a los muros, levantamiento de los pretiles de tapia, colocación y unión de vigas transversales, colocación de tablas de madera y construcción de la cubierta vegetal mediante una membrana impermeabilizante, una capa absorbente, un filtro de partículas y una capa de sustrato vegetal rodeada de piedras.

En el siguiente desglose se describen algunas características principales de las partes más importantes de la construcción:

- Cimiento y sobrecimiento: dos semanas antes de comenzar el proyecto de tierra cruda, se llevó a cabo la construcción de los cimientos de hormigón armado de 30 centímetros de profundidad y sobre él, un

muro de piedras con mortero de cal de 1,2 metros de altura. Este trabajo fue encargado a una pequeña empresa local, cuya elaboración fue desempeñada por un especialista en esta tradicional técnica.



*Figura 10. Construcción del sobrecimiento*

- Muros de tapia: se utilizaron los paneles de madera disponibles en el mercado para los encofrados y se diseñaron algunos específicos elaborados por Dehesa Tierra para las hornacinas y ventanas. Para elaborar la mezcla de tierra se utilizó una mezcladora horizontal tipo Mammüt TM 95 de 4,5 kW, con capacidad de 240 litros. Se determinó que el tiempo óptimo de mezclado era de 3 minutos en seco y tras la adición de agua, otros 3 minutos [4].

Una vez colocados los encofrados y listo el material, se vertió la mezcla en el interior en tongadas de 15 centímetros de espesor y se procedió a una compactación manual de cada tongada con un pisón de 6kg: primero en los bordes y esquinas y después, en el resto de la superficie. Este proceso habitualmente requiere repetirse, al menos, tres veces para alcanzar la densidad objetivo, sin embargo, se realizó tantas veces como fuera necesario hasta que se observó que no era posible compactar más el material.



*Figura 11. Compactación in situ*

Estos muros se dividieron en 9 elementos y se construyeron con la técnica “*slip and strip*” [4], es decir, primero los elementos 1 y 3 y a continuación, el elemento 2. Estos se unen mediante una conexión macho-hembra.

- Cubierta: una vez finalizados los muros, se colocó una viga perimetral de madera de sección cuadrada de 15 centímetros de lado. Existe cierta incertidumbre sobre cómo está unida esta viga collar con los muros, pero según información adicional, se procedió a una unión simple mediante algunas puntas de cabeza plana de 10 centímetros en los laterales de la viga.





*Figura 12. Construcción de la viga collar*

A esta viga perimetral, se unieron mediante tornillos de 22 centímetros catorce vigas transversales de sección rectangular 7,5 x 15 centímetros con un apoyo de 6 centímetros sobre ésta. Dichas vigas están distanciadas entre sí 53 centímetros.



*Figura 13. Detalle de la unión entre viga collar y viguetas*

Tras finalizar la estructura principal de madera, se procedió a la construcción de los pretiles sobre la viga perimetral o collar. Este elemento de tapia es necesario para la construcción de una cubierta plana y cuenta con una altura de 60 centímetros y un espesor de 25 centímetros.

Para la cubierta plana se colocaron tablas de madera de 1 centímetro de espesor y superpuestas entre sí 1/3 de su ancho. Sobre estas, se instalaron las siguientes capas en el orden descrito:

- Membrana impermeabilizante EPDM (caucho de polietileno propileno dieno monómero) de 1,5 milímetros conectada a una tubería para el desagüe del agua acumulada.

- Lámina de retención absorbente de 1 centímetro de espesor.
- Capa de drenaje formada por un panel de plástico alveolar (PET) relleno de grava 5/2 mm y un filtro geotextil de 3 milímetros de espesor que impidan la penetración de partículas finas.
- Capa de sustrato de especies vegetales de 8 centímetros rodeada por un anillo perimetral de 20 centímetros de ancho formada por cantos rodados de diámetro máximo 6 centímetros.

Este sistema de cubierta ofrece la ventaja de no necesitar una pendiente para evacuar el agua de lluvia. Sin embargo, requiere de cierto mantenimiento pues el punto de descarga puede obstruirse. Para hacer una revisión si fuese necesario, se instaló una caja de registro de fácil acceso.



*Figura 14. Proceso de construcción de la cubierta*

Canal Extremadura realizó un reportaje sobre el proceso de construcción de este proyecto y está disponible en [https://www.youtube.com/watch?v=XF5DTb\\_VZrU&t=141s](https://www.youtube.com/watch?v=XF5DTb_VZrU&t=141s)

## 2.2 Información in Situ

El día 14 de febrero de 2020 se organizó una visita a Valverde de Burguillos con salida desde la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, con el propósito de conocer de primera mano el resultado logrado. El grupo estaba compuesto por los siguientes integrantes: D. Mario Solís Muñiz como tutor de este trabajo y responsable de la visita, el doctorando D. José Daniel Rodríguez, el ayudante de laboratorio e ingeniero civil D. Javier Gómez Bermudo y el arquitecto y miembro de la asociación Dehesa Tierra, D. Arturo Jiménez Viera, presente en el desarrollo del proyecto y sus fases de construcción.

Esta visita tuvo como objetivo principal tomar las medidas finales de la construcción que puedan ser de utilidad para la elaboración del modelo de elementos finitos.

En la primera toma de contacto pudimos conocer el estado actual de la construcción, observando algunos signos de deterioro y medidas de prevención realizadas a posteriori. Como se observa en la Figura 14, apareció una grieta vertical en el dintel de la puerta frontal que recorre todo el pretil, demostrando un punto débil de la estructura. Esto puede haberse debido a una resistencia a flexión insuficiente por parte del tablón de madera sobre la que se ejecutó dicho pretil. Además, se dotó de un enfoscado de mortero para proteger estas zonas del lavado del material debido a la acción directa del agua proyectada por el sistema de riego.





*Figura 15. Vista frontal de la estructura.*

En algunas zonas concretas de los muros se observó un lavado de finos provocado por agentes meteorológicos externos, dejando visto el material más grueso de la mezcla (Figura 16). Este es un síntoma común en este tipo de estructuras que se encuentran a la intemperie.



*Figura 16. A) Lavado de finos en los pretiles. B) Material fino acumulado en el alféizar de las ventanas*

En la parte interior del almacén de libros se observan zonas irregulares como resultado de una insuficiente compactación, con principal presencia en la zona de los pretiles y huecos provistos para las ventanas.





*Figura 17. Heterogeneidad de la tapia en la zona superior del muro*

Gracias a una escalera provista por el encargado del ayuntamiento, pudimos tener acceso a la cubierta, donde comenzaba a crecer vegetación autóctona. En la siguiente imagen podemos observar los acelerómetros triaxiales utilizados en los ensayos no destructivos llevados a cabo, rudimentariamente fijados a la cubierta.



*Figura 18. Cubierta vegetal*

Mientras los ensayos no destructivos eran desarrollados, con la ayuda de D. Arturo Jiménez Viera procedimos a medir con una cinta métrica la mayor cantidad de dimensiones geométricas posibles. Como resultado, el autor de este trabajo realizó los planos de la estructura que se muestran en el siguiente apartado. Estas medidas tomadas sirvieron como información inicial para comenzar a elaborar el modelo de elementos finitos, con algunas



hipótesis que se explicarán en dicho apartado.

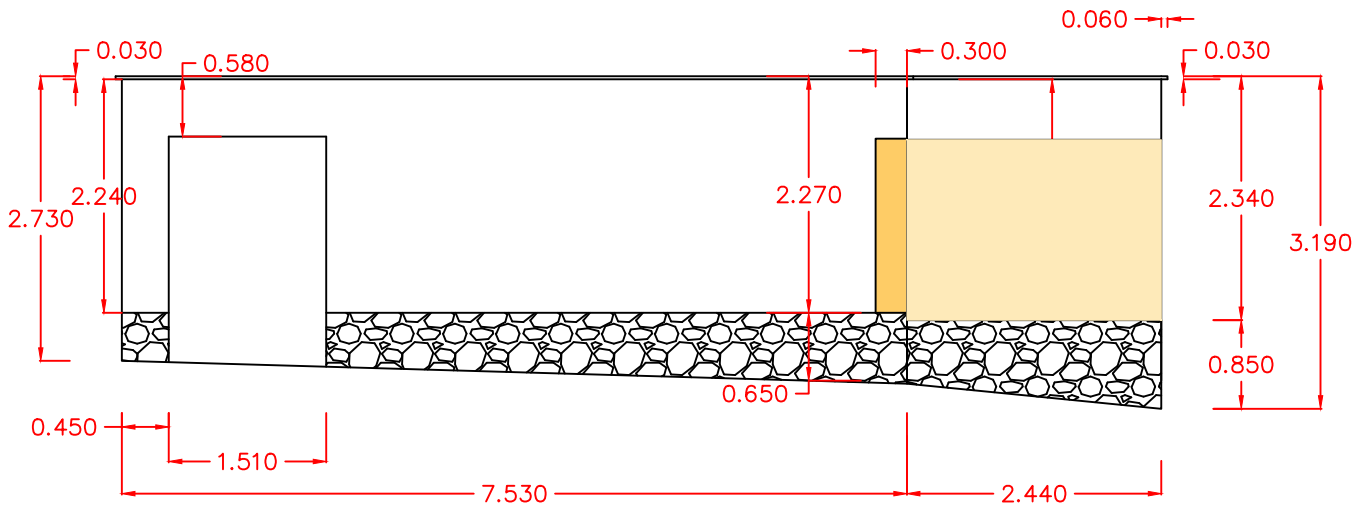


*Figura 19. Material de ensayos realizados in situ*

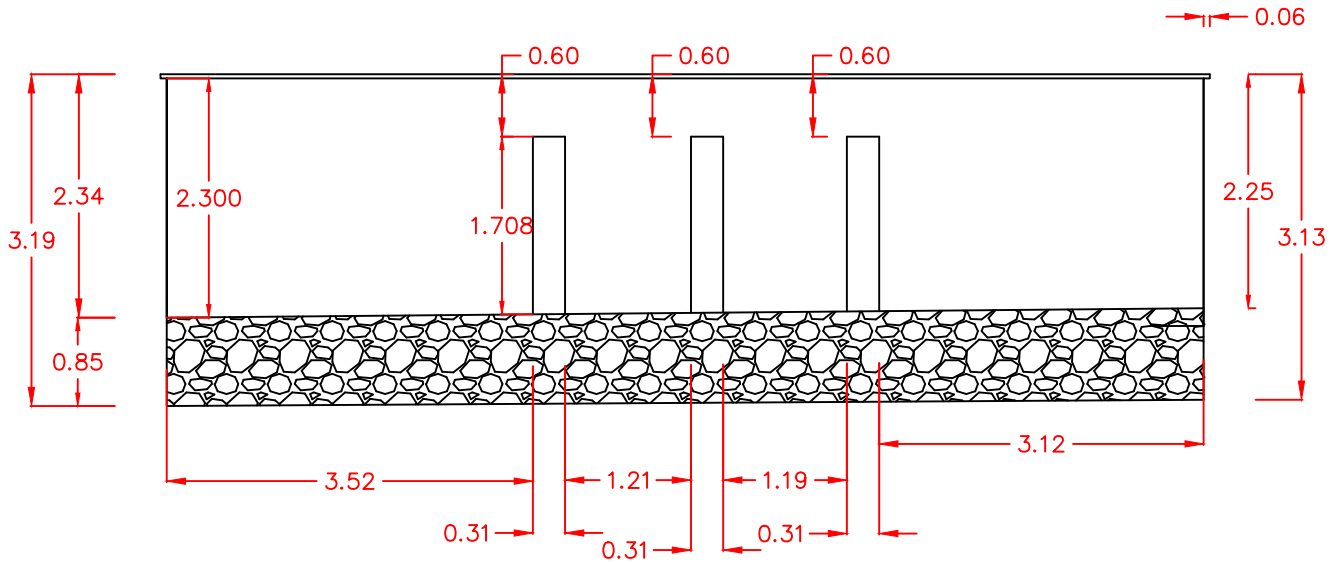
## 2.3 Planos

Utilizando las medidas tomadas en la visita se procedió a elaborar los planos de la construcción ejecutada. Estas medidas pueden diferir de la proporcionada en la información inicial debido a la precisión del instrumento de medida y a errores in situ. En general, todas ellas difieren menos del 3% de las de diseño.

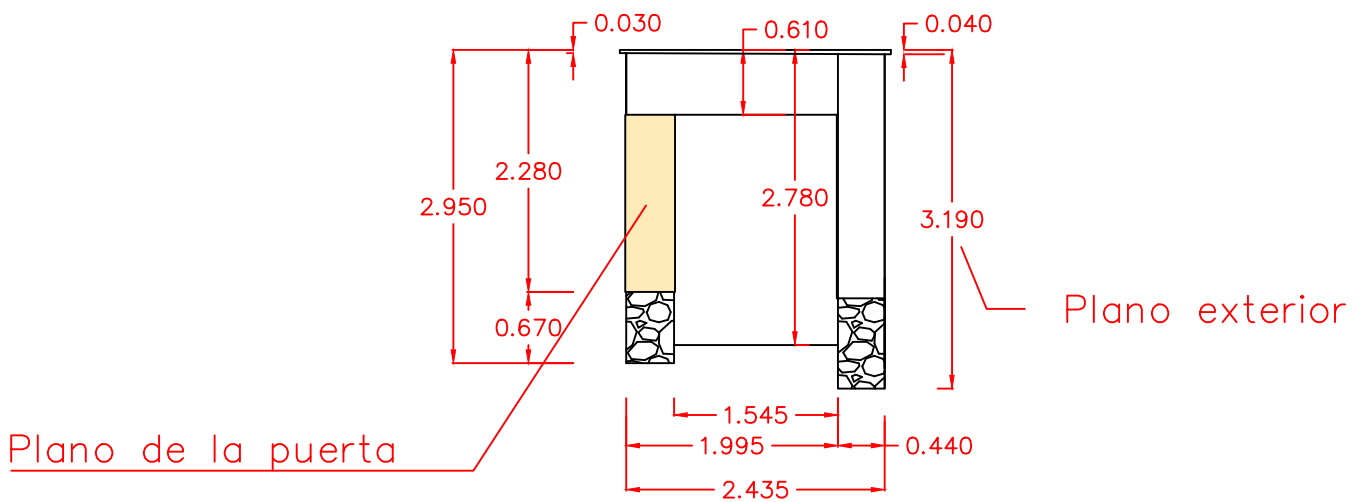
### PERFIL IZQUIERDO



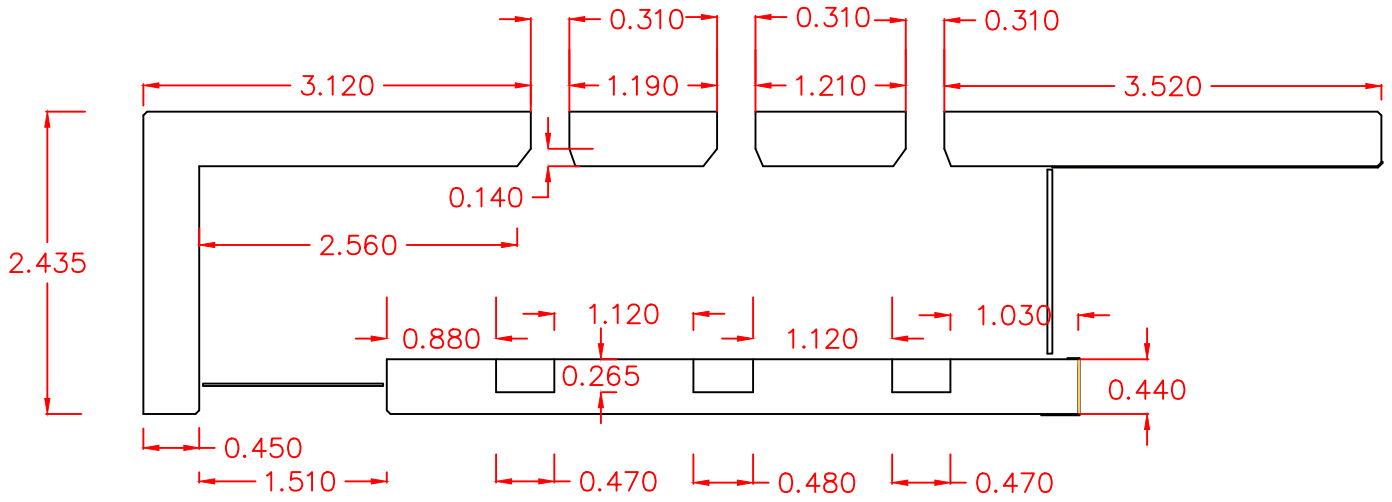
### PERFIL DERECHO



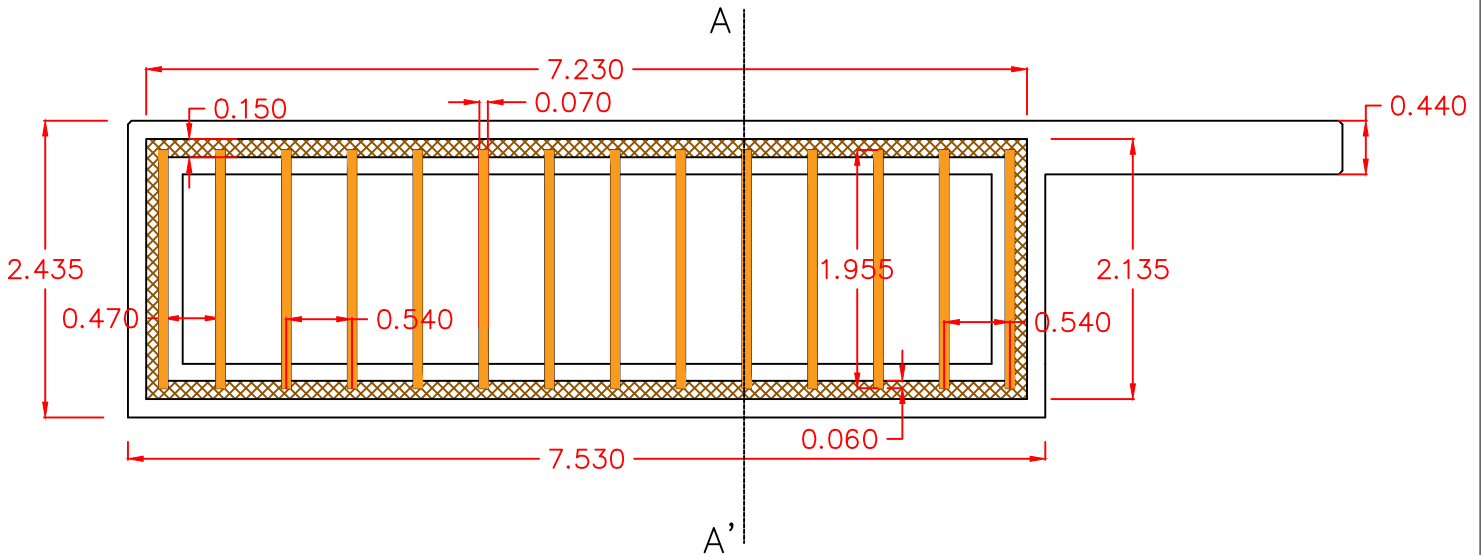
### VISTA FRONTAL



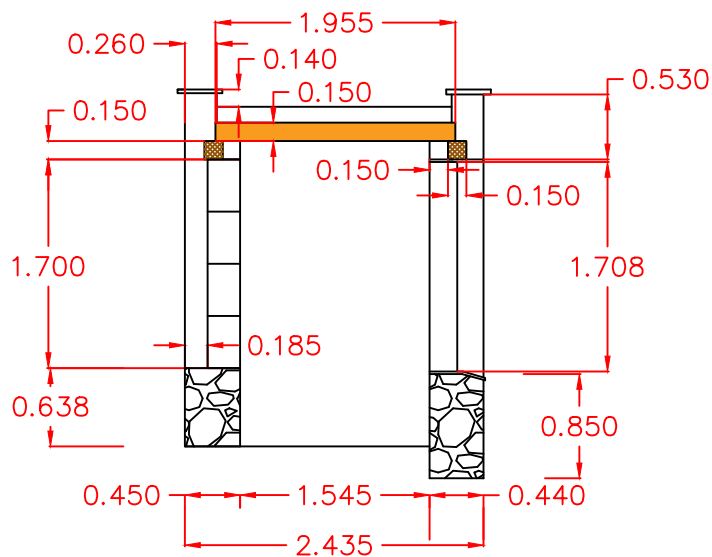
### VISTA SUPERIOR MUROS



### VISTA SUPERIOR ESTRUCTURA



### SECCION AA'



## 2.4 Descripción de los materiales

Se buscaron materiales sostenibles con el medio ambiente y que pudieran provenir del contexto local. El 86% del total provinieron del entorno, en un radio máximo de 10 kilómetros. Los materiales restantes fueron obtenidos de otros lugares de la provincia (10%) y fuera de ella (4%), con el consecuente gasto debido al transporte que ello conlleva.

Comenzando por los cimientos, se destinó el 17% de los materiales. Está compuesto de hormigón HA-25 con un cemento Portland de producción local. Todos los materiales para ello (agregado y barras de acero corrugadas incluidas) tuvieron que ser compradas en el mercado.

Para el sobrecimiento se utilizó el 27% de los materiales. Está formado de 10 m<sup>3</sup> de piedra caliza recogida de restos de muros que dividían una parcela agrícola, unidas entre sí por mortero de cal NHL5 adquirido en el mercado. El tamaño máximo de estas piedras oscilaba entre 5 y 40 centímetros.

El grueso de los materiales, un 44%, se destinó a los muros de tapia. Al no encontrar un buen material en los alrededores más próximos a la construcción, se recurrió a una cantera ubicada en el municipio de Atalaya, a 6 kilómetros de Valverde. Este material fue sometido a pruebas físicas (granulometría, Proctor Normal y clasificación del suelo) y mecánicas (compresión) por los laboratorios de la Universidad de Sevilla (España).



*Figura 20. Muestras de material de tapia para su estudio*

Los resultados determinaron que era una mezcla adecuada y mejoraba sus propiedades significativamente al ser mezclada en volumen con un 20% de arena. En total se utilizaron 17 m<sup>3</sup> de mezcla para la elaboración de los muros y pretilos. Todos los elementos de carpintería como paneles de encofrado, ventanas y puertas, así como tejas cerámicas para hornacinas, fueron compradas.

Por último, la composición de la cubierta vegetal requirió diferentes materiales de construcción. Todas las capas superiores que lo componen fueron compradas, al igual que los elementos estructurales de madera tipo pino silvestre y sus elementos de unión (tornillería).

## 2.5 Detalles constructivos

En las siguientes figuras se muestran de manera más detallada algunas fases de construcción específicas y planos que puedan servir de ayuda al lector.

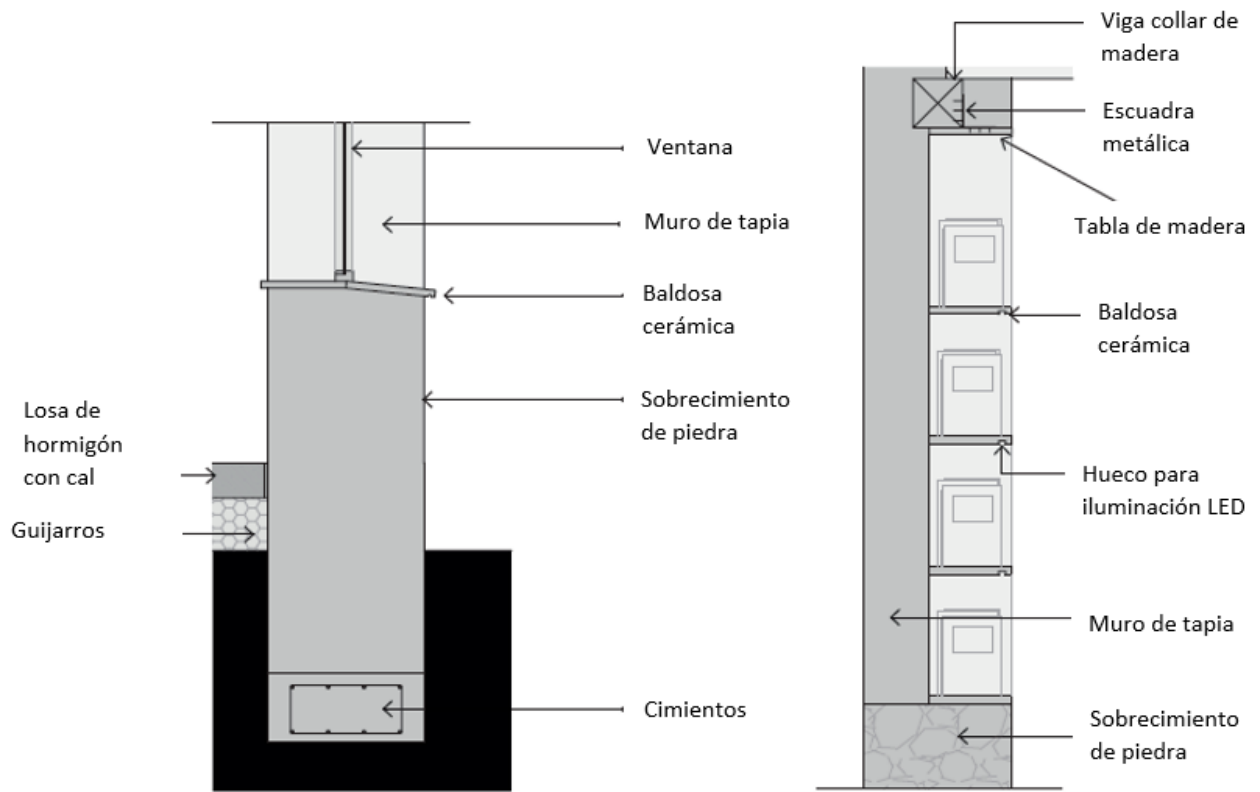


*Figura 21. Piedras colocadas para rellenar el espacio entre el sobrecimiento*



*Figura 22. Detalle de la conexión macho-hembra entre elementos de tierra. Elementos que componen el encofrado.*

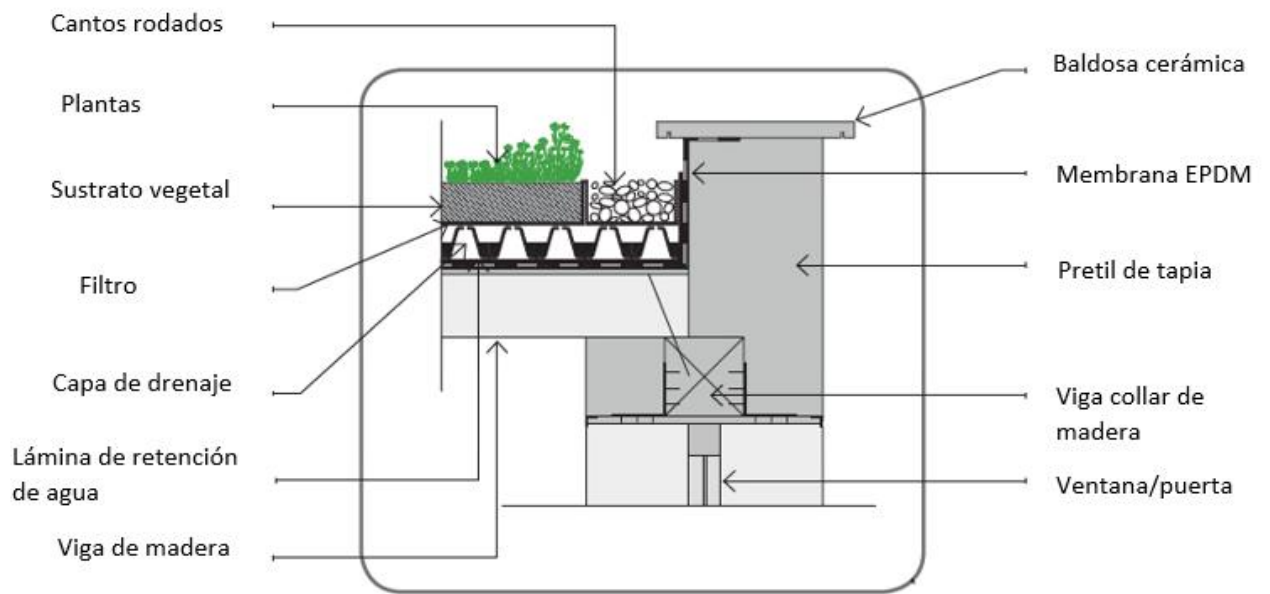




**Figura 23.** a) Sección del muro con ventanas b) Sección del muro con hornacinas



**Figura 24.** Fotografía del interior de la construcción. Detalle del recubrimiento de mortero cercano a la puerta frontal y en las tres hornacinas.



**Figura 25.** Sección de la unión entre el muro, pretil y cubierta vegetal



**Figura 26.** Vista trasera de gárgola de evacuación pluvial y chafalán en las esquinas de los muros

## 3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

---

### 3.1 Modelado 3D en AutoCAD

El autor de este trabajo elaboró un modelo gráfico con la herramienta AutoCAD para una mejor comprensión de las medidas de la estructura y mayor facilidad a la hora de elaborar el modelo de elementos finitos. Este paso es completamente opcional, pues no es necesario para construir el modelo en ANSYS.

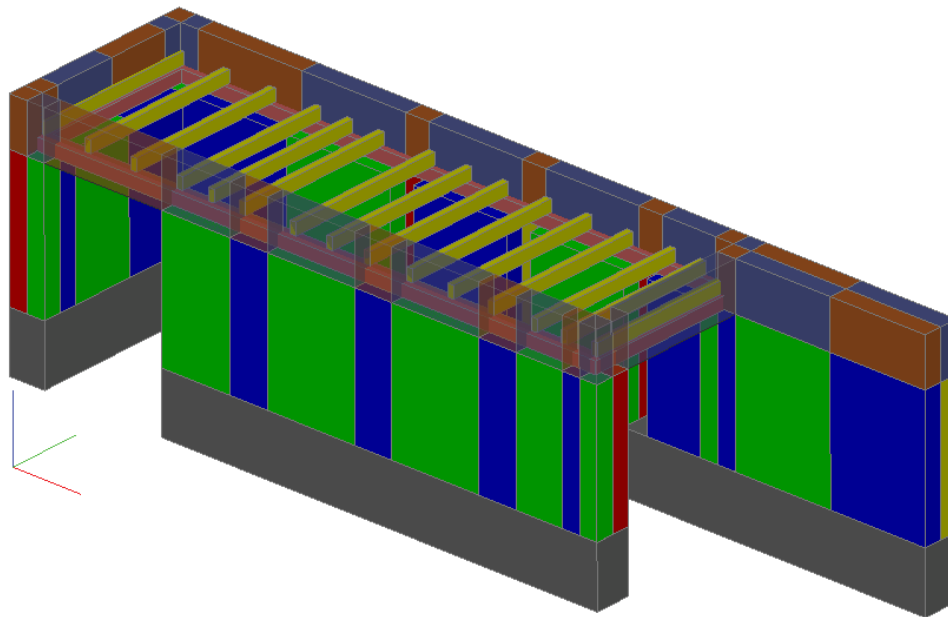
En este modelo gráfico, que luego será trasladado a ANSYS, se han hecho las siguientes simplificaciones para reducir la geometría en el modelo de elementos finitos:

- Supondremos medidas horizontales y verticales con el plano de tierra, no existiendo desnivel entre las distintas partes de la construcción.
- Algunas medidas tomadas in situ, como son el espesor de los muros, el ancho de las puertas o de las hornacinas, se han unificado a una sola medida.
- Se ha mantenido el mismo número de vigas transversales, pero se ha modificado ligeramente la ubicación de éstas, con el objetivo de hacer coincidir el eje de una viga con el inicio o fin de los huecos de las hornacinas y ventanas.
- Se ha eliminado las terminaciones de los muros de tipo chaflán.
- La profundidad de las hornacinas se ha hecho coincidir con la mitad vertical del muro, pasando de 26.5 centímetros a 22.5 centímetros.
- El ancho de los pretilos se ha tomado como la mitad vertical del muro, pasando de 25 centímetros a 22.5 centímetros.

Para la realización del modelo ha sido necesario manejar comandos para crear volúmenes utilizando > Superfplana > Extrusion. Se dibujó la planta del edificio en el plano del terreno, dividiendo el sobrecimiento y el muro en dos mitades a través de su eje longitudinal. Una vez creadas las superficies, podemos extruir la altura del sobrecimiento.

Seguidamente, se realizó el mismo proceso para levantar los muros de tapia y se colocaron las líneas que representan los ejes de la viga collar. Las vigas transversales fueron reubicadas, tratando de mantener una equidistancia mínima entre ellas. Los puntos de ubicación de estas vigas fueron calculados utilizando procesos gráficos. Por último, para los pretilos se repitió el proceso de extrusión.





*Figura 27. Modelo gráfico 3D en AutoCAD*

Las medidas más significativas del modelo son las siguientes:

- Altura del sobrecimiento = 0.70 metros
- Altura de los muros de tapia = 1.70 metros
- Espesor de los muros = 0.45 metros
- Ancho de la construcción entre ejes de muro = 2.005 metros
- Longitud del tacón = 2.44 metros
- Ancho de la puerta lateral = 1.51 metros
- Altura de los pretilas = 0.60 metros

Una vez creado el modelo gráfico, previendo que deberá ser trasladado a ANSYS, debemos elegir dónde colocar el sistema de referencia de trabajo, utilizando la opción SCP de AutoCAD. Este sistema de referencia elegido ha sido tal que, el plano XY sea el plano del suelo y el punto de origen esté en el eje del muro:

- EJE X: eje longitudinal de la construcción (Figura 27. Eje rojo)
- EJE Y: ancho de la construcción (Figura 27. Eje verde)
- EJE Z: altura de la construcción (Figura 27. Eje azul)

De esta forma, podemos consultar todas las coordenadas de todos los puntos utilizando la opción > Medir > Coordenadas punto.

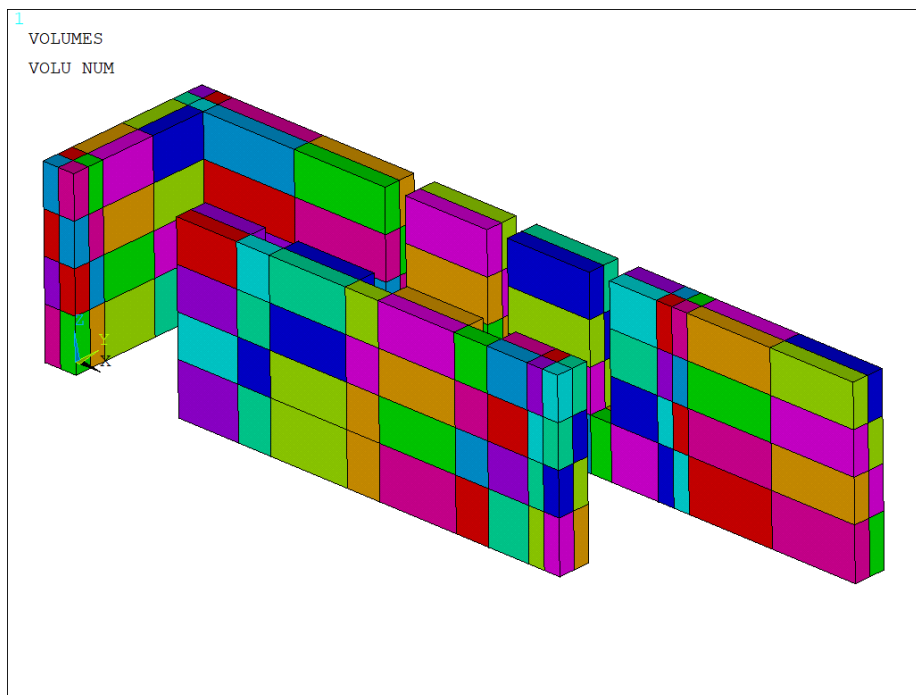
### 3.2 Construcción geométrica y conectividad

Una vez conocemos las coordenadas de todos los puntos, trasladarlos a un código de ANSYS puede resultar una tarea tediosa y repetitiva. Conociendo las capacidades del programa y optimizando esta tarea, la opción más rápida fue la siguiente: crear los puntos, líneas y áreas que forman la base del sobrecimiento y están en contacto con el terreno. Al tener la misma división vertical que los muros de tapia, el comando > VOFFST nos permite extruir dichas superficies la altura que indiquemos. De esta manera obtendríamos los volúmenes que conforman el sobrecimiento y los muros de tapia.

Debemos cumplir algunos requisitos para poder utilizar dicho comando: las líneas que conforman el área rectangular, deben definir un mismo sentido horario o anti horario. Según el sentido dado al área que queramos extruir, la altura del volumen será positiva o negativa. Esta condición explicaría por qué se ha tomado como profundidad de las hornacinas la división del muro en dos partes iguales. No es posible crear un muro con dos subdivisiones en una zona, y a continuación en tres debido a la compatibilidad de sus conectividades.

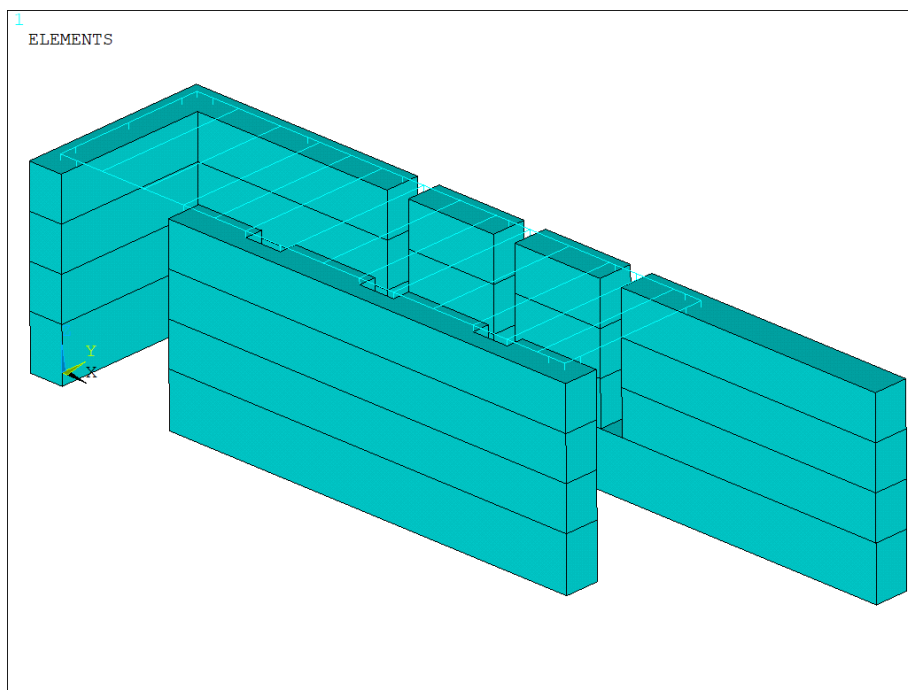
Por otro lado, el comando > VOFFST crea puntos, líneas y áreas cuando se extruye el área seleccionada, de manera que la conectividad del área horizontal resultante tiene el mismo sentido. Esto nos facilita la creación de volúmenes para el sobrecimiento y los muros de tapia, simplemente cambiando los valores de la distancia de extrusión. Además, el muro de tapia se ha dividido en tres bloques a un tercio de la altura total, permitiéndonos en el futuro modificar como se desee las propiedades de la tapia de forma gradual.

Más en detalle, cabe destacar que la profundidad real de las hornacinas es de 26.5 centímetros. Si respetásemos esta dimensión, deberíamos crear tres áreas horizontales en esta parte del muro y que, como se ha explicado anteriormente, no podría ser realizado. Además, supondría crear un área de dimensiones muy reducidas y al ser mallada, generaría una malla no regular. Por estas razones, se ha aproximado esta dimensión a la mitad del muro de 22.5 centímetros.



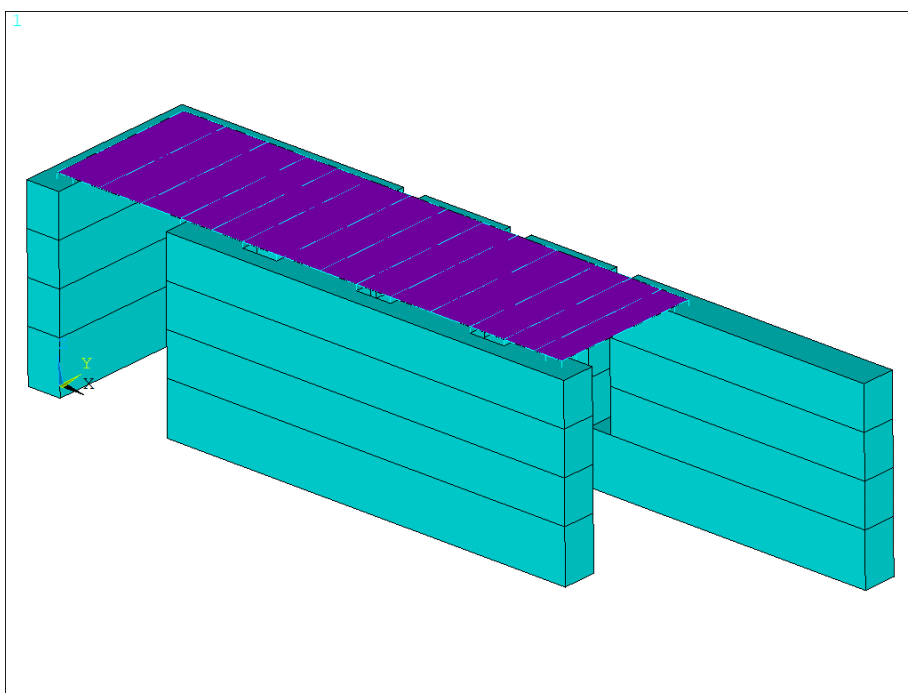
*Figura 28. Subdivisiones horizontales y verticales de los muros*

Una vez creados los volúmenes de los muros de tapia y sobrecimiento, se procede a crear los puntos y líneas que componen la estructura de madera de la cubierta. El eje de la viga collar coincide con el eje del muro y está representada en su posición real. Esta viga perimetral está dividida en partes, utilizando los puntos que resultan de la división para las vigas transversales en sus puntos de inicio y fin de las mismas.



*Figura 29. Viga collar y uniones a los muros*

Este proceso debe hacerse teniendo en cuenta la conectividad de la viga collar y de las vigas transversales, para poder crear a posteriori las áreas que representen la cubierta de madera, que soportará la cubierta vegetal.



*Figura 30. Áreas para la cubierta*

Anticipándonos al siguiente apartado, serán necesarios unas líneas que unan los puntos que conforman la viga collar y los puntos del muro de tapia.

Por último, para la construcción de los pretiles se ha utilizado como área de extrusión la mitad exterior del muro. Esto hace que se aproxime el ancho del pretil de 25 a 22.5 centímetros, simplificando mucho la construcción geométrica del modelo.

En previsión a posibles cambios o modificaciones futuras de este modelo, muchas de las medidas principales

han sido parametrizadas. A continuación, se muestra dicha medida y su nomenclatura en el código (consultar 3.7 Organización del código):

- Ht = altura de los muros de tapia
- Hs = altura del sobrecimiento
- Et = espesor del muro
- A = ancho de la construcción entre ejes de muros
- Vl = longitud del muro tacón
- Ap = ancho de la puerta lateral
- Hp = altura de los pretilas

### 3.3 Tipos de Elementos

En este modelo se han utilizado tres elementos que puedan caracterizar el comportamiento de las distintas partes de la construcción.

Tabla 1: Elementos utilizados en el modelo de ANSYS

Element Type	ID
solid185	1
beam188	2
shell181	3

El primero de ellos se ha otorgado a los volúmenes de muros de tapia y sobrecimiento. Este elemento está definido por ocho nodos, cada uno con tres grados de libertad traslacionales.

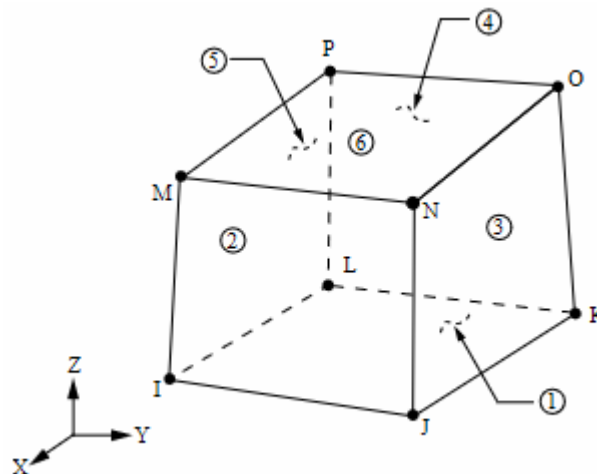


Figura 31. Solid185

El elemento Beam188 ha sido utilizado para aquellos elementos estructurales de tipo lineal, como las vigas transversales y la viga collar. Este elemento está basado en la teoría de Timoshenko, por lo tanto, incluye el giro debido a la deformación tangencial de la sección. Tiene seis grados de libertad por cada nodo: tres traslacionales (x, y, z) y tres rotacionales (x, y, z).

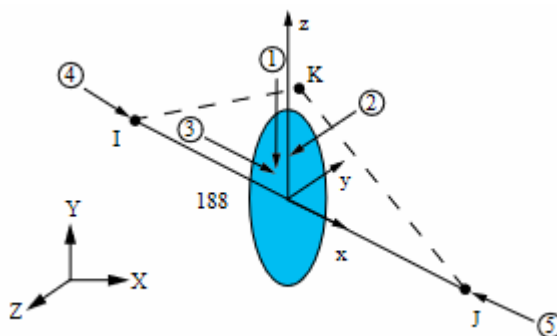


Figura 32. Beam188

El último elemento utilizado, shell181, corresponde a la cubierta compuesta por tablonces de madera de pino. Este elemento está destinado a modelizar el comportamiento de placas delgadas y moderadamente gruesas, basándose en la teoría de Reissner-Midlin, por la cual la deformación tangencial provoca un giro de la sección independiente. Es un elemento de cuatro nodos, con seis grados de libertad por cada uno de ellos: tres traslacionales ( $x, y, z$ ) y tres rotacionales ( $x, y, z$ ).

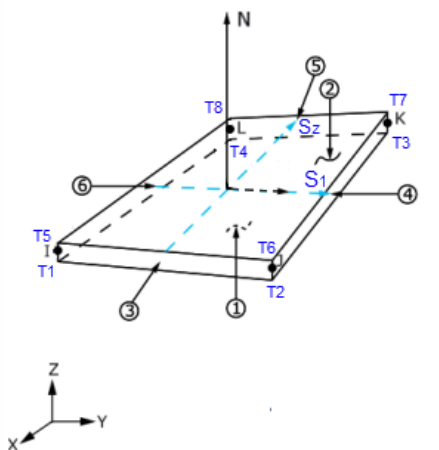


Figura 33. Shell181

### 3.4 Conexiones entre elementos

Un aspecto importante sobre el que debemos profundizar son las distintas uniones que existen entre todos los elementos que componen el modelo. En primer lugar, las condiciones de contorno se aplicarán en toda la superficie de la base del sobrecimiento, donde serán restringidos los desplazamientos en las tres direcciones de los ejes  $X, Y$  y  $Z$ . En orden ascendente, se explicarán estas uniones:

**Sobrecimiento-Muro:** la unión entre el sobrecimiento y el muro es una unión rígida por defecto, ya que comparten todos los elementos geométricos que los definen: puntos, líneas y áreas. Al ser mallado, se crearán nodos compartidos.

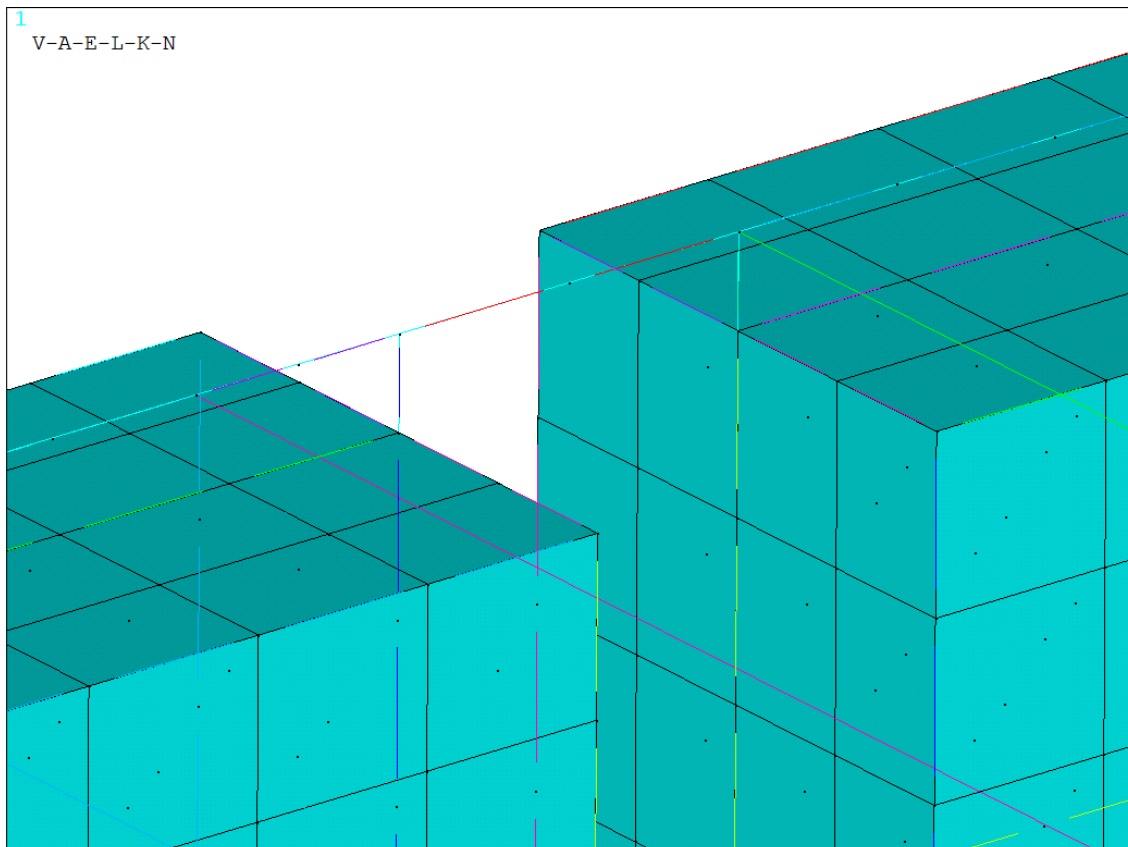
**Muro-Viga Collar:** estos elementos no comparten ningún elemento geométrico. La información sobre esta unión es escasa y no se ha encontrado cómo se resolvió durante el proceso de ejecución esta problemática. Por ello, existirá cierta incertidumbre sobre cómo sería el comportamiento real de esta unión.

Durante el proceso de elaboración de esta unión, se barajaron diferentes opciones. La primera de ellas fue utilizar el acoplamiento entre grados de libertad de dos nodos distintos a través del comando "CP". Esta opción fue llevada a cabo y debido a la complejidad para definir un margen de tolerancia correcto que utilizase nodos coherentes fue descartada.

Otra opción fue crear un sistema rígido formado por triángulos que se comportasen como un sólido rígido. La dificultad de adoptar el modelo para crear tres líneas por cada unión hizo que fuera rechazada.

Finalmente, la opción escogida fue crear elementos lineales tipo Beam188 de sección 1x1 cm que unen los puntos pertenecientes al eje del muro en sus separaciones, con los puntos perpendiculares correspondientes a la viga collar. De esta manera quedarían compatibilizados los tres desplazamientos y los tres giros, definiendo una compatibilidad de movimientos condicionada por la rigidez del elemento de unión (ver Tabla 2).

El número total de uniones dependerá de las subdivisiones creadas en el muro y asciende a 27 uniones: 3 uniones concentradas en cada esquina de la viga collar y 15 ubicadas en cada uno de los extremos de los huecos destinados a las hornacinas y ventanas, además de algunas en tramos de muro con una longitud considerable (Figura 29).



*Figura 34. Detalle conexión viga collar-muro*

**Viga collar-Vigas transversales:** para las vigas transversales se han utilizado puntos pertenecientes a la viga collar y, por tanto, al ser mallados se creará un nodo único común por defecto, simulando el comportamiento de la unión atornillada, es decir, una unión rígida. Este tipo de unión puede no corresponder con la unión real ejecutada ya que no se cuenta con una información precisa de la solución adoptada. Sin embargo, se considera que puede tener poca influencia en los resultados.

**Muro-Pretil:** De igual forma ocurre con la unión entre el muro y el pretil: comparten puntos, líneas y áreas. Esta unión provoca que entre la viga collar y el pretil no exista ningún vínculo, lo cual, está justificado según la información que podemos extraer del proceso de ejecución, donde el pretil fue simplemente vertido sobre la viga collar en una fase de construcción posterior a la construcción de la viga collar.

**Cubierta-Vigas:** La unión entre los paneles de la cubierta y las vigas transversales y collar será por defecto, ya que comparten puntos y líneas, simulando la unión atornillada entre elementos.

### 3.5 Propiedades de los materiales

La estructura está compuesta principalmente por tres materiales: piedra del sobrecimiento, tapia de los muros y madera de pino para la cubierta. Dada la solución propuesta para la unión entre el muro y la viga collar, fue necesario definir un cuarto material cuyas propiedades son asignadas por el autor de este trabajo con la aprobación del tutor. Estas propiedades influirán notablemente en el comportamiento de dicha unión.

La composición del sobrecimiento, como se ha explicado en el apartado 2.4, es heterogénea en materiales y se desconocen los orígenes de las rocas que se utilizaron. Por ello, se ha recurrido a diferente bibliografía para determinar los valores de un muro de piedra elaborado con piedra de calcarenita. Los resultados de estos estudios determinaron que el módulo Elástico puede variar entre 2-25 GPa, siendo más probable un valor alto para nuestra construcción debido al buen estado que presentan las piedras [5]. Para los valores de densidad, la incertidumbre es menor y podemos tomar valores entre 2100-2600 kg/m<sup>3</sup>. El valor del coeficiente de Poisson será de 0.3 [6].

Para el material empleado en la elaboración de los muros de tapia contamos con numerosos ensayos realizados en nuestra propia Escuela de Ingeniería. Los resultados extraídos de probetas sometidas a compresión muestran un rango de valores entre 300 y 1000 MPa [7]. Gracias a las subdivisiones horizontales en los muros realizadas en el modelo geométrico, podemos crear tres materiales cuyas propiedades varíen gradualmente del sobrecimiento hasta la zona de la cubierta. La densidad de la mezcla, en base a los resultados obtenidos de probetas fabricadas con este material en laboratorio, se ha establecido en 1927 kg/m<sup>3</sup>, pudiendo sufrir ligeras variaciones que no afectarán a los resultados. El valor del coeficiente de Poisson presenta cierta incertidumbre y se ha determinado en 0.2.

Las propiedades de la madera han sido establecidas según la normativa vigente [8]. Para una madera de pino silvestre, el módulo Elástico varía entre 8-12 GPa y la densidad entre valores de 350 a 500 kg/m<sup>3</sup>. Este material ha sido atribuido a la viga collar, vigas transversales y para la cubierta, con la única diferencia de que se ha añadido una masa repartida en la superficie de 80 kg/m<sup>2</sup> que representan el peso de las distintas capas sobre ella.

Por último, el material ficticio atribuido a los elementos de unión tendrá una rigidez de 1000 GPa. Se considera que este módulo de Elasticidad es suficiente para modelar una conexión rígida.

Tabla 2: Materiales y sus características utilizadas en el código de ANSYS

NOMBRE	M. Young [MPa]	Poisson	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	ID
Tapia inferior	1000	0.2	1927	1
Tapia media	700	0.2	1927	2
Tapia superior	300	0.2	1927	3
Madera pino	8000	0.3	500	4
Sobrecimiento	20000	0.3	2400	5
Uniones	1000000	0.1	0	6

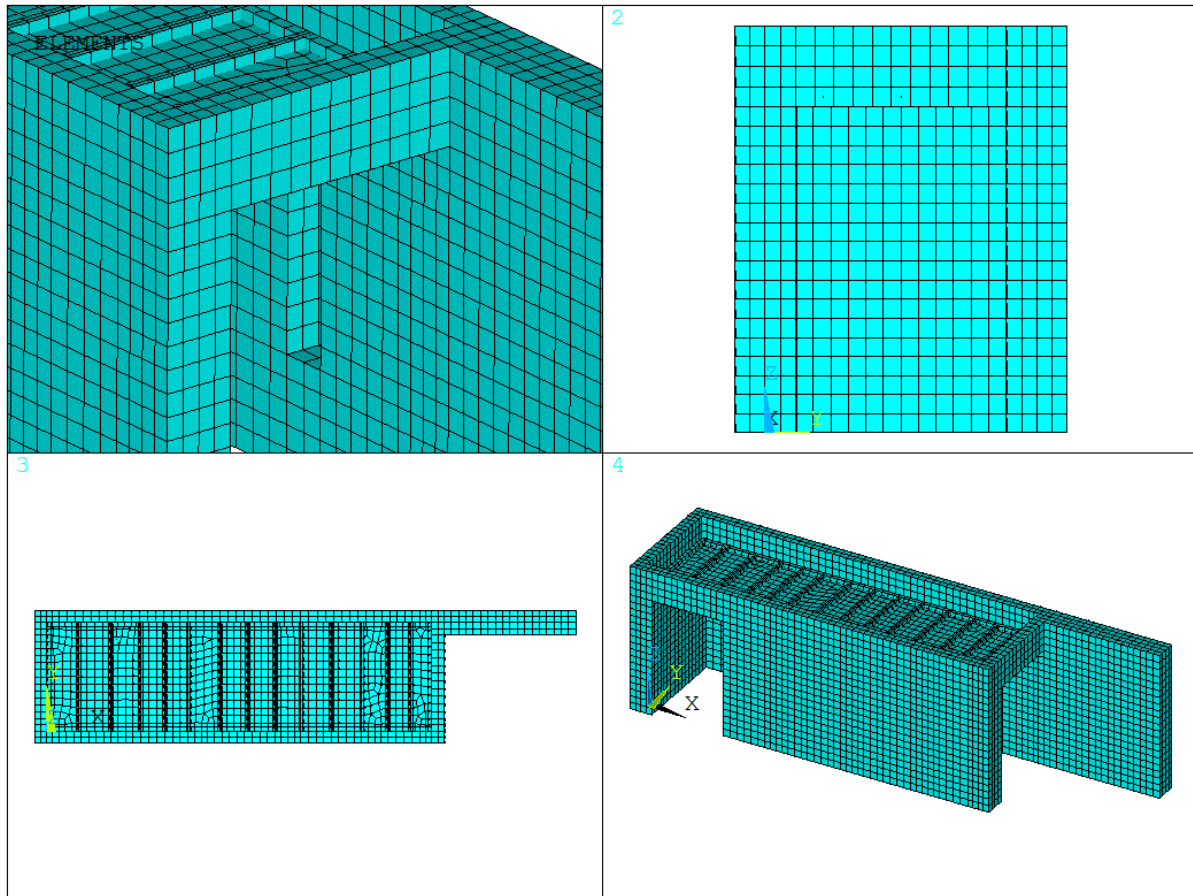
Los resultados obtenidos en este trabajo están sujetos a las propiedades atribuidas a los distintos materiales mostrados en la tabla anterior. La variación de alguna de estas propiedades podría alterar estos resultados.

### 3.6 Criterio de mallado

Existen ciertas limitaciones de elementos para una licencia de ANSYS para estudiantes. Según información oficial, este límite está en 32.000 elementos para la interfaz ANSYS Mechanical APDL. Se observó que el grueso de los elementos al mallar, se encontraba en los muros y el sobrecimiento. Las dimensiones de estos eran múltiplo de 5 centímetros, así pues, tratando de hacer un mallado lo más uniforme posible se llegó a un valor de mallado para todo el modelo de 15 centímetros, a través del comando ESIZE que especifica el número predeterminado de divisiones.

Como resultado de esta operación, el número de nodos totales asciende a 14343 y los grados de libertad del modelo.





*Figura 35. Mallado del Modelo*

### 3.7 Organización del código

El modelo completo está dividido en ocho archivos individuales que permiten al usuario prescindir de una o varias partes del modelo para comparar los distintos resultados. Esta organización es mucho más clara y ayuda a una mejor comprensión del funcionamiento del modelo.

- 1- GEOMETRIA: es el archivo más extenso y agrupa las características geométricas del modelo completo, puntos y líneas, así como los parámetros principales que controlan las dimensiones geométricas principales: altura de los muros de tapia ( $ht$ ), altura del sobrecimiento ( $hs$ ), espesor del muro ( $et$ ), longitud de la construcción en el eje Y ( $a$ ), longitud del tacón ( $vl$ ) y longitud de la puerta del plano XZ ( $ap$ ).
- 2- MUROS DE TAPIA Y SOBRECIMIENTO: esta parte agrupa la modelización del sobrecimiento y de los muros de tapia a través de sus materiales (ID:1,2 y 3 para la tapia; ID:5 para el sobrecimiento) y el elemento asignado a ellos (SOLID185). Además, se define el mallado de los elementos y su criterio.
- 3- VIGA COLLAR: este tercer archivo define la modelización de la madera de pino (ID:4) y el elemento lineal utilizado en la viga collar (BEAM188), así como la sección de esta viga y su posterior mallado. Se establece de nuevo un criterio de mallado (en este caso el mismo), con la finalidad de poder cambiar de criterio en cada archivo.
- 4- UNION VIGA COLLAR-MURO: debido a la relevancia de esta unión, se destinó un archivo a esta parte con la función de poder modificar las características de las uniones y comprobar los resultados. En él, primero se crea la geometría de líneas a través de puntos creados en el archivo GEOMETRIA, se define el material de las uniones (ID:6), el elemento lineal empleado (BEAM188), la sección ficticia asignada y el criterio de mallado independiente del resto del modelo. Por último, el mallado de esta unión.



- 5- VIGUETAS: la geometría de las viguetas, por simplificación del código fue creada en el archivo GEOMETRIA y, por tanto, en este archivo se define la sección de las viguetas, el elemento lineal (BEAM188) y su mallado, con un criterio de mallado independiente del resto. El material utilizado (ID:4) es el definido en el archivo VIGA COLLAR.
- 6- CUBIERTA: se definen las áreas que componen la cubierta, el elemento (SHELL181) y las características de la sección. Para el mallado, se asigna el material de madera de pino (ID:4) definido en el archivo VIGA COLLAR. Al igual que el resto del modelo, se establece un criterio de mallado independiente y su posterior mallado.
- 7- PRETILES: este archivo, más extenso que los anteriores, regula los parámetros que controlan la altura de los pretilos (hp) y la anchura (apr). Se crean los volúmenes que conforman los pretilos, definiendo las líneas y áreas necesarias para ello y el mismo elemento utilizado en MUROS DE TAPIA Y SOBRECIMIENTO (SOLID185). Al igual que el resto del modelo, se establece un criterio de mallado independiente y su posterior mallado.
- 8- SOLUTION: por último, un único archivo controla la resolución del modelo, permitiendo al usuario modificar el tipo de resultado perseguido.

## 4 RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados del modelo que hemos realizado y se ha descrito en los capítulos anteriores, llamado Modelo Inicial. Además, se han hecho numerosas modificaciones, resultando un total de nueve modelos que servirán para analizar la influencia de los distintos elementos que componen la estructura.

Estos resultados han sido obtenidos haciendo un tipo de análisis modal (ANTYPE, MODAL), utilizando el método de extracción de modos Block Lanczos (MODOPT, LANB) y la matriz de masa concentrada (LUMPM, 1). Se mostrarán los primeros 20 modos de vibración y se analizará la importancia de estos en términos de masa movilizada en el caso de una excitación en el eje Y (Figura 27: Eje verde), ya que se ha considerado esta dirección como la más flexible al tener dimensiones mayores en la dirección X (Figura 27: Eje rojo).

Debido a la cantidad de modos extraídos para pequeños intervalos de frecuencias y la ausencia de modos claramente dominantes, serán representados aquellos con una influencia mayor según el parámetro que divide la Masa Efectiva movilizada ( $M_{\text{eff}}$ ) entre la Masa Total ( $M_{\text{total}}$ ). Para una mejor comprensión de los movimientos, se utiliza una representación visual de los desplazamientos nodales en la dirección de la excitación.

Para una mayor facilidad al referenciar los resultados, se nombrará “muro en I” al muro de tapia cuya longitud recorre el eje X en  $Y=0$ , uniendo las dos puertas de la construcción. El resto del muro será llamado muro en L y recorre la parte de muro que une el tacón y la zona de las ventanas con la que recorre el eje Y en  $X=0$  (Figura 29).

### 4.1 Resultados del modelo inicial

En el modelo definido como inicial, que recoge todas las características descritas en este trabajo, los modos y frecuencias naturales obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 3: Resultados Modelo Inicial

Modo	Frecuencia (Hz)	$M_{\text{EFF}}^Y / M_{\text{TOTAL}}$
1	9.53	0.300
2	11.32	0.043
3	14.01	0.009
4	15.68	0.007
5	16.84	0.000
6	18.04	0.007
7	19.69	0.000
8	20.81	0.000
9	21.12	0.000
10	21.23	0.002
11	21.30	0.000
12	22.89	0.001
13	23.92	0.000
14	24.99	0.000
15	26.52	0.017
16	27.11	0.001
17	28.39	0.011
18	28.99	0.002
19	29.95	0.000
20	30.58	0.050
	TOTAL	0.451

El modo 1 del modelo original se origina a una frecuencia de 9.53 Hz y puede identificarse como un primer modo de flexión vertical de ambos muros (Figura 36), cuyos movimientos son compatibilizados por la estructura rígida de madera que compone la cubierta. Como se verá en posteriores resultados mostrados, este modo es idéntico para los modelos cuyas modificaciones han sido realizadas en las características de los materiales, sin embargo, no será así para los modelos con variaciones geométricas o de elementos.

El modo 2 a una frecuencia de 11.32 Hz es un segundo modo de flexión vertical, desarrollando toda su forma en el muro en L (Figura 37). Los movimientos se concentran en la parte superior de la estructura, concretamente en los pretilos, permaneciendo el resto inalterado. El movimiento máximo se encuentra en el extremo del tacón.

Para una frecuencia de 14 Hz aparece el modo 3, identificado como un tercer modo de flexión vertical. Existe una zona concentrada de debilidad en el dintel de la puerta del muro en I (Figura 38). Esto es debido a una unión deficiente entre el pretil y la viga collar que permite la libertad de movimientos del pretil.

El siguiente modo de vibración influyente es el modo número 15, a una frecuencia de 26.52 Hz. Puede ser identificado a priori como un modo de flexión vertical del muro en L, concentrando los desplazamientos máximos en los pretilos en la zona destinada a las ventanas, donde se produce una discontinuidad del muro (Figura 39). El hecho de que el resto de la estructura permanezca inalterada (tacón y muro en I), unido a la presencia de modos locales de las vigas transversales que componen la cubierta puede llevarnos a la conclusión de que no se trata de un modo de flexión propio del muro, sino de un movimiento del muro provocado por la flexión de estas vigas, que transmiten el giro a la viga collar, provocando un torsor y a su vez, transmitiendo el giro a través de las uniones al muro (Figura 39. Vista superior izquierda).

El modo 17 es un modo que aparece a una frecuencia de 28.39 Hz (Figura 40) y es similar al modo 15 anteriormente descrito (Figura 39), ya que también se trata de un modo de flexión vertical de los muros. Sin embargo, afecta a toda la estructura. Los movimientos, en comparación, son más acusados y los valores máximos se producen en los pretilos y en el extremo del tacón en la zona superior. Además, se observan (Figura 40. Vista inferior izquierda) movimientos en el pretil de la puerta frontal y desaparecen modos de vibración locales de la cubierta.

El último modo influyente extraído se produce a 30.57 Hz. La identificación de este modo puede resultar confuso. Por una parte, observamos movimientos que podrían ser de torsión alrededor del eje X de los pretilos (Figura 41. Vista superior derecha). Por otro lado, el giro de los muros que, debido a la unión propuesta, se transmite a las viguetas transversales de la cubierta, sugiere que podría tratarse de un modo de flexión de los muros.

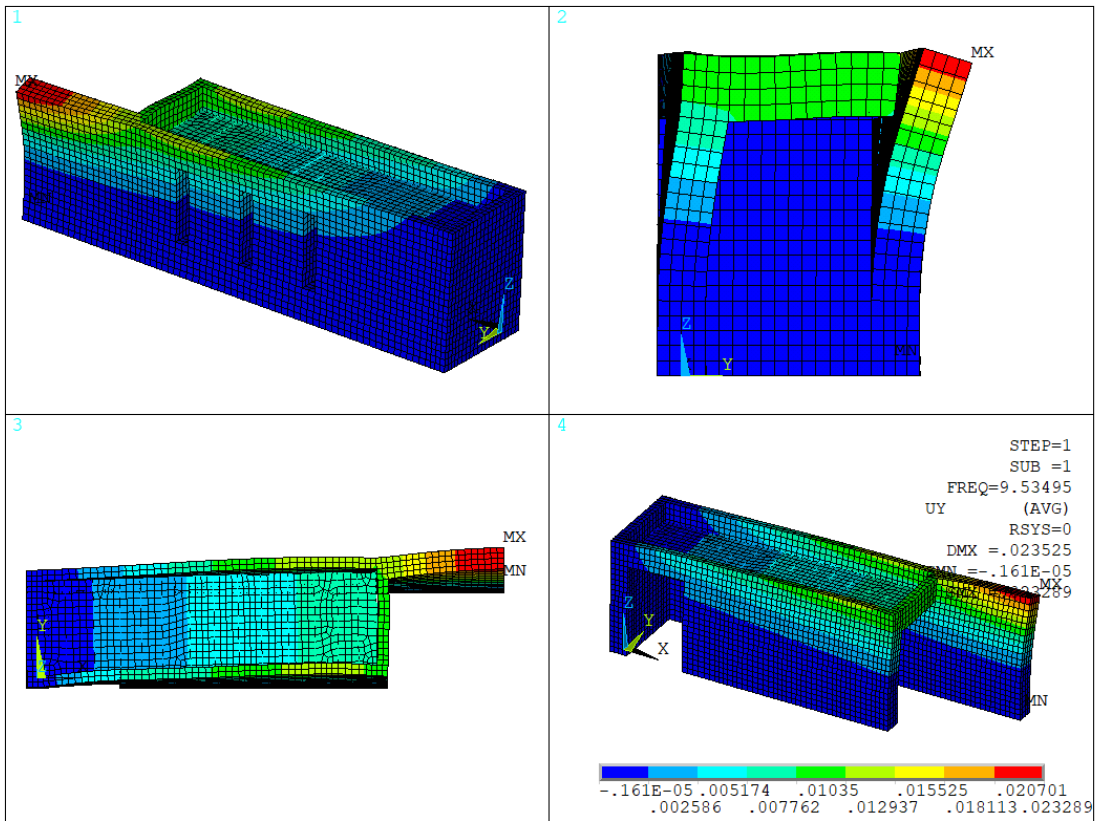


Figura 36. Modo 1 del modelo Inicial (9.53 Hz)

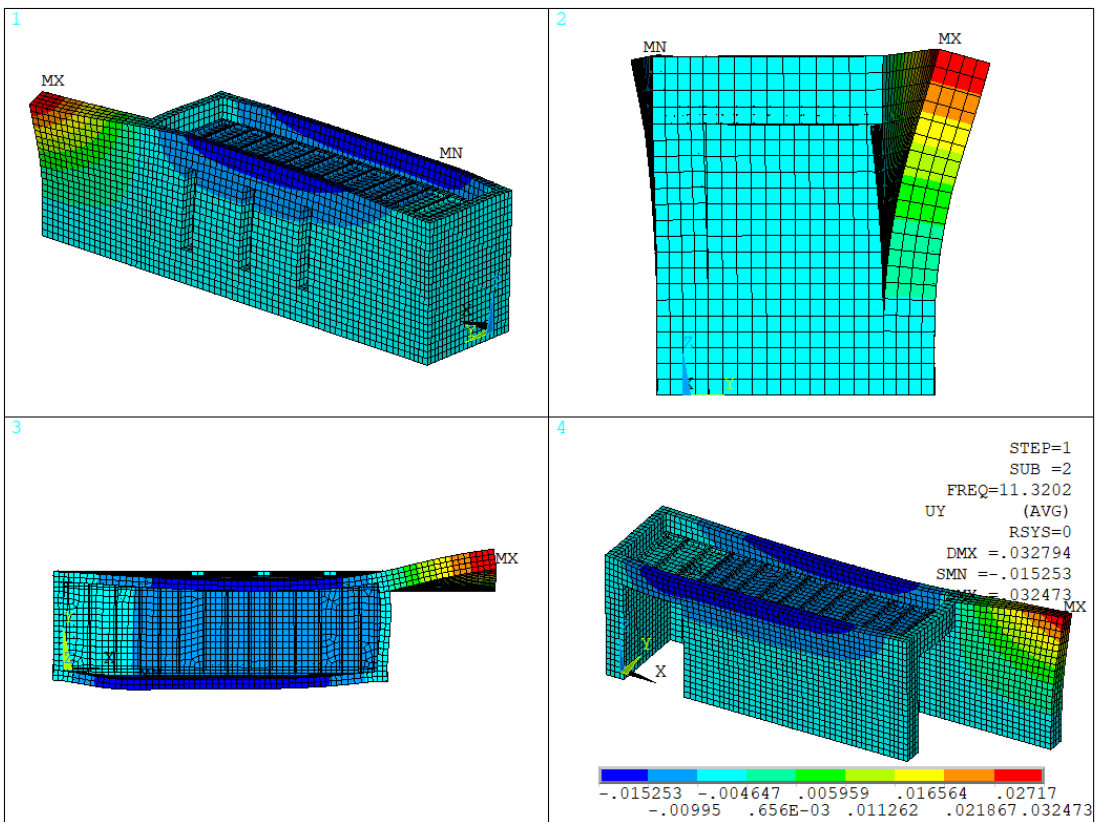


Figura 37. Modo 2 del modelo Inicial (11.32 Hz)

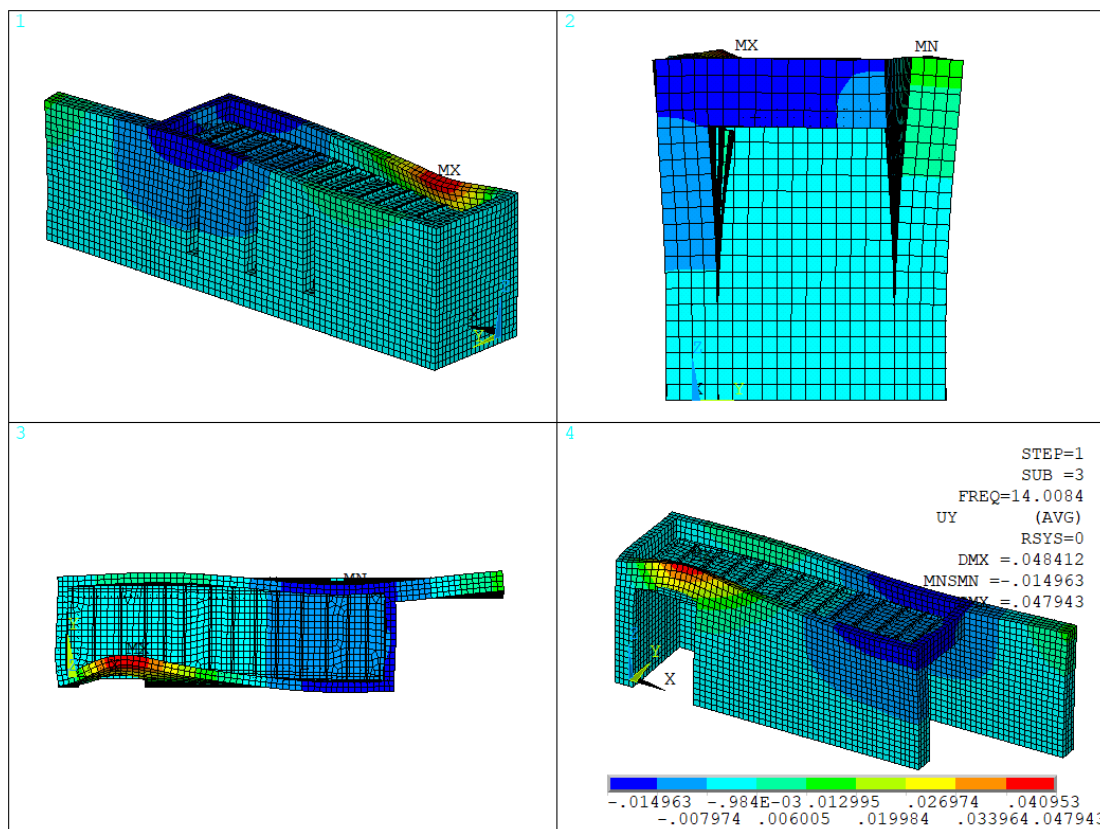


Figura 38. Modo 3 del modelo Inicial (14.00 Hz)

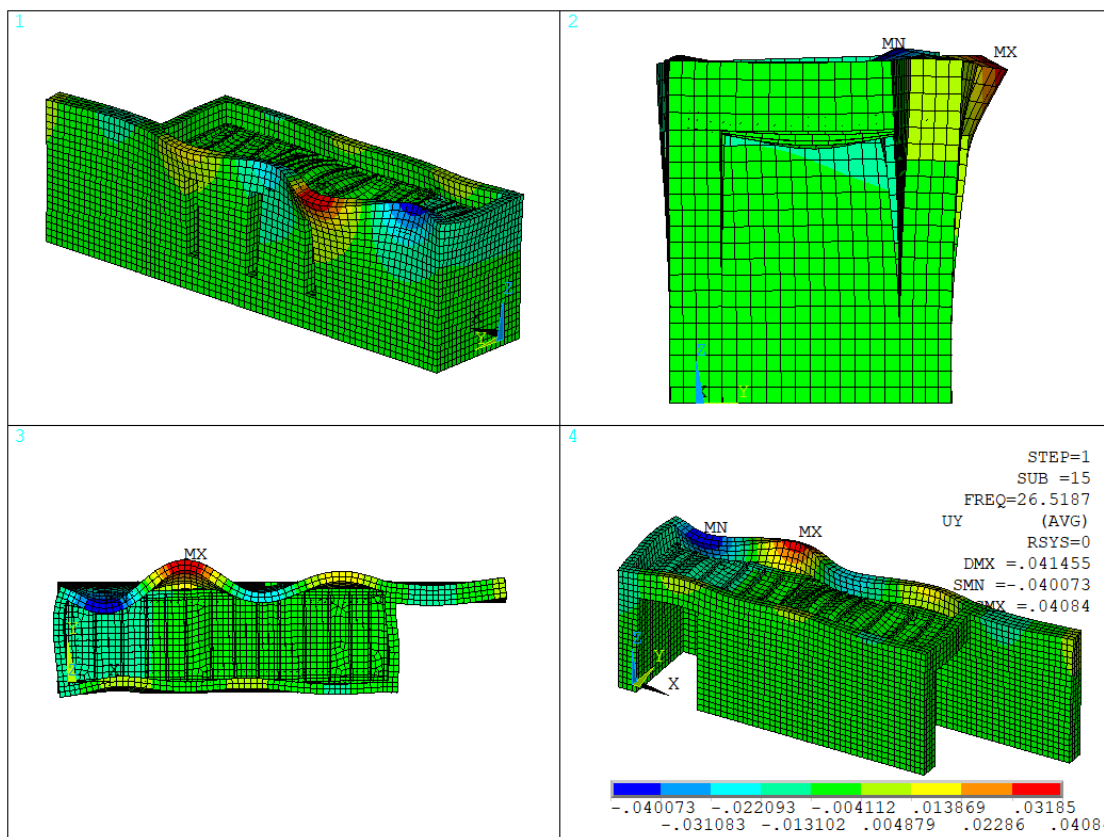


Figura 39. Modo 15 del modelo Inicial (26.52 Hz)

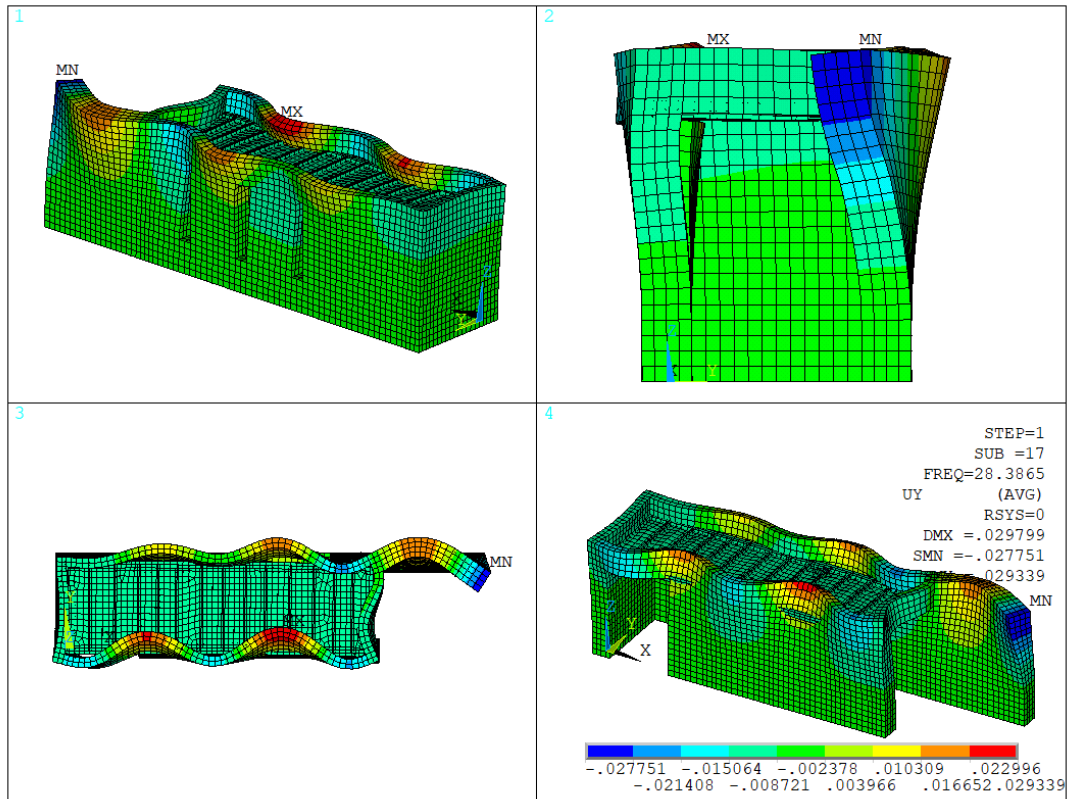


Figura 40. Modo 17 del modelo Inicial (28.39 Hz)

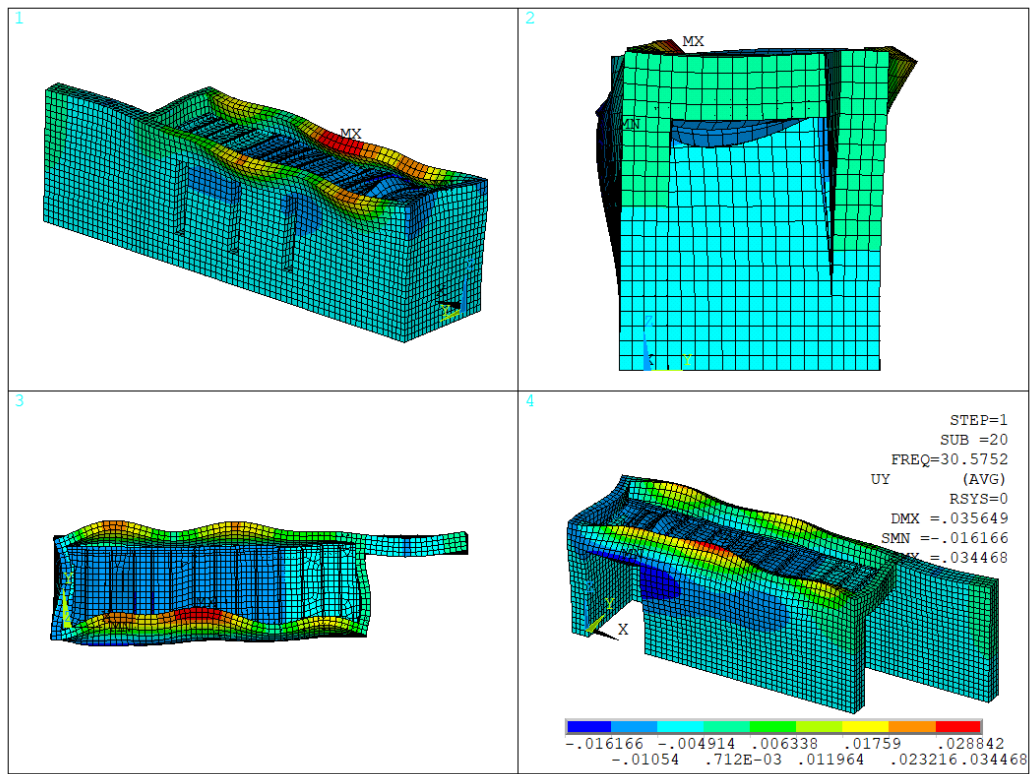


Figura 41. Modo 20 del modelo Inicial (30.57 Hz)



## 4.2 Análisis de influencia de las propiedades de los materiales

Todas las modificaciones expuestas en este apartado están relacionadas con las propiedades de los materiales asignadas en el modelo inicial, es decir, la geometría del modelo será respetada. Es por esto que, los resultados gráficos obtenidos no han sido incluidos debido a la similitud con los resultados del modelo inicial anteriormente mostrados.

En primer lugar, ante la incertidumbre de las características asignadas al material utilizado para los muros de tapia, la primera modificación que se planteó fue asignar un único módulo de elasticidad (E) del material de tapia manteniendo la geometría del modelo inicial, eliminando la graduación inicialmente planteada.

Debido a dicha incertidumbre, se han generado tres modelos distintos con módulos de elasticidad uniformes de 300, 700 y 1000 Mpa respectivamente.

Tabla 4: Resultados del modelo Inicial para distintos valores de E uniforme

Modo	E= 300 Mpa		E= 700Mpa		E= 1000 Mpa	
	Frec. (Hz)	$M_{EFF}^Y / M_{TOTAL}$	Frec. (Hz)	$M_{EFF}^Y / M_{TOTAL}$	Frec. (Hz)	$M_{EFF}^Y / M_{TOTAL}$
1	6.45	0.329	9.07	0.321	10.47	0.320
2	8.40	0.039	11.41	0.042	12.96	0.043
3	11.84	0.030	14.60	0.013	15.76	0.005
4	14.26	0.001	16.38	0.007	17.58	0.010
5	15.36	0.001	17.55	0.000	18.62	0.002
6	15.97	0.006	19.18	0.007	20.75	0.006
7	18.09	0.001	20.75	0.001	21.65	0.002
8	18.20	0.000	21.60	0.000	22.14	0.000
9	18.98	0.005	22.17	0.000	22.80	0.000
10	20.69	0.001	22.81	0.000	23.56	0.000
11	20.76	0.003	22.95	0.003	24.60	0.002
12	21.77	0.003	24.13	0.002	25.12	0.001
13	22.17	0.014	24.70	0.002	26.45	0.003
14	23.00	0.010	26.55	0.000	27.59	0.001
15	23.72	0.000	27.69	0.002	28.81	0.000
16	24.53	0.007	28.77	0.020	29.56	0.000
17	25.03	0.002	29.51	0.006	30.67	0.001
18	26.53	0.006	30.45	0.001	31.79	0.020
19	26.68	0.031	30.91	0.008	31.87	0.002
20	27.17	0.004	31.82	0.000	33.45	0.000
	TOTAL	0.492594	TOTAL	0.434698	TOTAL	0.417661

Los resultados obtenidos, en términos de frecuencia, varían numéricamente en comparación con el modelo inicial (Tabla 3). Para todos los casos, los coeficientes que miden la masa movilizada de cada modo no varían significativamente, siendo el primero de ellos (alrededor del 30%) el más influyente en comparación con los siguientes.

La estructura presenta un comportamiento similar entre el modelo con un valor constante del módulo de Elasticidad de la tapia de 700 Mpa y el modelo inicial con una graduación del módulo de Elasticidad en altura. Esta similitud se pierde para frecuencias mayores de 21 Hz.

Para el caso de un módulo de Elasticidad de 300 Mpa de la tapia constante, las frecuencias disminuyen debido a la pérdida de rigidez de la estructura. Se observan variaciones considerables en los tres primeros modos de vibración. Por otro lado, un aumento de la rigidez, como lo es en el caso de 1000 Mpa, provoca un aumento de las frecuencias naturales. Sin embargo, las variaciones en este caso son menores.

Por otra parte, contamos con un sobrecimiento cuyas características del material desconocemos y que han sido extraídas de documentos bibliográficos [5] [6]. Se realizó la sustitución de este material por el mismo utilizado para los muros de tapia en su zona más inferior (Tapia Inferior;  $E=1000\text{Mpa}$ ) (Tabla 2), dando lugar a un muro de tapia en toda su altura. Esto nos permitirá estudiar la influencia de la existencia de este sobrecimiento y las repercusiones que tendría haber prescindido de él.

Tabla 5: Resultados Modelo sin Sobrecimiento (1000 MPa)

Modo	MODELO ORIGINAL		MODELO SIN SOBRECIMIENTO	
	Frecuencia (Hz)	$M_{\text{EFF}}^Y / M_{\text{TOTAL}}$	Frecuencia (Hz)	$M_{\text{EFF}}^Y / M_{\text{TOTAL}}$
1	9.53	0.300	6.65	0.415
2	11.32	0.043	8.90	0.059
3	14.01	0.009	12.34	0.037
4	15.68	0.007	14.42	0.003
5	16.84	0.000	15.63	0.000
6	18.04	0.007	16.27	0.007
7	19.69	0.000	18.55	0.000
8	20.81	0.000	19.31	0.000
9	21.12	0.000	19.48	0.007
10	21.23	0.002	20.87	0.000
11	22.00	0.000	21.19	0.003
12	22.89	0.001	21.97	0.001
13	23.92	0.000	23.04	0.000
14	24.99	0.000	23.76	0.023
15	26.52	0.017	23.94	0.032
16	27.11	0.001	25.46	0.017
17	28.39	0.011	25.58	0.034
18	28.99	0.002	25.92	0.012
19	29.95	0.000	26.65	0.006
20	30.58	0.050	27.07	0.001
	TOTAL	0.451	TOTAL	0.659

Estos resultados (Tabla 5) muestran una disminución de aproximadamente 2.5 Hz de las frecuencias naturales en los dos primeros modos de vibración en comparación con las frecuencias del modelo inicial. A partir del modo 2, la diferencia hasta el modo 14 es de 1 Hz, acentuándose para los 6 restantes modos de vibración.

Por otro lado, la masa movilizada es sustancialmente mayor en el primer modo de vibración, pasando de 30% a 42%. Este dato sugiere que la existencia del sobrecimiento cumple su función de aportar rigidez a la estructura, dotándolo de una base sólida sobre la que apoyarse.

### 4.3 Análisis del modelo con modificaciones geométricas y de elementos

La primera modificación en cuanto a la geometría del modelo fue la longitud del tacón del muro en L. Esta dimensión, que está controlada bajo el parámetro  $v/l$  definido en el archivo GEOMETRIA (3.7 Organización del código), ha sido reducida a 5 centímetros, puesto que existirían fallos en el modelo si asignásemos un valor nulo debido a la parametrización realizada.

Tabla 6: Resultados del Modelo sin tacón

Modo	MODELO ORIGINAL		MODELO SIN TACON	
	Frecuencia (Hz)	$M_{EFF}^Y / M_{TOTAL}$	Frecuencia (Hz)	$M_{EFF}^Y / M_{TOTAL}$
1	9.53	0.300	9.90	0.320
2	11.32	0.043	13.70	0.018
3	14.01	0.009	15.59	0.007
4	15.68	0.007	16.69	0.000
5	16.84	0.000	17.76	0.003
6	18.04	0.007	18.20	0.006
7	19.69	0.000	20.24	0.001
8	20.81	0.000	20.94	0.000
9	21.12	0.000	21.29	0.002
10	21.23	0.002	21.98	0.000
11	22.00	0.000	22.71	0.002
12	22.89	0.001	23.91	0.000
13	23.92	0.000	25.26	0.000
14	24.99	0.000	26.55	0.024
15	26.52	0.017	27.10	0.001
16	27.11	0.001	28.85	0.003
17	28.39	0.011	29.78	0.000
18	28.99	0.002	30.00	0.039
19	29.95	0.000	30.80	0.022
20	30.58	0.050	31.25	0.002
	TOTAL	0.451	TOTAL	0.451

El modo 1 es un modo de flexión vertical de ambos muros verticales a una frecuencia de 9.9 Hz. La estructura presenta un comportamiento simétrico en el eje X, a pesar de no serlo geoméricamente debido a la ubicación de las puertas. Esto nos indica que, a priori, la estructura de la cubierta es la responsable de este comportamiento. Este modo de vibración, es similar al modo 1 perteneciente al modelo inicial (Figura 36), a unos valores de frecuencia aproximados. Por tanto, eliminar el tacón no afecta al primer modo de vibración ni a su frecuencia natural.

El modo 2 se produce ante una excitación de 13.7 Hz y puede ser identificado como un segundo modo de flexión de los dos muros. En este caso, se pierde el comportamiento simétrico, apareciendo una zona de debilidad en el dintel de la puerta perteneciente al muro en I debido a la falta de unión entre la viga collar y el pretil. Este comportamiento es similar al modo 3 de vibración del modelo inicial a 14.0 Hz (Figura 38) por tanto, el hecho de eliminar el tacón no afecta a este modo de la estructura. Este resultado nos permite afirmar que el modo 2 del modelo inicial (Figura 37) es un modo de vibración debido a la presencia del tacón.

El siguiente modo señalado como más influyente es el modo 14 a una frecuencia de 26.55 Hz (Figura 44). Este comportamiento es similar al modo 15 del modelo inicial (Figura 39), con una frecuencia de 26.52 Hz y es descrito en el apartado 4.1 Resultados del modelo inicial.

También se observa un comportamiento similar entre el modo 18 del modelo sin tacón a 30 Hz (Figura 45) y el modo 20 del modelo inicial a 30.57 Hz (Figura 41).

Se muestran los resultados gráficos de los modos de vibración señalados como más influyentes. Se representan los movimientos nodales en dicha dirección.

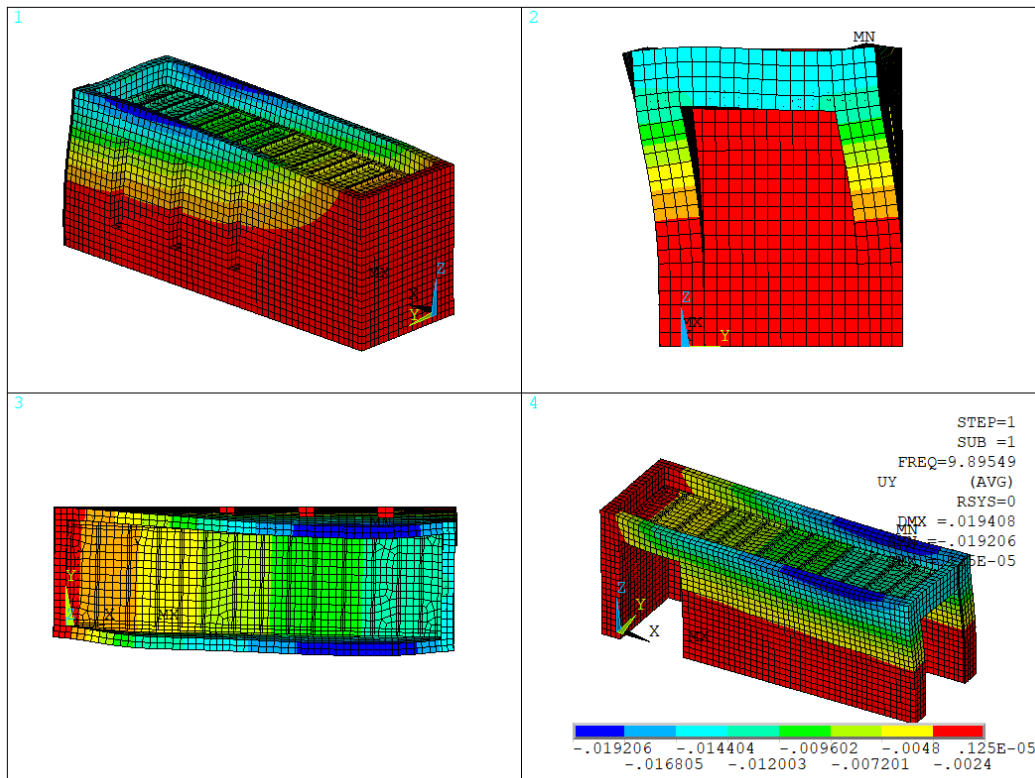


Figura 42. Modo 1 del modelo sin tacón (9.9 Hz)

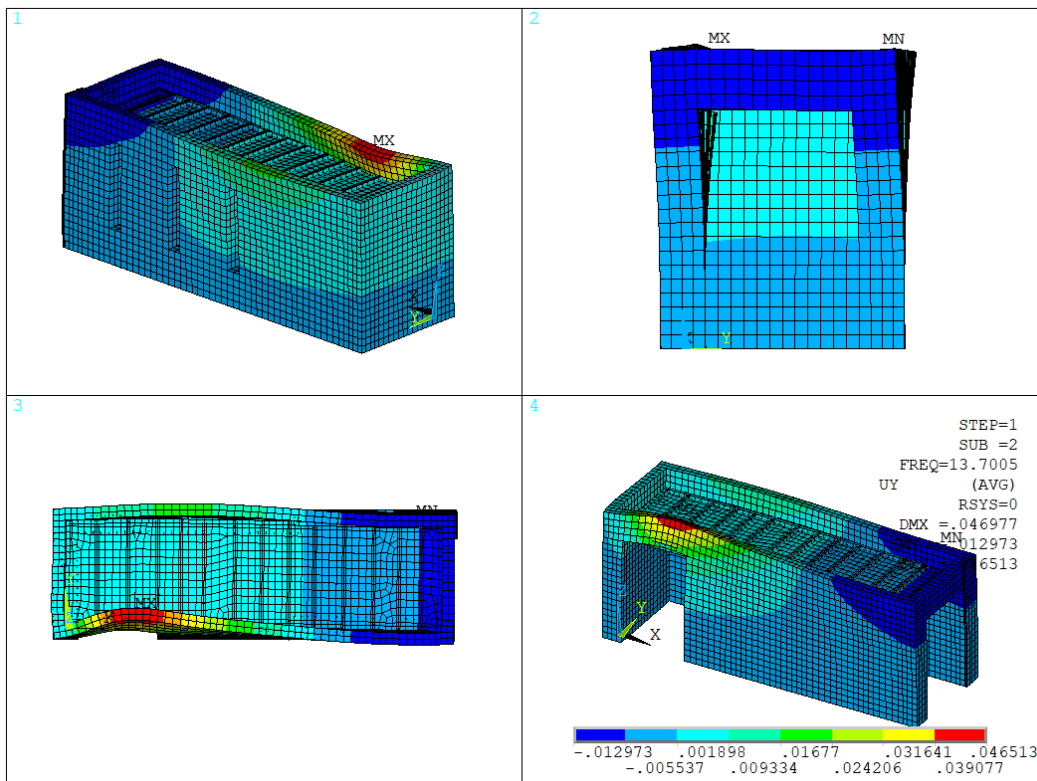


Figura 43. Modo 2 del modelo sin tacón (13.70 Hz)

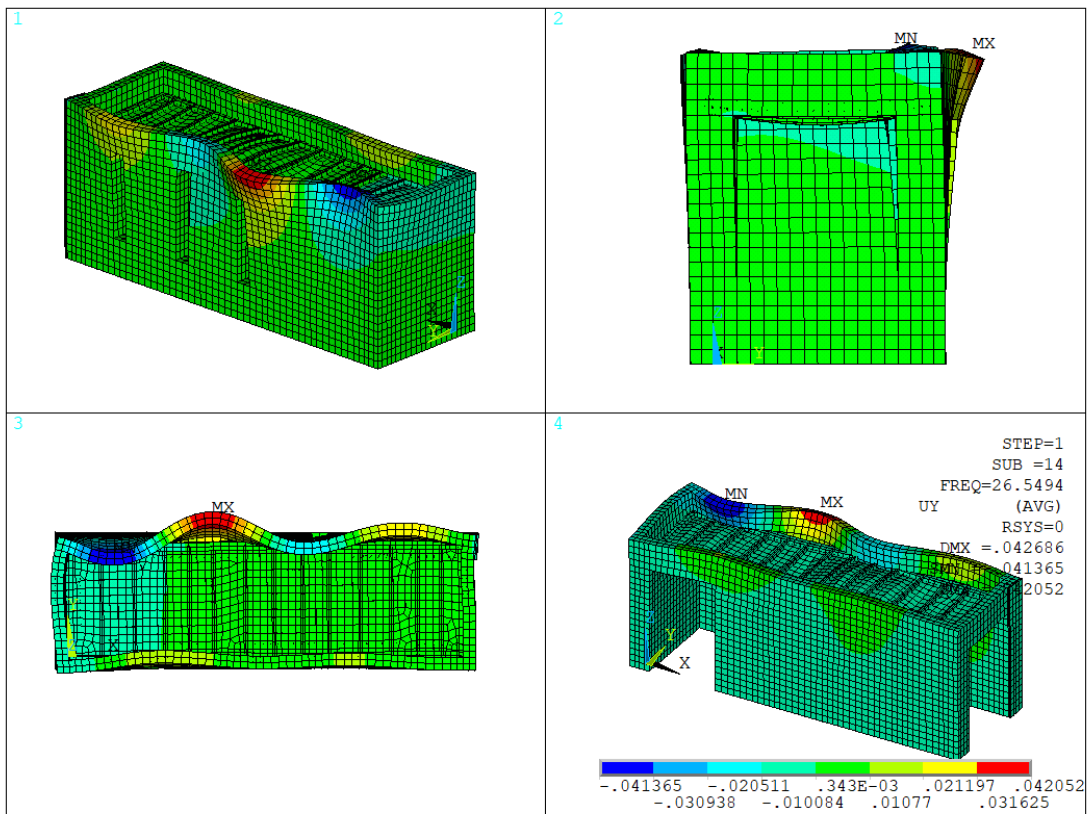


Figura 44. Modo 14 del modelo sin tacón (26.55 Hz)

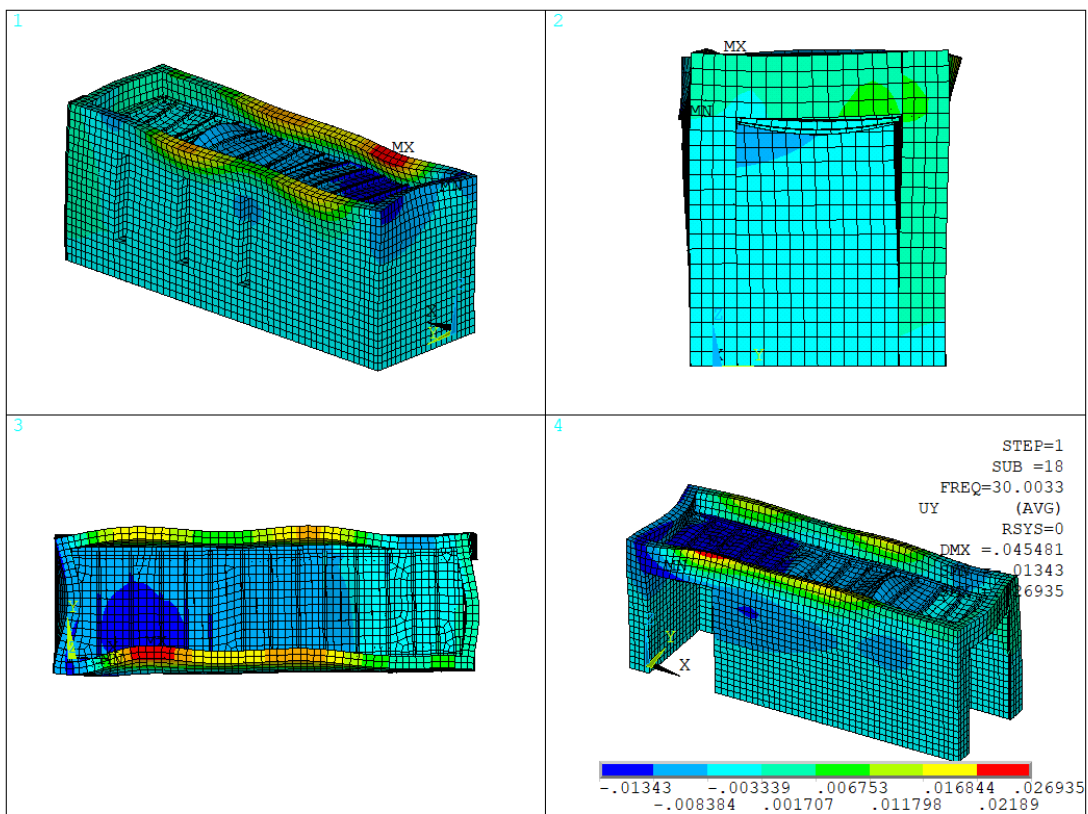


Figura 45. Modo 18 del modelo sin tacón (30.00 Hz)

Otra modificación geométrica que puede resultar de interés, es la altura de los pretiles. Esta dimensión está regulada por el parámetro  $hp$  definido en el archivo número 7: PRETILES. Para conocer con más detalles cómo afecta esta dimensión, se han extraído resultados para distintas modificaciones de este parámetro: valor nulo (sin pretil), 20 centímetros y 100 centímetros, siendo 60 centímetros la dimensión escogida para el modelo inicial.

Tabla 7: Comparación de resultados para altura variable del pretil

Modo	Sin Pretil		Pretil = 20 cm		Pretil = 60 cm (Modelo Inicial)		Pretil = 100 cm	
	Frecuencia (Hz)	$M_{EFF}^Y / M_{TOTAL}$	Frecuencia (Hz)	$M_{EFF}^Y / M_{TOTAL}$	Frecuencia (Hz)	$M_{EFF}^Y / M_{TOTAL}$	Frecuencia (Hz)	$M_{EFF}^Y / M_{TOTAL}$
1	14.57	0.314	12.63	0.316	9.54	0.300	7.28	0.321
2	17.92	0.000	15.29	0.011	11.32	0.043	8.31	0.001
3	19.85	0.000	19.43	0.036	14.01	0.009	9.44	0.000
4	21.12	0.001	19.86	0.002	15.68	0.007	10.34	0.001
5	21.91	0.040	21.34	0.000	16.84	0.000	11.38	0.000
6	23.02	0.000	23.06	0.001	18.04	0.007	13.09	0.027
7	25.18	0.002	23.84	0.000	19.69	0.000	14.44	0.002
8	25.99	0.000	24.02	0.004	20.81	0.000	16.00	0.000
9	26.29	0.000	24.96	0.000	21.12	0.000	17.45	0.000
10	26.46	0.000	25.31	0.000	21.23	0.002	19.11	0.001
11	27.63	0.002	26.18	0.000	22.00	0.000	19.96	0.061
12	27.78	0.000	26.36	0.000	22.89	0.001	20.27	0.000
13	28.97	0.000	26.79	0.001	23.92	0.000	20.81	0.048
14	29.81	0.000	26.94	0.001	24.99	0.000	21.27	0.006
15	31.18	0.000	27.07	0.000	26.52	0.017	21.69	0.003
16	31.71	0.000	27.74	0.000	27.11	0.001	23.59	0.000
17	32.99	0.000	29.04	0.000	28.39	0.011	24.44	0.003
18	33.87	0.000	30.03	0.000	28.99	0.002	24.94	0.001
19	34.33	0.003	30.92	0.000	29.95	0.000	25.67	0.000
20	34.55	0.000	31.75	0.000	30.58	0.050	26.00	0.005
	TOTAL	0.364	TOTAL	0.374	TOTAL	0.451	TOTAL	0.479

Estos resultados muestran que, a mayor altura del pretil, mayor esbeltez de los muros que componen la estructura y menores frecuencias naturales obtenemos. Basándonos en las variaciones numéricas de las frecuencias, podemos afirmar que se trata de un elemento muy influyente en el comportamiento dinámico de la estructura.

El modo 1 de este modelo sin pretiles es un primer modo de flexión vertical de ambos muros a una frecuencia de 14.57 Hz (Figura 46). Es un comportamiento similar al modo 1 del modelo inicial (Figura 36) pero a una frecuencia mayor.

En el modo 2 se observa un desplazamiento máximo en el tacón a una frecuencia de 17.92 Hz y puede ser identificado como un segundo modo de flexión. Este modo es similar al modo 2 del modelo inicial (Figura 37). Tal y como hemos visto con anterioridad, la aparición de un modo similar al modo 2 del modelo inicial y la ausencia de este modo en el modelo sin tacón, confirma que este modo de vibración se produce cuando está presente el tacón.

El modo 5 (Figura 48) de este modelo es un modo de flexión vertical de los muros. Las propiedades atribuidas a las uniones pueden no ser lo suficientemente rígidas como para mantener unidos el muro y la viga collar, existiendo desplazamientos desacoplados entre ellos. Además, al eliminar los pretiles estamos prescindiendo del volumen de pretil que vincula las partes del muro donde la continuidad del muro se ve interrumpida, es decir, en las ventanas y las puertas (Figura 48. Vista inferior izquierda).

El último modo mostrado (Figura 49) del modelo sin pretiles puede tener diferentes interpretaciones. En este caso se observa un desplazamiento destacado en las zonas de las ventanas. Este desplazamiento puede ser consecuencia de los modos propios de vibración de la estructura de la cubierta. Las vigas transversales que lo componen, flectan, provocando una torsión de la viga collar que las une. Esta, a su vez, transmite a través de las



uniones los giros al muro.

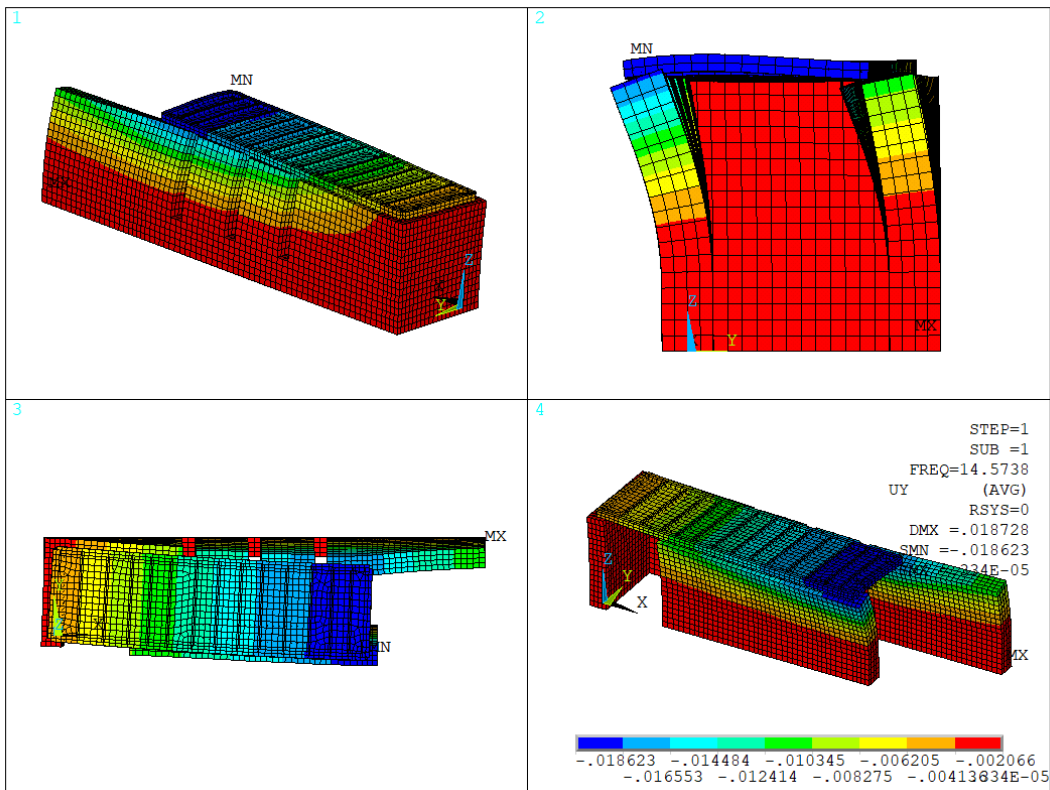


Figura 46. Modo 1 del modelo sin pretilas (14.57 Hz)

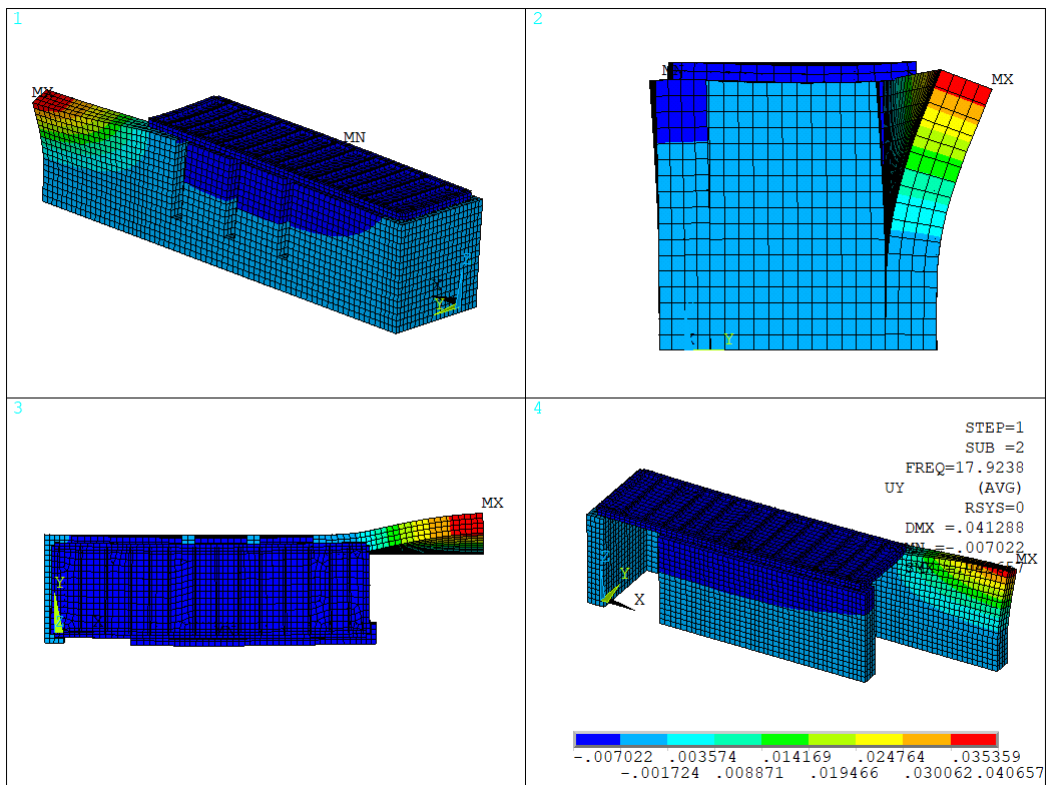


Figura 47. Modo 2 del modelo sin pretilas (17.92 Hz)

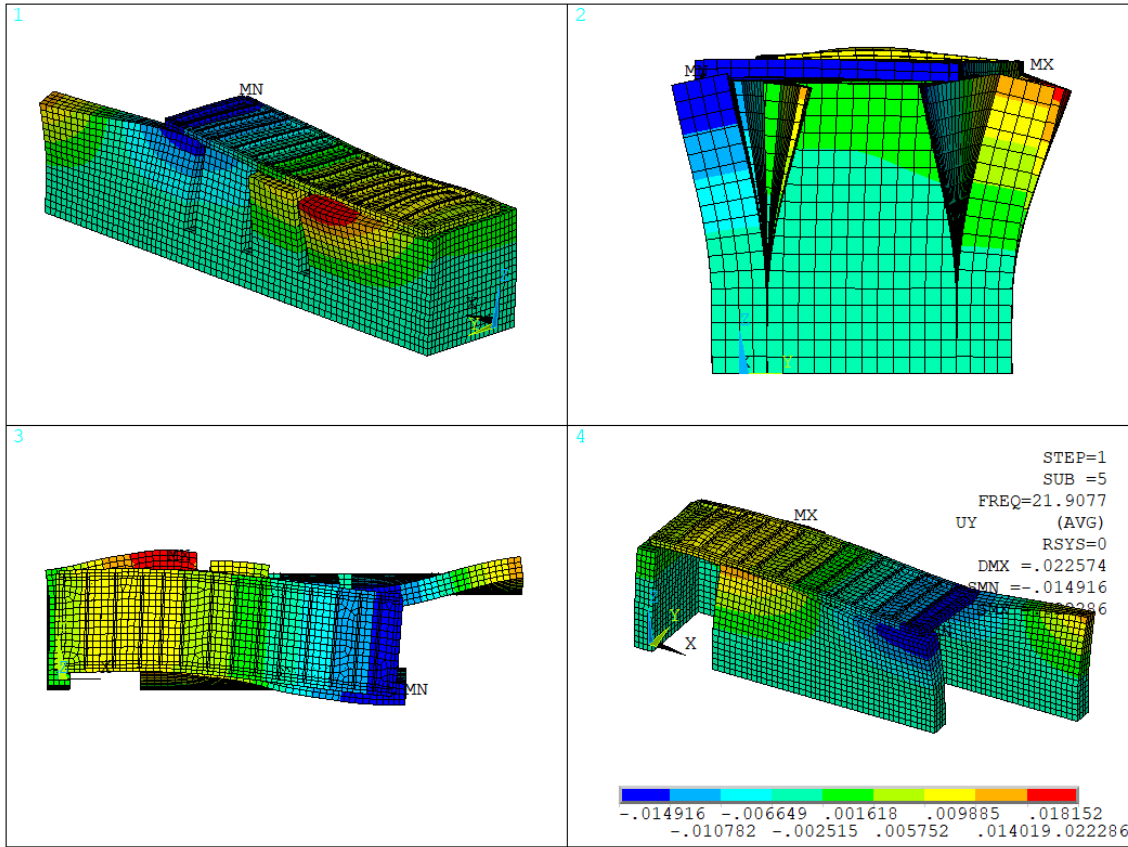


Figura 48. Modo 5 del modelo sin pretiles (21.90 Hz)

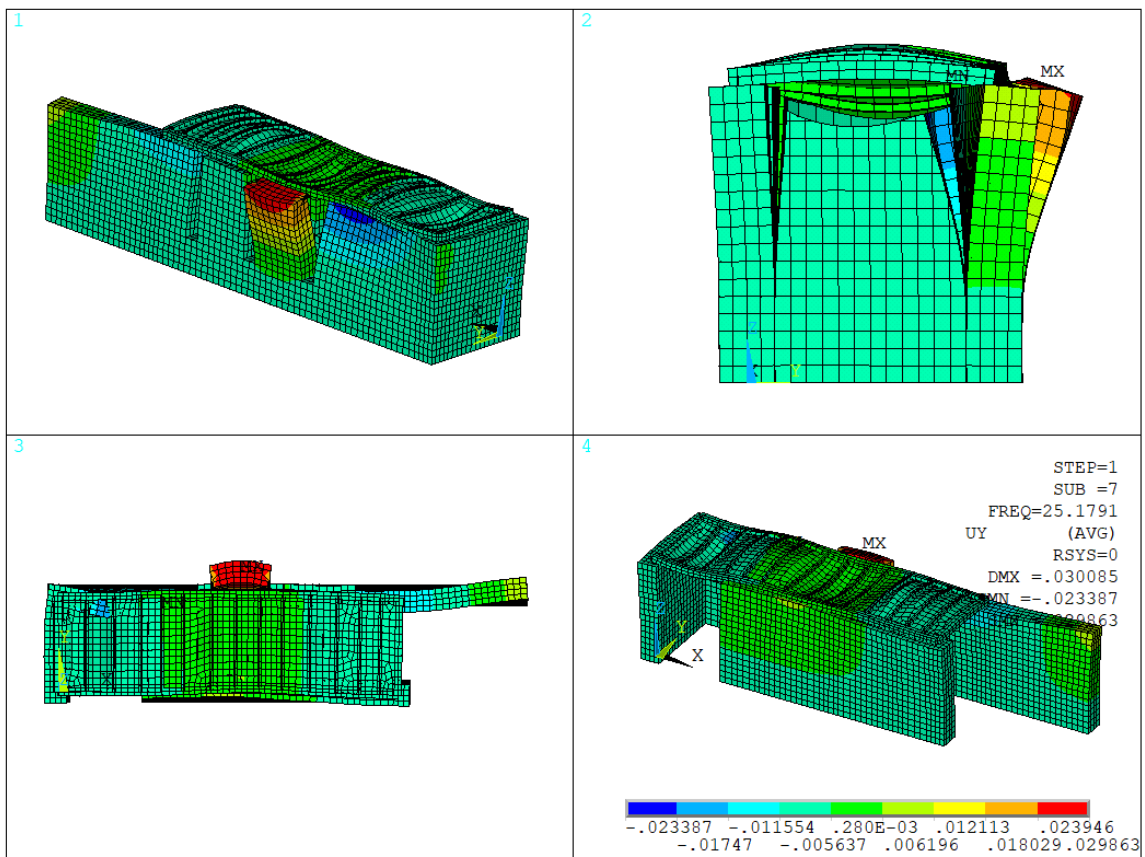


Figura 49. Modo 7 del modelo sin pretiles (25.18 Hz)

La última modificación que se ha realizado ha sido eliminar la estructura de madera que compone la cubierta, es decir, la viga collar, las vigas transversales y las tablas de madera que forman la superficie, sin alterar ninguna otra dimensión del modelo inicial. Estos cambios pueden alterar sustancialmente los resultados y son los que se muestran a continuación.

Tabla 8: Resultados del modelo sin estructura de madera

Modo	MODELO ORIGINAL		MODELO SIN ESTRUCTURA DE MADERA	
	Frecuencia (Hz)	$M_{EFF}^Y / M_{TOTAL}$	Frecuencia (Hz)	$M_{EFF}^Y / M_{TOTAL}$
1	9.53	0.300	9.51	0.258
2	11.32	0.043	9.82	0.000
3	14.01	0.009	10.75	0.057
4	15.68	0.007	11.96	0.001
5	16.84	0.000	12.85	0.005
6	18.04	0.007	14.50	0.011
7	19.69	0.000	16.10	0.001
8	20.81	0.000	17.97	0.005
9	21.12	0.000	19.53	0.001
10	21.23	0.002	20.78	0.000
11	22.00	0.000	22.32	0.001
12	22.89	0.001	24.45	0.011
13	23.92	0.000	26.77	0.001
14	24.99	0.000	27.92	0.007
15	26.52	0.017	29.17	0.008
16	27.11	0.001	30.59	0.011
17	28.39	0.011	31.60	0.030
18	28.99	0.002	31.89	0.001
19	29.95	0.000	32.02	0.029
20	30.58	0.050	32.44	0.000
	TOTAL	0.451	TOTAL	0.438

El modo 1 (Figura 50) con una frecuencia de 9.51 Hz es similar al modo 1 del modelo inicial (Figura 36) cuya frecuencia es 9.53 Hz. El comportamiento el muro en L es equivalente al del modelo inicial, sin embargo, al eliminar la estructura de madera, el muro en L y el muro en I quedan desvinculados, apareciendo movimientos en este último que no se daban en el modelo inicial.

Esta desvinculación entre muros se refleja en los modos 2 (Figura 51) y 3 (Figura 52), siendo ambos de flexión vertical provocando los desplazamientos máximos en las zonas débiles (ventanas y hornacinas) y en el extremo del tacón.

Del modo 6 (Figura 53) sólo podemos afirmar que se manifiesta de una forma similar al modo 17 del modelo inicial (Figura 40), sin ser equivalentes en forma.

El modo 12 con una frecuencia de 24.45 Hz también es un modo de flexión vertical del muro en L y se desarrolla sólo en la parte de las ventanas de este muro (Figura 54). Puede parecer equivalente al modo 15 del modelo inicial cuya frecuencia era de 26.52 Hz (Figura 39) pero el hecho de no contar con la estructura de la cubierta nos induce a pensar que se trata de modos de vibración distintos.

Los modos 16 (Figura 55) y 19 (Figura 56) de este modelo son similares entre sí y podrían ser identificados como modos de torsión de los pretiles o como modo de flexión vertical de los muros, que reflejan los movimientos máximos en los pretiles.

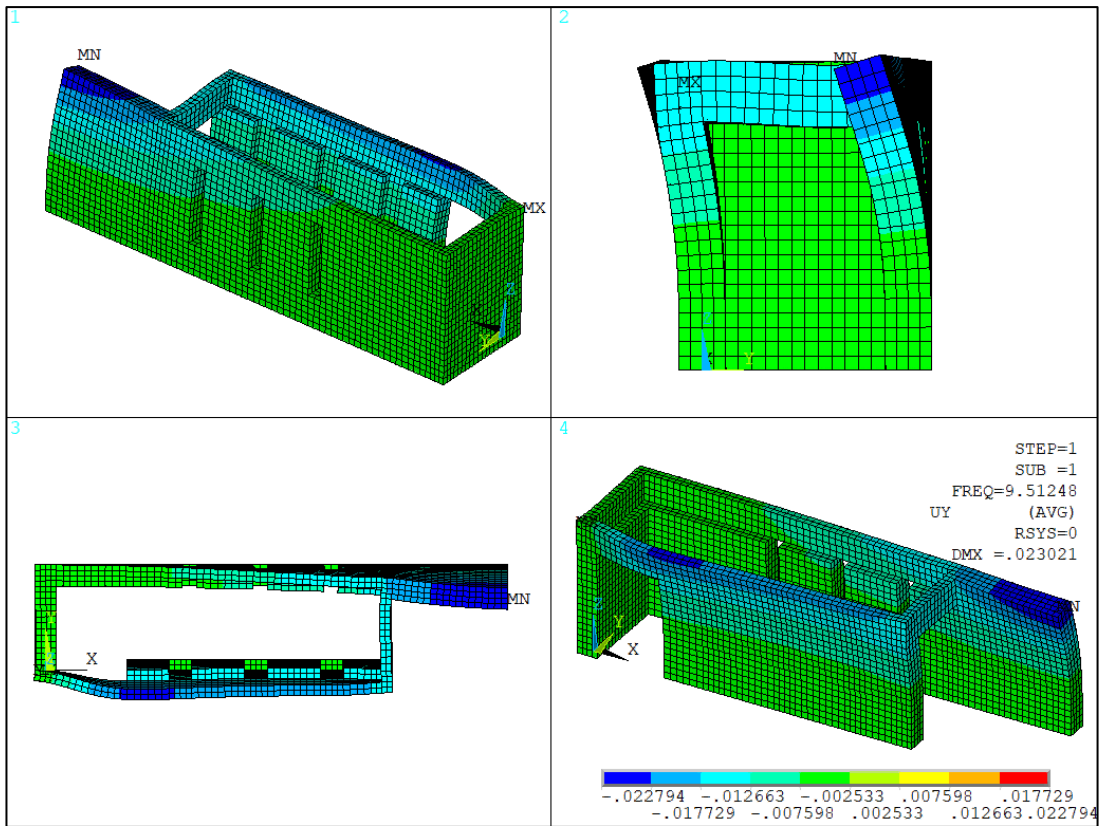


Figura 50. Modo 1 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (9.51 Hz)

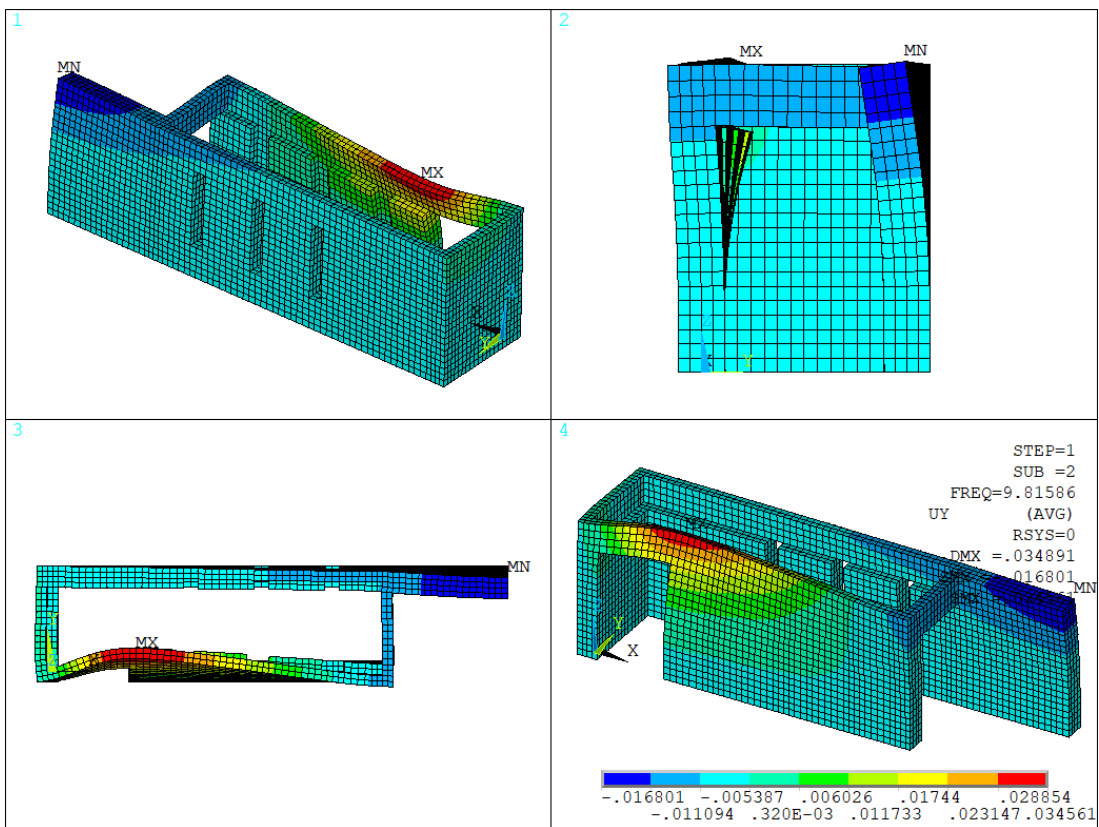


Figura 51. Modo 2 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (9.82 Hz)

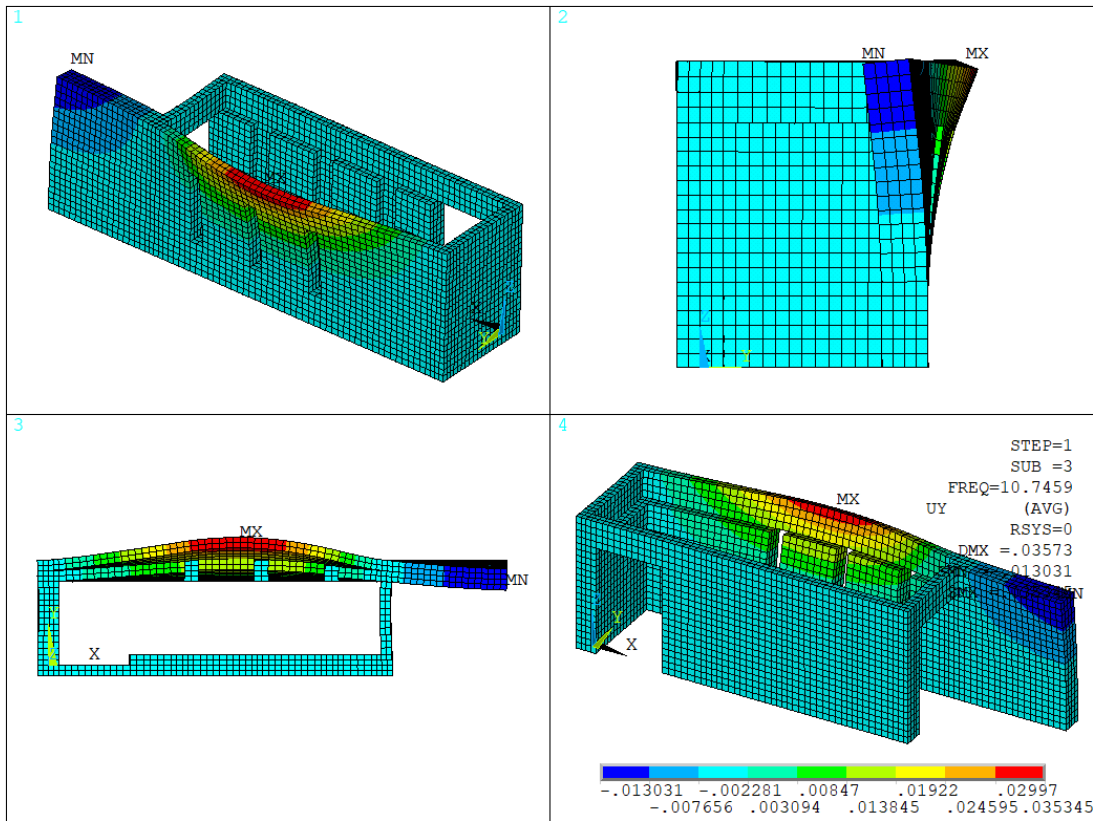


Figura 52. Modo 3 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (10.75 Hz)

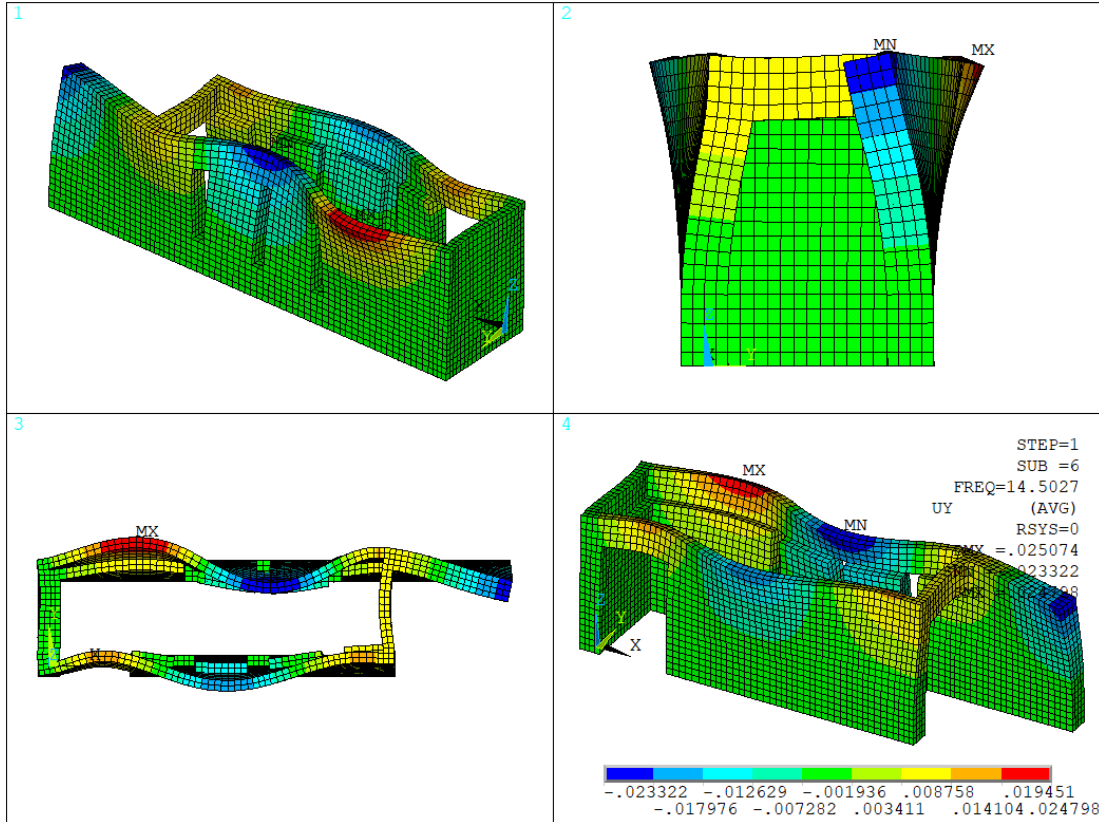


Figura 53. Modo 6 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (14.50 Hz)



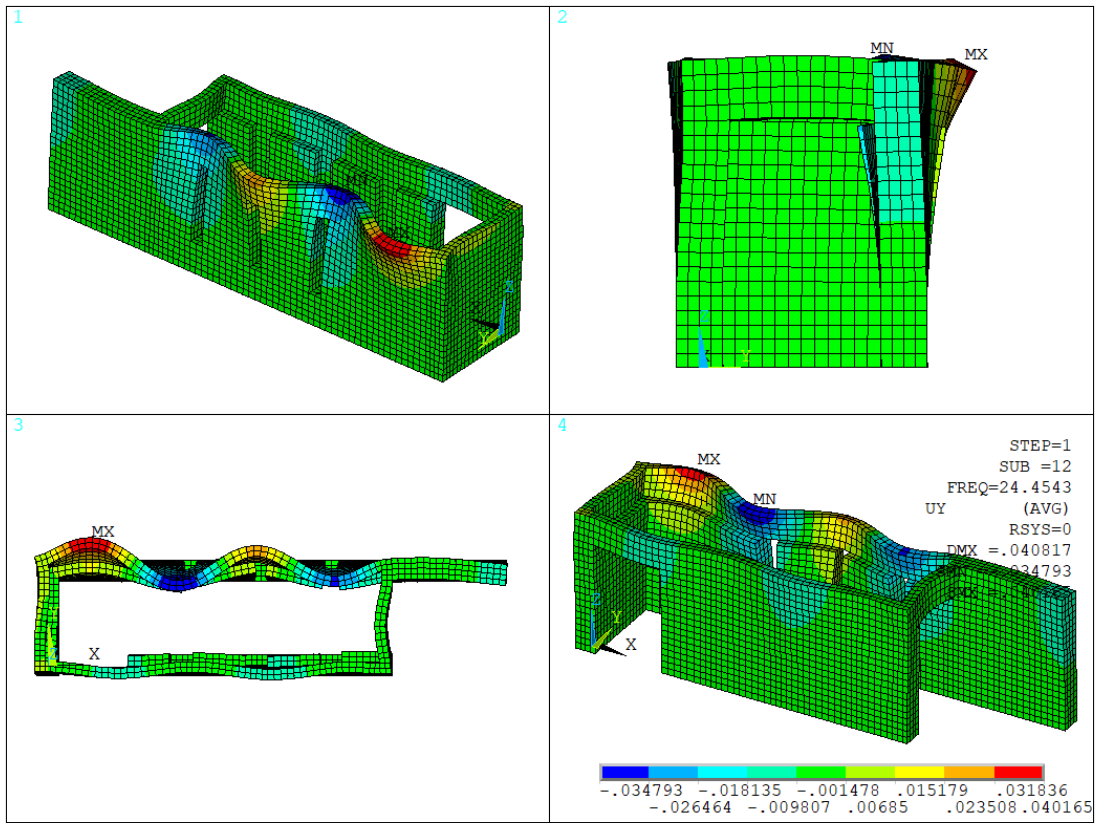


Figura 54. Modo 12 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (24.45 Hz)

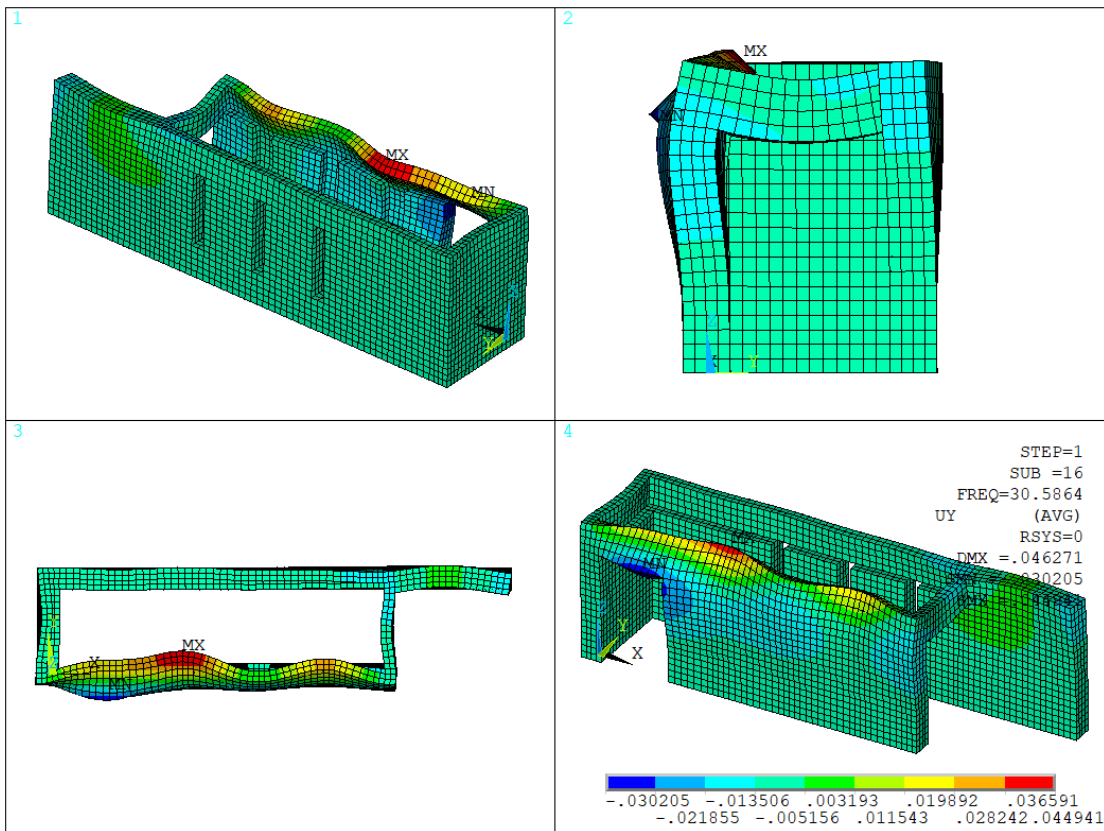


Figura 55. Modo 16 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (30.59 Hz)



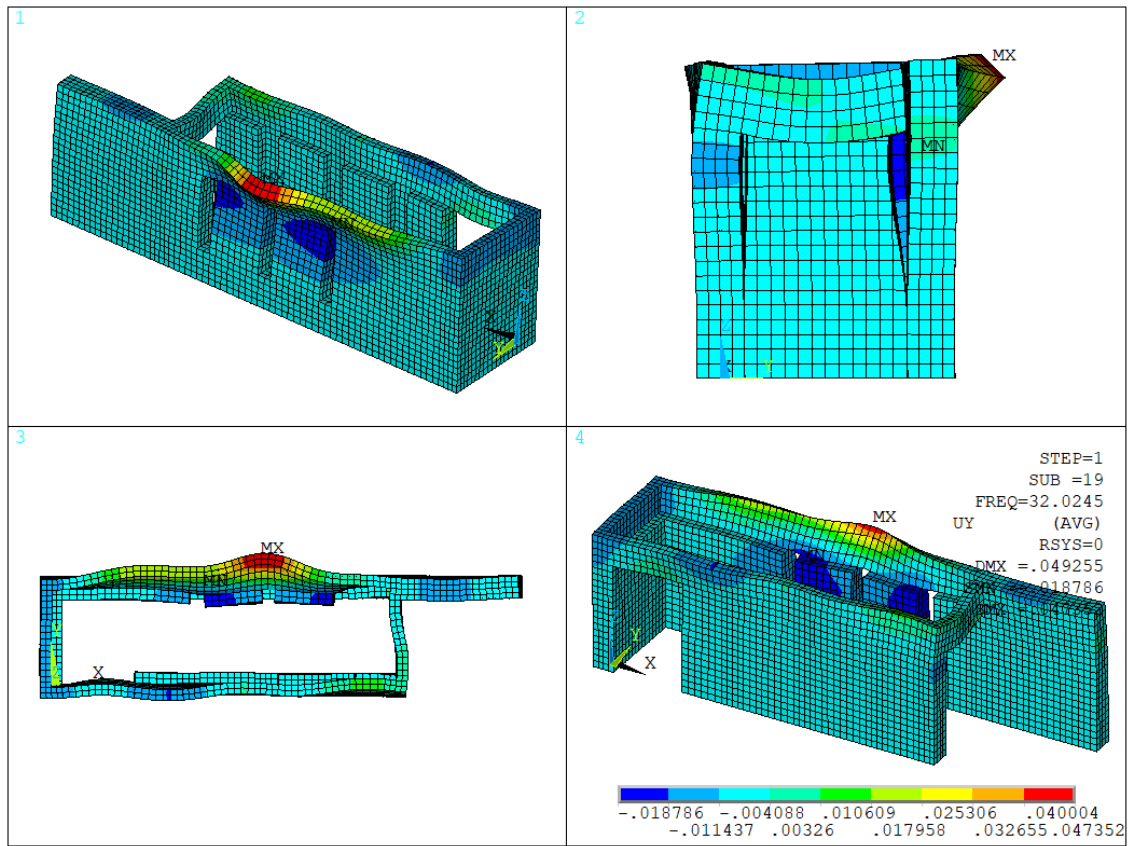


Figura 56. Modo 19 del modelo sin estructura de madera para la cubierta (32.02 Hz)

## 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

Para concluir con este trabajo se exponen las conclusiones más relevantes a las que podemos llegar y los objetivos alcanzados durante la elaboración de este estudio.

El modelo de elementos finitos que se perseguía sirve para entender el comportamiento de la estructura en términos dinámicos, siendo un modelo simple, pero a su vez complejo. La elección de los materiales que intervienen, así como de las uniones planteadas y de las cuales no se obtuvo información precisa, debe hacerse entendiendo cómo van a afectar a los resultados logrados. No obstante, el modelo presenta la ventaja de poder modificar estas características a través de diferentes parámetros con relativa facilidad.

El elemento que más afecta a los resultados numéricos es la altura del pretil, modificando la esbeltez de los muros. Estos resultados también se ven alterados en menor medida por las propiedades de los materiales de la tapia y la existencia de un sobrecimiento que aporta estabilidad al conjunto. Es fundamental, por tanto, realizar un estudio experimental acerca de las propiedades de la tapia y del sobrecimiento ejecutado. Por otra parte, la presencia de la estructura de madera de la cubierta, que añade masa no estructural al conjunto debido a un sistema de cubierta vegetal, cumple con la función de vincular los muros dotándolos de mayor rigidez dinámica.

En términos dinámicos, pudieron haberse cometido dos errores conceptuales en la etapa de diseño de esta estructura: la prolongación del muro en L, definido en este documento como tacón y la concepción de unos pretils que rebasan la altura de la cubierta. Algunos de los modos expuestos en este trabajo presentan sus movimientos máximos en el extremo del tacón (Figura 37) y en la zona superior de los pretils (Figura 39). Estos elementos pueden suponer un riesgo al usuario ante fenómenos sísmicos. No obstante, la estructura está ubicada en un lugar donde no es habitual que se produzcan este tipo de hechos naturales.

Tal y como los resultados señalan, el comportamiento de la estructura es rígido en términos generales, presentando multitud de modos de vibración a frecuencias naturales notablemente elevadas. Además, la ausencia de modos dominantes tal y como se observa en los resultados del modelo original y sus pertinentes modificaciones, así como un comportamiento dinámico complejo de los mismos, hace que la correlación entre resultados numéricos y experimentales recogidos en futuras campañas de ensayos no destructivos sea especialmente difícil. Estos registros de respuesta dinámica obtenidos de test experimentales permitirían la corrección del modelo a través de una actualización conocida como *Model Updating*. Por otro lado, esta ausencia de modos dominantes dificulta la opción de poder realizar un análisis modal espectral de la estructura que nos permita conocer con mayor profundidad el comportamiento ante un seísmo. Podrían realizarse otros tipos de análisis como *Pushover* o en el dominio del tiempo, cuyos resultados quedarían sujetos a la incertidumbre de la modelización del comportamiento del material.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Pastor Quiles, *La construcción con Tierra en Arqueología*, Universidad de Alicante, 2017.
- [2] O. VF, «Oskam VF,» [En línea]. Available: <https://www.oskam-vf.com/>.
- [3] BION. [En línea]. Available: <https://www.bi0n.eu/about-bion/>.
- [4] A. Jiménez, A. Buzo, L. Couvreur, J. Moya y J. Morán, «Proyecto Learn BION: Building Impact Zero Network,» *Ecohabitar*, 2019.
- [5] V. Brotons Torres, *Propiedades Físicas y Mecánicas de una calcarenita: la Piedra de San Julián*, Universidad de Alicante, 2014.
- [6] Symposium, 11th Canadian Masonry, Evaluation of Young's Modulus for Stone Masonry Walls under Compresion, Ontario, Toronto: University of Calgary, 2009.
- [7] I. Rodríguez Jiménez, *Caracterización del Comportamiento a Compresión Simple sobre Probetas de Tapia*, Universidad de Sevilla, 2018.
- [8] Documento Básico SE-M, Ministerio de Fomento, 2019.
- [9] A. Romero Ordóñez, P. Galvín Barrera y M. Solís Muñoz, *Apuntes para el Análisis de Estructuras*, Universidad de Sevilla, 2020.

# ANEXO

## 1-GEOMETRIA.txt

/PREP7	LSTR,6010,9010	K,7011,-et/2,a+et/2,hs
!GEOMETRIA	AL,10,6,8,9 !A3	K,8011,0.000,a+et/2,hs
ht=1.7 ! Altura de los muros de tapia (1.7m)	LSTR,4010,5010	K,9011,et/2,a+et/2,hs
hs=0.70 ! Altura del sobrecimiento (0.70m)	LSTR,5010,6010	LSTR,1011,4011
et=0.45 ! Espesor del muro (0.45m)	AL,3,11,12,10 !A4	LSTR,4011,5011
a=2.005 ! Ancho de la construcción (2.005m)	K,11010,-et/2,a/2,hs	LSTR,5011,2011
vl=2.44 ! Longitud tacón (2.44m)	K,12010,0.000,a/2,hs	AL,19,23,24,25 !A9
ap=1.51 ! Ancho puerta lateral (1.51m) (! NO 2.39!)	K,13010,et/2,a/2,hs	LSTR,3011,6011
! SOBRECIMIENTO-TAPIAL:	LSTR,3010,11010	LSTR,6011,5011
! PUNTO 10:	LSTR,11010,12010	AL,21,26,27,25 !A10
k,1010,-et/2,-et/2,hs	LSTR,12010,4010	LSTR,5011,8011
k,2010,-et/2,0,hs	AL,4,13,14,15 !A5	LSTR,8011,7011
k,3010,-et/2,et/2,hs	LSTR,5010,13010	LSTR,7011,4011
k,4010,0.000,et/2,hs	LSTR,13010,12010	AL,24,28,29,30 !A11
k,5010,et/2,et/2,hs	AL,17,15,11,16 !A6	LSTR,8011,9011
k,6010,et/2,0.000,hs	!PUNTO 11:	LSTR,9011,6011
k,7010,et/2,-et/2,hs	K,1011,-et/2,a-et/2,hs	AL,27,28,31,32 !A12
k,8010,0.000,-et/2,hs	K,2011,0.000,a-et/2,hs	K,10011,1.560,a-et/2,hs
k,9010,0.000,0.000,hs	K,3011,et/2,a-et/2,hs	K,11011,1.560,a,hs
LSTR,3010,2010	LSTR,12010,2011	K,12011,1.560,a+et/2,hs
LSTR,2010,9010	LSTR,2011,1011	LSTR,6011,11011
LSTR,9010,4010	LSTR,1011,11010	LSTR,11011,10011
LSTR,4010,3010	AL,14,18,19,20 !A7	LSTR,10011,3011
AL,1,2,3,4 !A1	LSTR,2011,3011	AL,26,33,34,35 !A13
LSTR,1010,2010	LSTR,3011,13010	LSTR,11011,12011
LSTR,9010,8010	AL,17,18,21,22 !A8	LSTR,12011,9011
LSTR,8010,1010	K,4011,-et/2,a,hs	AL,32,33,36,37 !A14
AL,2,6,7,5 !A2	K,5011,0.000,a,hs	!PUNTO 12:
LSTR,8010,7010	K,6011,et/2,a,hs	K,1012,2.895,a-et/2,hs
LSTR,7010,6010		

K,2012,2.895,a,hs		K,4015,7.110,a-et/2,hs
K,3012,2.895,a+et/2,hs	LSTR,2013,5013	K,5015,7.110,a,hs
LSTR,10011,1012	LSTR,5013,4013	K,6015,7.110,a+et/2,hs
LSTR,1012,2012	LSTR,4013,1013	K,7015,7.110+et/2,a-et/2,hs
LSTR,2012,11011	AL,49,53,54,55 !A21	K,8015,7.110+et/2,a,hs
AL,34,38,39,40 !A15	LSTR,5013,6013	K,9015,7.110+et/2,a+et/2,hs
LSTR,12011,3012	LSTR,6013,3013	LSTR,4014,1015
LSTR,3012,2012	AL,52,53,56,57 !A22	LSTR,1015,2015
AL,36,41,42,40 !A16	!PUNTO 14:	LSTR,2015,5014
K,4012,3.195,a-et/2,hs	K,1014,5.895,a-et/2,hs	AL,64,68,69,70 !A27
K,5012,3.195,a,hs	K,2014,5.895,a,hs	LSTR,6014,3015
K,6012,3.195,a+et/2,hs	K,3014,5.895,a+et/2,hs	LSTR,3015,2015
LSTR,2012,5012	LSTR,4013,1014	AL,66,71,72,70 !A28
LSTR,5012,4012	LSTR,1014,2014	LSTR,2015,5015
LSTR,4012,1012	LSTR,2014,5013	LSTR,5015,4015
AL,39,43,44,45 !A17	AL,54,58,59,60 !A23	LSTR,4015,1015
LSTR,5012,6012	LSTR,6013,3014	LSTR,1015,2015
LSTR,6012,3012	LSTR,3014,2014	AL,73,74,75,69 !A29
AL,42,43,46,47 !A18	LSTR,2014,5013	LSTR,5015,6015
!PUNTO 13:	AL,56,61,62,60 !A24	LSTR,6015,3015
K,1013,4.395,a-et/2,hs	K,4014,6.195,a-et/2,hs	LSTR,3015,2015
K,2013,4.395,a,hs	K,5014,6.195,a,hs	AL,72,73,76,77 !A30
K,3013,4.395,a+et/2,hs	K,6014,6.195,a+et/2,hs	LSTR,4015,7015
LSTR,4012,1013	LSTR,2014,5014	LSTR,7015,8015
LSTR,1013,2013	LSTR,5014,4014	LSTR,8015,5015
LSTR,2013,5012	LSTR,4014,1014	AL,74,78,79,80 !A31
AL,44,48,49,50 !A19	AL,59,63,64,65 !A25	LSTR,6015,9015
LSTR,6012,3013	LSTR,5014,6014	LSTR,9015,8015
LSTR,3013,2013	LSTR,6014,3014	AL,76,81,82,80 !A32
AL,46,51,52,50 !A20	AL,62,63,66,67 !A26	K,10015,7.110+et/2+vl/2,a-et/2,hs
K,4013,4.695,a-et/2,hs	!PUNTO 15:	K,11015,7.110+et/2+vl/2,a,hs
K,5013,4.695,a,hs	K,1015,7.110-et/2,a-et/2,hs	K,12015,7.110+et/2+vl/2,a+et/2,hs
K,6013,4.695,a+et/2,hs	K,2015,7.110-et/2,a,hs	K,13015,7.110+et/2+vl,a-et/2,hs
	K,3015,7.110-et/2,a+et/2,hs	K,14015,7.110+et/2+vl,a,hs
		K,15015,7.110+et/2+vl,a+et/2,hs

LSTR,8015,11015	LSTR,7016,4016	K,5018,4.215,0.000,hs
LSTR,11015,10015	AL,100,101,102,99 !A39	K,6018,4.215,+et/2,hs
LSTR,10015,7015		
AL,79,83,84,85 !A33	LSTR,8016,9016	LSTR,6017,3018
	LSTR,9016,6016	LSTR,3018,2018
LSTR,11015,12015	AL,95,100,103,104 !A40	LSTR,2018,5017
LSTR,12015,9015		LSTR,4017,1018
AL,82,83,86,87 !A34	!PUNTO 17:	LSTR,1018,2018
		AL,111,115,116,117 !A45
LSTR,10015,13015	K,1017,6.295,-et/2,hs	AL,117,113,118,119 !A46
LSTR,13015,14015	K,2017,6.295,0.000,hs	
LSTR,14015,11015	K,3017,6.295,+et/2,hs	LSTR,2018,5018
AL,84,88,89,90 !A35		LSTR,5018,6018
	LSTR,9016,3017	LSTR,6018,3018
LSTR,12015,15015	LSTR,3017,2017	LSTR,5018,4018
LSTR,15015,14015	LSTR,2017,8016	LSTR,4018,1018
AL,86,91,92,90 !A36		AL,116,120,121,122 !A47
	LSTR,7016,1017	AL,119,120,123,124 !A48
!PUNTO 16:	LSTR,1017,2017	
		!PUNTO 19:
K,1016,7.110+et/2,-et/2,hs	AL,101,108,109,107 !A41	K,1019,3.095,-et/2,hs
K,2016,7.110+et/2,0.000,hs	AL,103,105,106,107 !A42	K,2019,3.095,0.000,hs
K,3016,7.110+et/2,et/2,hs		K,3019,3.095,+et/2,hs
K,4016,7.110,-et/2,hs	K,4017,5.815,-et/2,hs	K,4019,2.615,-et/2,hs
K,5016,7.110,0.000,hs	K,5017,5.815,0.000,hs	K,5019,2.615,0.000,hs
K,6016,7.110,et/2,hs	K,6017,5.815,+et/2,hs	K,6019,2.615,+et/2,hs
K,7016,7.110-et/2,-et/2,hs		K,7019,ap+et/2,-et/2,hs
K,8016,7.110-et/2,0.000,hs	LSTR,2017,5017	K,8019,ap+et/2,0.000,hs
K,9016,7.110-et/2,+et/2,hs	LSTR,5017,6017	K,9019,ap+et/2,+et/2,hs
	LSTR,6017,3017	
LSTR,2016,3016	AL,106,110,111,112 !A43	LSTR,6018,3019
LSTR,3016,6016		LSTR,3019,2019
LSTR,6016,5016	LSTR,5017,4017	LSTR,2019,5018
LSTR,5016,2016	LSTR,4017,1017	LSTR,4018,1019
AL,93,94,95,96 !A37	AL,109,110,113,114 !A44	LSTR,1019,2019
LSTR,2016,1016	!PUNTO 18:	AL,121,125,126,127 !A49
LSTR,1016,4016		AL,123,128,129,127 !A50
LSTR,4016,5016	K,1018,4.695,-et/2,hs	
AL,97,98,99,96 !A38	K,2018,4.695,0.000,hs	LSTR,2019,5019
	K,3018,4.695,+et/2,hs	LSTR,5019,6019
LSTR,5016,8016		LSTR,6019,3019
LSTR,8016,7016	K,4018,4.215,-et/2,hs	



LSTR,5019,4019	!PUNTO 54:	LSTR,1051,2051 !L144
LSTR,4019,1019	K,1054,5.255,a,hs+ht+0.075	LSTR,2051,3051 !L145
	K,2054,5.815,a,hs+ht+0.075	LSTR,3051,4051 !L146
AL,132,126,130,131 !A51	K,3054,5.895,a,hs+ht+0.075	LSTR,4051,5051 !L147
AL,129,130,133,134 !A52	K,4054,6.195,a,hs+ht+0.075	LSTR,5051,6051 !L148
	K,5054,6.295,a,hs+ht+0.075	LSTR,6051,1052 !L149
LSTR,6019,9019		LSTR,1052,2052 !L150
LSTR,9019,8019	!PUNTO 55:	LSTR,2052,3052 !L151
LSTR,8019,5019	K,1055,6.720,a,hs+ht+0.075	LSTR,3052,4052 !L152
AL,131,135,137,136 !A53	K,2055,7.110-et/2,a,hs+ht+0.075	LSTR,4052,5052 !L153
	K,3055,7.110,a,hs+ht+0.075	LSTR,5052,1053 !L154
LSTR,4019,7019	K,4055,7.110,a-et/2,hs+ht+0.075	LSTR,1053,2053 !L155
LSTR,7019,8019		LSTR,2053,3053 !L156
AL,133,138,139,137 !A54	!PUNTO 56:	LSTR,3053,4053 !L157
	K,1056,7.110,0.225,hs+ht+0.075	LSTR,4053,1054 !L158
!VIGA CORONA:	K,2056,7.110,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,1054,2054 !L159
!PUNTO 50:	K,3056,7.110-et/2,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,2054,3054 !L160
K,1050,et/2,0.000,hs+ht+0.075	K,4056,6.720,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,3054,4054 !L161
K,2050,0.000,0.000,hs+ht+0.075		LSTR,4054,5054 !L162
K,3050,0.000,et/2,hs+ht+0.075	!PUNTO 57:	LSTR,5054,1055 !L163
K,4050,0.000,a/2,hs+ht+0.075	K,1057,6.295,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,1055,2055 !L164
	K,2057,5.815,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,2055,3055 !L165
!PUNTO 51:	K,3057,5.255,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,3055,1056 !L166
K,1051,0.000,a-et/2,hs+ht+0.075		LSTR,1056,2056 !L167
K,2051,0.000,a,hs+ht+0.075	!PUNTO 58:	LSTR,2056,3056 !L168
K,3051,et/2,a,hs+ht+0.075	K,1058,4.695,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,3056,4056 !L169
K,4051,0.590,a,hs+ht+0.075	K,2058,4.215,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,4056,1057 !L170
K,5051,1.180,a,hs+ht+0.075	K,3058,3.705,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,1057,2057 !L171
K,6051,1.560,a,hs+ht+0.075		LSTR,2057,3057 !L172
	!PUNTO 59:	LSTR,3057,1058 !L173
!PUNTO 52:	K,1059,3.195,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,1058,2058 !L174
K,1052,ap+et/2,a,hs+ht+0.075	K,2059,3.095,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,2058,3058 !L175
K,2052,2.175,a,hs+ht+0.075	K,3059,2.615,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,3058,1059 !L176
K,3052,2.615,a,hs+ht+0.075	K,4059,2.175,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,1059,2059 !L177
K,4052,2.895,a,hs+ht+0.075	K,5059,ap+et/2,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,2059,3059 !L178
K,5052,3.195,a,hs+ht+0.075	K,6059,1.180,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,3059,4059 !L179
	K,7059,0.590,0.000,hs+ht+0.075	LSTR,4059,5059 !L180
!PUNTO 53:		LSTR,5059,6059 !L181
K,1053,3.705,a,hs+ht+0.075	!VIGA CORONA:conectividad	LSTR,6059,7059 !L182
K,2053,4.215,a,hs+ht+0.075	sentido horario	LSTR,7059,1050 !L183
K,3053,4.395,a,hs+ht+0.075	LSTR,1050,2050 !L140	
K,4053,4.695,a,hs+ht+0.075	LSTR,2050,3050 !L141	!VIGUETAS:, conectividad sentido
	LSTR,3050,4050 !L142	+y
	LSTR,4050,1051 !L143	

LSTR,2050,2051 !L184	VOFFST,32,-ht/3,10	VOFFST,140,-ht/3,10
LSTR,7059,4051 !L185	VOFFST,33,-ht/3,10	VOFFST,144,ht/3,10
LSTR,6059,5051 !L186	VOFFST,34,ht/3,10	VOFFST,147,ht/3,10
LSTR,5059,1052 !L187	VOFFST,35,ht/3,10	VOFFST,151,-ht/3,10
LSTR,4059,2052 !L188	VOFFST,36,-ht/3,10	VOFFST,154,-ht/3,10
LSTR,3059,3052 !L189	VOFFST,37,ht/3,10	VOFFST,158,ht/3,10
LSTR,1059,5052 !L190	VOFFST,38,-ht/3,10	VOFFST,161,ht/3,10
LSTR,3058,1053 !L191	VOFFST,39,ht/3,10	VOFFST,165,-ht/3,10
LSTR,2058,2053 !L192	VOFFST,40,-ht/3,10	VOFFST,168,ht/3,10
LSTR,1058,4053 !L193	VOFFST,41,-ht/3,10	VOFFST,173,-ht/3,10
LSTR,3057,1054 !L194	VOFFST,42,ht/3,10	VOFFST,177,ht/3,10
LSTR,2057,2054 !L195	VOFFST,44,ht/3,10	VOFFST,181,-ht/3,10
LSTR,1057,5054 !L196	VOFFST,45,ht/3,10	VOFFST,184,-ht/3,10
LSTR,4056,1055 !L197	VOFFST,46,-ht/3,10	VOFFST,188,ht/3,10
LSTR,2056,3055 !L198	VOFFST,48,ht/3,10	VOFFST,191,ht/3,10
	VOFFST,49,ht/3,10	VOFFST,195,ht/3,10
!VOLUMEN TAPIA	VOFFST,50,-ht/3,10	VOFFST,200,-ht/3,10
	VOFFST,52,ht/3,10	VOFFST,203,ht/3,10
VOFFST,1,+ht/3,10	VOFFST,53,ht/3,10	VOFFST,207,ht/3,10
VOFFST,2,-ht/3,10	VOFFST,54,-ht/3,10	VOFFST,212,-ht/3,10
VOFFST,3,+ht/3,10		VOFFST,215,ht/3,10
VOFFST,4,-ht/3,10	VOFFST,55,+ht/3,10	VOFFST,219,ht/3,10
VOFFST,5,-ht/3,10	VOFFST,60,-ht/3,10	VOFFST,224,-ht/3,10
VOFFST,6,+ht/3,10	VOFFST,64,+ht/3,10	
VOFFST,7,+ht/3,10	VOFFST,68,-ht/3,10	VOFFST,227,+ht/3,10
VOFFST,8,-ht/3,10	VOFFST,71,-ht/3,10	VOFFST,232,-ht/3,10
VOFFST,9,-ht/3,10	VOFFST,75,+ht/3,10	VOFFST,236,+ht/3,10
VOFFST,10,ht/3,10	VOFFST,78,+ht/3,10	VOFFST,240,-ht/3,10
VOFFST,11,ht/3,10	VOFFST,82,-ht/3,10	VOFFST,243,-ht/3,10
VOFFST,12,-ht/3,10	VOFFST,85,-ht/3,10	VOFFST,247,+ht/3,10
VOFFST,13,-ht/3,10	VOFFST,89,ht/3,10	VOFFST,250,+ht/3,10
VOFFST,14,ht/3,10	VOFFST,92,ht/3,10	VOFFST,254,-ht/3,10
VOFFST,15,ht/3,10	VOFFST,96,-ht/3,10	VOFFST,257,-ht/3,10
VOFFST,16,-ht/3,10	VOFFST,99,-ht/3,10	VOFFST,261,ht/3,10
VOFFST,19,ht/3,10	VOFFST,103,ht/3,10	VOFFST,264,ht/3,10
VOFFST,20,-ht/3,10	VOFFST,106,ht/3,10	VOFFST,268,-ht/3,10
VOFFST,23,ht/3,10	VOFFST,110,-ht/3,10	VOFFST,271,-ht/3,10
VOFFST,24,-ht/3,10	VOFFST,113,ht/3,10	VOFFST,275,ht/3,10
VOFFST,27,ht/3,10	VOFFST,118,-ht/3,10	VOFFST,278,ht/3,10
VOFFST,28,-ht/3,10	VOFFST,122,ht/3,10	VOFFST,282,-ht/3,10
VOFFST,29,-ht/3,10	VOFFST,127,-ht/3,10	VOFFST,285,ht/3,10
VOFFST,30,ht/3,10	VOFFST,131,ht/3,10	VOFFST,290,-ht/3,10
VOFFST,31,ht/3,10	VOFFST,136,-ht/3,10	VOFFST,294,ht/3,10

VOFFST,299,-ht/3,10		VOFFST,28,hs,-10
VOFFST,303,ht/3,10	VOFFST,1,-hs,-10	VOFFST,29,hs,-10
VOFFST,308,-ht/3,10	VOFFST,2,hs,-10	VOFFST,30,-hs,-10
VOFFST,312,-ht/3,10	VOFFST,3,-hs,-10	VOFFST,31,-hs,-10
VOFFST,316,ht/3,10	VOFFST,4,hs,-10	VOFFST,32,hs,-10
VOFFST,319,ht/3,10	VOFFST,5,hs,-10	VOFFST,33,hs,-10
VOFFST,323,-ht/3,10	VOFFST,6,-hs,-10	VOFFST,34,-hs,-10
VOFFST,326,-ht/3,10	VOFFST,7,-hs,-10	VOFFST,35,-hs,-10
VOFFST,330,ht/3,10	VOFFST,8,hs,-10	VOFFST,36,hs,-10
VOFFST,333,ht/3,10	VOFFST,9,hs,-10	VOFFST,37,-hs,-10
VOFFST,337,-ht/3,10	VOFFST,10,-hs,-10	VOFFST,38,hs,-10
VOFFST,340,ht/3,10	VOFFST,11,-hs,-10	VOFFST,39,-hs,-10
VOFFST,345,-ht/3,10	VOFFST,12,hs,-10	VOFFST,40,hs,-10
VOFFST,349,ht/3,10	VOFFST,13,hs,-10	VOFFST,41,hs,-10
VOFFST,353,-ht/3,10	VOFFST,14,-hs,-10	VOFFST,42,-hs,-10
VOFFST,356,-ht/3,10	VOFFST,15,-hs,-10	VOFFST,43,hs,-10
VOFFST,360,ht/3,10	VOFFST,16,hs,-10	VOFFST,44,-hs,-10
VOFFST,363,ht/3,10	VOFFST,17,hs,-10	VOFFST,45,-hs,-10
VOFFST,367,ht/3,10	VOFFST,18,-hs,-10	VOFFST,46,hs,-10
VOFFST,372,-ht/3,10	VOFFST,19,-hs,-10	VOFFST,47,hs,-10
VOFFST,375,ht/3,10	VOFFST,20,hs,-10	VOFFST,48,-hs,-10
VOFFST,379,ht/3,10	VOFFST,21,hs,-10	VOFFST,49,-hs,-10
VOFFST,384,-ht/3,10	VOFFST,22,-hs,-10	VOFFST,50,hs,-10
VOFFST,387,ht/3,10	VOFFST,23,-hs,-10	VOFFST,51,hs,-10
VOFFST,391,ht/3,10	VOFFST,24,hs,-10	VOFFST,52,-hs,-10
VOFFST,396,-ht/3,10	VOFFST,25,hs,-10	VOFFST,53,-hs,-10
	VOFFST,26,-hs,-10	VOFFST,54,hs,-10
!VOLUMEN SOBRECIMIENTO	VOFFST,27,-hs,-10	

## 2-Muros Tapia y Sobrecimiento.txt

### ! MATERIALES

#### ! TAPIA INFERIOR

MP,EX,1,1e9 ! Módulo de Young  
[Pa]

MP,PRXY,1,0.2 ! Coeficiente de  
Poisson

MP,DENS,1,1927 !Densidad  
[Kg/m<sup>3</sup>]

### ! TAPIA INTERMEDIA

MP,EX,2,7e8 ! Módulo de Young  
[Pa]

MP,PRXY,2,0.2 ! Coeficiente de  
Poisson

MP,DENS,2,1927 ! Densidad  
[Kg/m<sup>3</sup>]

### ! TAPIA SUPERIOR

MP,EX,3,3e8 ! Módulo de Young  
[Pa]

MP,PRXY,3,0.2 ! Coeficiente de  
Poisson

MP,DENS,3,1927 ! Densidad  
[Kg/m<sup>3</sup>]

### ! SOBRECIMIENTO

MP,EX,5,2e10 ! Módulo de Young  
[Pa]

MP,PRXY,5,0.3 ! Coeficiente de  
Poisson

MP,DENS,5,2400 ! Densidad

[Kg/m <sup>3</sup> ]	VMESH,ALL	MAT,2
	VSEL,ALL	VMESH,ALL
! ELEMENTOS		VSEL,ALL
ET,1,SOLID185	! MUROS TAPIA	
	VSEL,S,LOC,Z,hs,hs+ht/3	VSEL,S,LOC,Z,hs+2*ht/3,hs+3*ht/3
! MALLADO	TYPE,1	TYPE,1
ESIZE,0.15	MAT,1	MAT,3
	VMESH,ALL	VMESH,ALL
! SOBRECIMIENTO	VSEL,ALL	VSEL,ALL
VSEL,S,LOC,Z,0,hs		
TYPE,1	VSEL,S,LOC,Z,hs+ht/3,hs+2*ht/3	
MAT,5	TYPE,1	

### 3- Viga Collar.txt

! MADERA PINO		! VIGA CORONA
MP,EX,4,8e9 ! Módulo de Young [Pa]	! SECCION	LSEL,S,,,140,183,1
MP,PRXY,4,0.3 ! Coeficiente de Poisson	SECTYPE,1,BEAM,RECT,vcorona,0	TYPE,2
MP,DENS,4,500 ! Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	SECOFFSET,CENT	MAT,4
	SECDATA,0.15,0.15	SECNUM,1
! ELEMENTOS	! MALLADO	LMESH,ALL
ET,2,BEAM188	ESIZE,0.15	LSEL,ALL

### 4- Unión Viga Collar–Muro.txt

! MATERIALES	! ELEMENTOS	! GEOMETRIA ELEMENTOS DE UNION
!MATERIAL AUXILIAR UNIONES	ET,2,BEAM188	LSTR,6040,1050
		LSTR,9040,2050
MP,EX,6,1e12 !Módulo de Young [Pa]	! SECCIONES	LSTR,4040,3050
MP,PRXY,6,0.1 !Coeficiente de Poisson	SECTYPE,3,BEAM,RECT,union,0	LSTR,12040,4050
MP,DENS,6,0 ! Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	SECOFFSET,CENT	LSTR,2041,1051
	SECDATA,0.01,0.01	LSTR,5041,2051
		LSTR,6041,3051

LSTR,11041,6051	LSTR,5046,2056	ESIZE,0.15
LSTR,2042,4052	LSTR,8046,3056	
LSTR,5042,5052	LSTR,2047,1057	! UNIONES
LSTR,2043,3053	LSTR,5047,2057	LSEL,S,,,1067,1093
LSTR,5043,4053	LSTR,2048,1058	TYPE,2
LSTR,2044,3054	LSTR,5048,2058	MAT,6
LSTR,5044,4054	LSTR,2049,2059	SECNUM,3
LSTR,2045,2055	LSTR,5049,3059	LMESH,ALL
LSTR,5045,3055	LSTR,8049,5059	LSEL,ALL
LSTR,4045,4055		
LSTR,6046,1056	! MALLADO	

## 5- Viguetas.txt

! ELEMENTOS		TYPE,2
ET,2,BEAM188	! MALLADO	MAT,4
	ESIZE,0.15	SECNUM,2
! SECCIONES		LMESH,ALL
SECTYPE,2,BEAM,RECT,vigueta,0		LSEL,ALL
SECOFFSET,CENT	!VIGUETAS	
SECDATA,0.07,0.15	LSEL,S,,,185,197,1	

## 6- Cubierta.txt

NUMSTR,AREA,1000		ASEL,ALL
!GEOMETRIA	! ELEMENTOS	
AL,140,141,142,143,144,145,146,185,183	ET,3,SHELL181	
AL,185,147,186,182	! SECCION	
AL,186,148,149,187,181	SECT,4,shell,,cubierta	
AL,187,150,188,180	SECDATA, 0.01,4,0.0,3	
AL,188,151,189,179	SECOFFSET,MID	
AL,189,152,153,190,177,178	SECCONTROL,,,, 80, , , ! ADDED	
AL,190,154,191,176	MASS/UNIT AREA = 80 kg/m2	
AL,191,155,192,175	!MALLADO	
AL,192,156,157,193,174	ESIZE,0.15	
AL,193,158,194,173	ASEL,S,,,1000,1013,1	
AL,194,159,195,172	TYPE,3	
AL,195,160,161,162,196,171	MAT,4	
AL,196,163,197,170	SECNUM,4	
AL,197,164,165,166,167,168,169	AMESH,ALL	

## 7- Pretiles.txt

! PARAMETROS	AL,743,1121,768,1122	VOFFST,2003,-hp,100
hp=0.6 ! Altura de los pretiles (0.60m)		VOFFST,512,hp,100
apr=0.26 ! Ancho de los pretiles (0.26m)		VOFFST,517,-hp,100
	LSTR,7040,7049	VOFFST,521,hp,100
	LSTR,8049,6040	VOFFST,528,-hp,100
! GEOMETRIA PRETILES	AL,1123,839,1124,642	VOFFST,535,hp,100
		VOFFST,544,-hp,100
VOFFST,505,hp,10		VOFFST,547,hp,100
VOFFST,509,-hp,10	VOFFST,408,hp,100	VOFFST,556,-hp,100
VOFFST,498,-hp,10	VOFFST,404,-hp,100	VOFFST,559,hp,100
VOFFST,502,hp,10	VOFFST,399,hp,100	VOFFST,568,-hp,100
	VOFFST,415,-hp,100	VOFFST,2004,hp,100
LSTR,6042,3042	VOFFST,422,hp,100	
LSTR,2042,5042	VOFFST,429,-hp,100	! ELEMENTOS
NUMSTR,AREA,2000	VOFFST,436,hp,100	ET,1,SOLID185
AL,704,1115,694,1116	VOFFST,440,-hp,100	
	VOFFST,447,hp,100	! MALLADO
LSTR,6043,3043	VOFFST,454,-hp,100	ESIZE,0.15
LSTR,2043,5043	VOFFST,2000,hp,100	
AL,1117,706,1118,717	VOFFST,462,-hp,100	!PRETILES
	VOFFST,2001,hp,100	VSEL,S,LOC,Z,hs+ht,hs+ht+hp
LSTR,6044,3044	VOFFST,471,-hp,100	TYPE,1
LSTR,2044,5044	VOFFST,2002,hp,100	MAT,3
AL,730,1119,719,1120	VOFFST,480,-hp,100	VMESH,ALL
	VOFFST,488,hp,100	VSEL,ALL
LSTR,7045,3046	VOFFST,495,-hp,100	
LSTR,6046,4045	VOFFST,491,hp,100	

## 8- Solucion.txt

NUMMRG,KP	D,ALL,UY,0	ANTYPE,MODAL
NUMMRG,NODES	D,ALL,UZ,0	MODOPT,LANB,20
	NSEL,ALL	EQSLV,SPAR
! CONDICIONES DE CONTORNO		LUMPM,1
NSEL,S,LOC,Z,0	FINISH	MXPAND,20,,1
D,ALL,UX,0	/SOL	SOLVE