



---

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Caracterización experimental de pajitas de  
papel como elemento estructural y diseño de  
uniones para construir pórticos a escala**

Autor:

González Aníbarro, Mateo

Tutor(es):

Magdaleno González, Álvaro  
Lorenzana Ibán, Antolín  
Departamento C.A., I.A., M.M.C. y  
Teoría de Estructuras

Valladolid, junio 2025.

**A mis padres, a mi hermana y a mi familia.**

Por quererme y apoyarme estos años y por ser tan importantes para mí.

**A mis amigos.**

## RESUMEN

Se va a trabajar con modelos en base a pajitas de papel de ámbito comercial, cuyas dimensiones serán 229 mm de largo, 7,8 mm de diámetro exterior y 6,8 mm de diámetro interior y con uniones de diseño propio obtenidas mediante impresión 3D, con las que se realizarán una serie de ensayos en el laboratorio de estructuras de la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid y también, paralelamente, se realizarán simulaciones mediante su modelización en SAP2000.

El propósito de este trabajo es realizar un estudio estático, primero para caracterizar los materiales de los que están compuestas tanto las pajitas como las uniones y posteriormente conformar con estos elementos un pórtico para estudiar cómo responde una estructura formada por materiales biodegradables y de bajo coste frente a diferentes situaciones de carga.

## PALABRAS CLAVE

Pajitas de papel, uniones, SAP2000, caracterización, pórtico.

## ABSTRACT

A work will be carried out with models based on commercial paper straws, whose dimensions will be 229 mm long, 7.8 mm in external diameter and 6.8 mm in internal diameter, and with self-designed joints obtained by 3D printing, with which a series of tests will be carried out in the structures laboratory of the School of Industrial Engineering of Valladolid and, in parallel, these same tests will be carried out by modelling them in SAP2000.

The purpose of this work is to carry out a dynamic study, first to characterise the materials of which both the straws and the joints are composed and then to use these elements to form a frame to study how a structure made of low-cost, biodegradable materials responds to different load situations.

## KEYWORDS

Paper straws, links, SAP2000, characterisation, frame.

## ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción: justificación, antecedentes, objetivos y plan de trabajo .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Justificación del tema .....	2
1.3 Antecedentes.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.5 Plan de trabajo .....	4
Capítulo 2. Marco teórico .....	5
2.1 Justificación de la elección del material y alternativas.....	5
2.2 Elemento de estudio .....	5
2.3 Principales solicitudes que experimentará el elemento de estudio .....	7
2.4 Comportamiento experimentado durante los ensayos.....	9
Capítulo 3. Materiales y métodos .....	11
3.1 Materiales utilizados .....	11
3.2 Instrumentación .....	14
3.3 Modelado de las uniones.....	20
3.4 Colocación y disposición de los equipos.....	23
Capítulo 4. Ensayos y resultados .....	25
4.1 Proceso experimental para la caracterización del material .....	25
4.2 Proceso experimental para el estudio de la resistencia del pórtico .....	77
Capítulo 5. Conclusiones .....	96
5.1 Objetivos alcanzados .....	96
5.2 Conclusiones generales .....	97
5.3 Líneas de mejora .....	98
5.4 Otros aspectos a tener en cuenta .....	99
BIBLIOGRAFÍA .....	100

# Capítulo 1. Introducción: justificación, antecedentes, objetivos y plan de trabajo

## 1.1 Introducción

En los últimos años, la preocupación por el impacto ambiental de los plásticos de un solo uso ha aumentado considerablemente. En este contexto, se han impulsado alternativas más sostenibles y ecológicas para tratar de reemplazar productos tradicionales de plástico, entre ellos, las pajitas desechables. En este sentido, las pajitas de papel, como la que se puede apreciar en la **Figura 1**, se han posicionado como una de las soluciones más destacadas debido a su biodegradabilidad y a su capacidad de reducir la huella ecológica.



Figura 1. Pajita

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se enfoca en el estudio y desarrollo de una estructura utilizando pajitas de papel, material que, a pesar de su popularidad en la industria de productos desechables, aún presenta ciertos desafíos en cuanto a sus propiedades mecánicas y estructurales. El objetivo principal de este trabajo es explorar el potencial de las pajitas de papel como un material versátil en la ingeniería estructural, evaluando sus características físicas, su capacidad de carga y su comportamiento en diferentes configuraciones geométricas.

A lo largo de este TFG, se llevará a cabo un análisis detallado sobre las propiedades de las pajitas de papel, su resistencia y sus limitaciones, además de realizar una serie de pruebas experimentales que permitirán optimizar su uso en la construcción de estructuras pequeñas. Este estudio no solo contribuye a la comprensión de las aplicaciones de las pajitas de papel en ingeniería, sino que también abre el camino hacia la investigación y el desarrollo de nuevos materiales ecológicos que puedan

reemplazar a los productos plásticos convencionales en la industria de la construcción.

Con ello, se busca ofrecer una solución innovadora, sostenible y eficiente, alineada con los principios de la economía circular y la minimización del impacto ambiental. Este trabajo representa un paso hacia la integración de materiales alternativos y responsables en las disciplinas de ingeniería, impulsando una transformación hacia prácticas más sostenibles en el diseño y la construcción.

A mayores, el presente trabajo puede brindar una oportunidad de ofrecer un enfoque educativo o didáctico a la hora de aplicar los conceptos teóricos impartidos en las clases de resistencia de materiales y estructuras. De esta manera se realizaría de una forma más visual y atractiva para la comprensión de futuros estudiantes.

## 1.2 Justificación del tema

El proyecto de construcción de una estructura en miniatura utilizando pajitas de papel nace de una combinación de motivaciones personales, académicas y sociales. Desde un punto de vista personal, la elección de este proyecto responde al interés por combinar creatividad y técnica, superando el reto de trabajar con un material aparentemente sencillo, como las pajitas de papel, y explorar su potencial en la construcción de estructuras estables y eficientes. Este desafío también permite aplicar de manera práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera en áreas como el análisis estructural y la resistencia de materiales.

A nivel académico, el proyecto constituye una motivación para profundizar en la teoría de estructuras, experimentando con materiales no convencionales y analizando su comportamiento ante diferentes cargas. Esta experiencia ofrece no solo la ocasión de aplicar lo aprendido, sino también de explorar nuevas soluciones en ingeniería, impulsando el desarrollo del estudiante en el campo de la ingeniería estructural. Además, al trabajar con un material reciclable y biodegradable, la sostenibilidad ha sido igualmente un factor clave en la toma de la decisión, por cuanto permite alinearse con los principios de responsabilidad ambiental que son cada vez más relevantes en el diseño y construcción de estructuras.

Por último, desde un punto de vista social, el uso de pajitas de papel como material principal refleja el interés por contribuir a la reducción de residuos plásticos, mostrando cómo la ingeniería puede ofrecer soluciones innovadoras y sostenibles para problemas ambientales globales.

En suma, este proyecto refleja una combinación de intereses técnicos, creativos y sostenibles que han motivado su elección y que, a nuestro modo de ver, resultan fundamentales para un desarrollo adecuado como futuro profesional en el campo de la ingeniería.

### 1.3 Antecedentes

Es probable que una buena parte de los estudiantes que hoy en día cursan una carrera de ingeniería, se enfrentasen hace años, en la etapa de sus estudios de la ESO, a algún proyecto que implicara la realización de una estructura con materiales de uso cotidiano. En nuestro caso particular, ese trabajo consistió en la realización de una maqueta de un puente con palitos de papel, el cual se puede observar en la **Figura 2**, los cuales debían elaborarse a mano enrollando folios y pegándolos con cola.



Figura 2. Puente de palitos de papel

Una vez terminada la maqueta, el profesor procedía, en una suerte de competición, a cargar el puente con diferentes elementos, resultando ganador el puente que más peso lograse soportar. Salvando las diferencias, que claramente son muchas, el concepto de ambos experimentos es similar, buscando comprobar la resistencia de una estructura a miniatura la cual ha sido conformada con materiales *low cost* y que sean respetuosos con el medioambiente.

Durante la elaboración de este TFG, se emplearán conocimientos de asignaturas completadas durante los años de estudio en la carrera de Ingeniería en Tecnologías Industriales, que han proporcionado conocimientos relacionados con el campo de las estructuras y los materiales.

En efecto, a lo largo del grado se han cursado varias asignaturas que guardan relación con este TFG, como son:

- Resistencia de Materiales.
- Elasticidad, Resistencia y Estructuras.
- Ciencia de los Materiales.
- Dibujo Asistido por Ordenador.

En la asignatura de Resistencia de Materiales, los conocimientos adquiridos engloban conocimientos sobre los distintos tipos de materiales utilizados, las formas

estructurales y las acciones, así como la destreza para realizar análisis de equilibrio estático y tensión, junto con estudios de flexión, torsión y pandeo [1].

Por su parte, en Elasticidad, Resistencia y Estructuras, destaca el estudio del comportamiento del sólido elástico frente a tensiones y deformaciones [2], sumado a la aplicación de los conocimientos adquiridos en resistencia de materiales ya mencionados.

En Ciencia de los Materiales se proporcionan conocimientos acerca de las propiedades tanto físicas como mecánicas de los distintos tipos de materiales, así como su comportamiento ante diferentes tipos de esfuerzos dependiendo de sus características [3].

Por su parte, en la asignatura de Dibujo Asistido por Ordenador se suministran los conocimientos para lograr un manejo fluido del programa Catia V5 y de sus diferentes funcionalidades.

#### **1.4 Objetivos**

Con la realización del presente TFG, se pretenden alcanzar los objetivos que se enuncian a continuación:

- Caracterizar los materiales con los que están conformadas las pajitas y las uniones.
- Entender el comportamiento de estructuras de materiales alternativos bajo la acción de fuerzas estáticas.
- Determinar qué esfuerzos pueden resultar más perjudiciales en estructuras constituidas por pajitas de papel
- Comprobar la viabilidad de emplear derivados del papel en ingeniería estructural.
- Realizar simulaciones mediante el software SAP2000, para así poder analizar la precisión de los resultados obtenidos mediante computación y de manera experimental.

#### **1.5 Plan de trabajo**

La sistematización que se va a utilizar para la elaboración del TFG incluye, aparte de este capítulo dedicado a los aspectos introductorios del mismo, otros cuatro capítulos de los que se pasa a dar oportuna cuenta.

El Capítulo segundo se va a dedicar al análisis, siquiera de forma sucinta, de los fundamentos teóricos en los que se sustenta el estudio llevado a cabo. Por su parte, el Capítulo tercero se ocupa de la descripción de los diversos materiales (estructuras, software, etc.) y la metodología empleada para la realización del TFG. En el Capítulo cuarto se describen los ensayos, pruebas y resultados alcanzados. Por último, el TFG se cierra con un Capítulo quinto destinado a la exposición de las principales conclusiones a las que se ha llegado.

## Capítulo 2. Marco teórico

En este capítulo se buscará describir el comportamiento del elemento estructural que se empleará para entenderlo antes de proceder con el estudio experimental y justificar el porqué de su uso frente al resto de alternativas en el mercado.

### 2.1 Justificación de la elección del material y alternativas

En un mundo actual en el que cada vez cobra más importancia el ecologismo y el empleo de materiales que sean respetuosos con el medioambiente para tratar de reducir el impacto ambiental, hemos tratado de seguir esta tendencia y emplear materiales menos utilizados en ingeniería estructural para estudiar su viabilidad para estos fines, beneficiéndonos de su bajo coste económico, facilidad de adquisición y manipulación. Estos, nos permiten desarrollar modelos funcionales y estudiar comportamientos estructurales sin necesidad de recurrir a materiales industriales convencionales, que implicarían una inversión considerable en recursos y equipamiento. En la búsqueda de la elección del material a utilizar barajamos opciones como cartón, plásticos reciclables, madera, pero sin embargo se optó por el uso de pajitas de papel como elemento estructural básico. Este material presenta ventajas relevantes como su bajo coste, ligereza, disponibilidad y comportamiento mecánico suficientemente reproducible para fines experimentales. Además, al tratarse de un material recicitable y biodegradable, se alinea con los criterios de sostenibilidad y economía circular, promoviendo prácticas responsables en el ámbito formativo y experimental de la ingeniería.

### 2.2 Elemento de estudio

Modelaremos la pajita como un cilindro ubicado en el plano XZ. En estructuras, a los elementos cilíndricos que soportan cargas y forman parte de una estructura se denominan barras. Por lo general una barra es un elemento plano y continuo cuya longitud suele ser mucho mayor que su espesor. Cabe destacar que las barras sometidas a esfuerzos de flexión suelen ser también nombradas como vigas.

Partiendo de este fundamento, en el presente trabajo la pajita de papel se modela idealmente como una viga biapoyada, una configuración clásica en el análisis estructural por su simplicidad y aplicabilidad en múltiples contextos. Esta aproximación permite estudiar el comportamiento mecánico del elemento ante diferentes tipos de carga de forma analítica y predecible, considerando hipótesis razonables que facilitan la obtención de resultados útiles sin recurrir a modelos computacionalmente complejos.

Una viga biapoyada es un elemento estructural lineal que se encuentra apoyado en sus dos extremos: uno mediante un apoyo articulado, que impide el desplazamiento en ambas direcciones, pero permite rotaciones, y otro mediante un apoyo de tipo rodillo, que restringe el desplazamiento vertical, pero permite movimiento horizontal y también rotaciones. Esta configuración convierte al sistema en isostático, es decir, que las reacciones en los apoyos y los esfuerzos internos pueden determinarse únicamente mediante las ecuaciones de equilibrio estático.

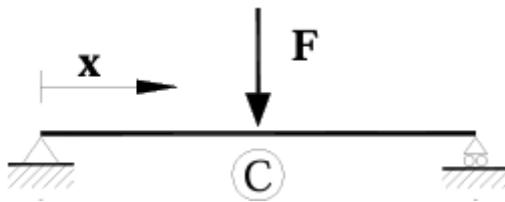


Figura 3. Esquema de una viga biapoyada [4]

Desde el punto de vista del análisis mecánico, modelar la pajita como una barra biapoyada, como la que se puede ver en la **Figura 3**, implica asumir que el material se comporta de manera lineal elástica dentro del rango de cargas aplicadas. Se considera que la sección transversal permanece plana durante la deformación (según la hipótesis de Bernoulli-Euler), y que las deformaciones son pequeñas. Asimismo, se desprecia el peso propio del elemento y posibles imperfecciones geométricas o anisotropías, aunque se reconoce que en la práctica el papel es un material ortotrópico.

Al estar sometida a distintas solicitudes, como tracción, compresión y flexión, la pajita presenta distintos comportamientos estructurales. Bajo tracción o compresión axial, se generan esfuerzos normales distribuidos uniformemente a lo largo de la sección, provocando un alargamiento o acortamiento del elemento, respectivamente. En cambio, cuando se aplica una carga transversal, como en un ensayo de flexión, aparecen momentos flectores y fuerzas cortantes, originando una deformación curvada del eje de la barra, con fibras superiores en compresión y fibras inferiores en tracción. La intensidad de esta deformación está directamente relacionada con el módulo de elasticidad del material ( $E$ ) y con el momento de inercia ( $I$ ) de la sección transversal, el cual depende de la geometría tubular de la pajita.

A continuación, en la **Figura 4**, se presenta la solicitación a la que se expondrá la viga biapoyada en los ensayos que se realizarán más adelante: acción de una fuerza puntual en el punto medio de la viga.

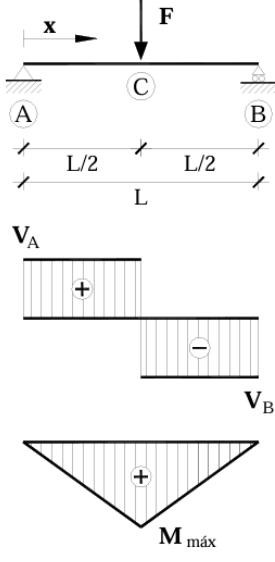
<b>VIGA SIMPLE APOYADA:</b> carga puntual F centrada.	
<b>Reacciones y solicitudes</b>	
	Reacciones: $R_A = R_B = \frac{F}{2}$ Cortantes: $V_{AC} = \frac{F}{2}$ $V_{CB} = -\frac{F}{2}$ Flectores: $M_{AC} = \frac{F}{2}x$ $M_{CB} = \frac{F}{2}(L-x)$ $M_{\max} = M_C = \frac{FL}{4}$ para $x = \frac{L}{2}$
<b>Deformaciones</b>	
	Giros: $\varphi_A = -\frac{FL^2}{16EI}$ $\varphi_B = \frac{FL^2}{16EI}$ $\varphi_C = 0$ Elástica: $y_{AC} = \frac{FL^2x}{16EI} \left(1 - \frac{4x^2}{3L^2}\right)$ $y_{CB} = \frac{FL^2(L-x)}{12EI} \left(\frac{3}{4} - \frac{(L-x)^2}{L^2}\right)$ Flecha máxima: $y_{\max} = y_C = \frac{FL^3}{48EI}$ para $x = \frac{L}{2}$

Figura 4. Viga biapoyada sometida a una fuerza puntual (F) en su punto central (L/2) [4]

### 2.3 Principales solicitudes que experimentará el elemento de estudio

Estas barras cuando son empleadas como elementos estructurales, sufrirán diferentes tipos de esfuerzos [5], en los cuales basaremos nuestros ensayos, entre los que encontraremos:

- **Esfuerzo axial**

Se conoce como esfuerzo axial a una fuerza interna que actúa a lo largo del eje de un elemento estructural, generando una tensión normal la cual se obtiene a través de la fórmula que se observa en la **Figura 5**:

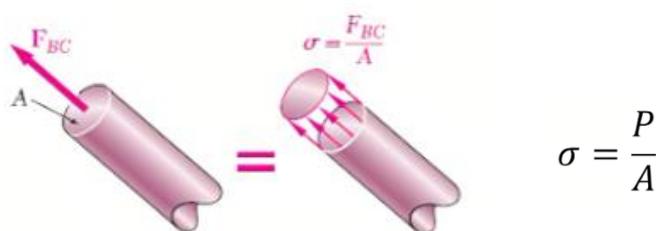


Figura 5. Esquema de la tensión normal por esfuerzo axial

Dependiendo de en qué sentido del eje esté aplicada causará un efecto u otro:

1. **Compresión:** consiste en la aplicación de una fuerza de manera axial sobre la barra, empujando desde ambos extremos y generando un esfuerzo de compresión. Esto provocará un acortamiento de su longitud.

Este tipo de solicitud, como se puede observar en la **Figura 6**, puede inducir inestabilidad (pandeo), especialmente en elementos largos y delgados como una pajita de papel.



Figura 6. Esquema de esfuerzo axil de compresión en vigas de sección circular

**2. Tracción:** es un esfuerzo prácticamente igual a la compresión, pero aplicada de manera que la fuerza axial tira de la viga desde ambos extremos produciendo un esfuerzo de tracción que genere un alargamiento de su longitud.

En tracción, las fibras de la viga tienden a separarse como se parecía en la **Figura 7**, y la deformación es proporcional a la carga aplicada dentro del régimen elástico.



Figura 7. Esquema de esfuerzo axil de tracción en vigas de sección circular

- **Esfuerzo cortante:** El esfuerzo cortante (también llamado fuerza cortante) es un tipo de carga interna que actúa de forma perpendicular al eje longitudinal de una viga. Ocurre cuando fuerzas opuestas actúan en direcciones paralelas, pero en puntos cercanos, provocando una deformación en forma de deslizamiento entre las secciones del material. Este tipo de esfuerzo, cuya representación se puede observar en la **Figura 8**, genera una tensión tangencial y no suelen revestir graves problemas para nuestra estructura, considerándolos prácticamente despreciables.

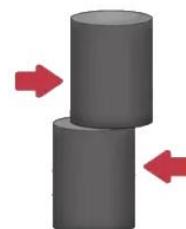
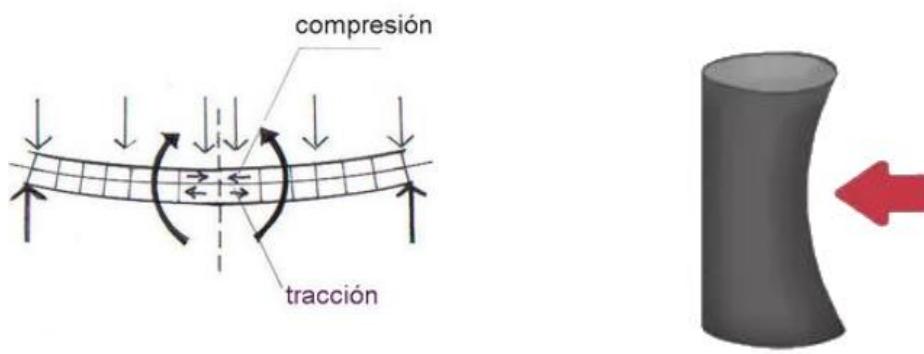


Figura 8. Esquema de esfuerzo cortante en vigas de sección circular

- **Momento flector:** El momento flector es una solicitud interna que aparece en los elementos estructurales como resultado de las cargas perpendiculares al eje de la viga, actuando sobre un eje que no sea el eje del elemento estructural, tratando de doblarlo o flexionarlo. En una viga biapoyada, el momento flector varía a lo largo de su longitud dependiendo del tipo, magnitud y distribución de las cargas aplicadas. Este esfuerzo, cuya representación se plantea en las **Figuras 9 y 10**, generará sobre nuestra estructura una tensión normal y se considera el esfuerzo más perjudicial al cual nos podemos enfrentar, por lo que deberemos tener en cuenta que, en vigas delgadas como una pajita de papel, el momento flector puede inducir pandeo local o aplastamiento si no se controla.



Momento Flector

Figuras 9 y 10. Esquema del momento flector en vigas de sección circular

## 2.4 Comportamiento experimentado durante los ensayos

Durante la realización del trabajo fin de grado someteremos a las probetas a diferentes ensayos que comprobarán su respuesta frente a los esfuerzos descritos anteriormente. Durante los mismo se podrá observar cómo su comportamiento va variando dependiendo de en qué régimen nos encontramos.

Cuando un material se somete a una carga creciente, su respuesta se representa típicamente mediante una curva fuerza-desplazamiento (o tensión-deformación), que permite identificar diferentes fases en su comportamiento mecánico. Estas fases son esenciales para comprender la resistencia y la deformabilidad de un material.

- **Zona elástica:** es la región inicial de la curva donde el material se deforma de manera reversible. Es decir, al eliminar la carga aplicada, el material vuelve a su forma original sin sufrir ningún daño permanente. Esta zona se rige por la ley de Hooke, que establece una relación lineal entre la tensión y la deformación.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Siendo  $\sigma$  la tensión,  $\varepsilon$  la deformación, y  $E$  el módulo de elasticidad o de Young, una constante que caracteriza la rigidez del material.

- **Zona lineal:** dentro de la zona elástica, existe una subzona denominada lineal, donde la relación entre la tensión y la deformación es estrictamente proporcional. Esta es la región en la que se puede aplicar directamente la ley de Hooke sin desviaciones.
- **Límite elástico del material:** es el punto a partir del cual el material deja de comportarse elásticamente y empieza a deformarse de manera plástica. A partir de este punto, aunque la carga se retire, el material no recupera completamente su forma original, es decir, es la carga máxima que puede aplicarse sin que aparezca deformación permanente.
- **Zona plástica:** el material continúa deformándose, pero ya de forma irreversible, apareciendo mayores deformaciones con incrementos menores de tensión.
- **Límite de rotura/fractura:** es el valor máximo de tensión que el material puede soportar antes de fracturarse.

A continuación, en la **Figura 11**, se proporciona un ejemplo de gráfica tensión-deformación en el que se observan las formas anteriormente mencionadas

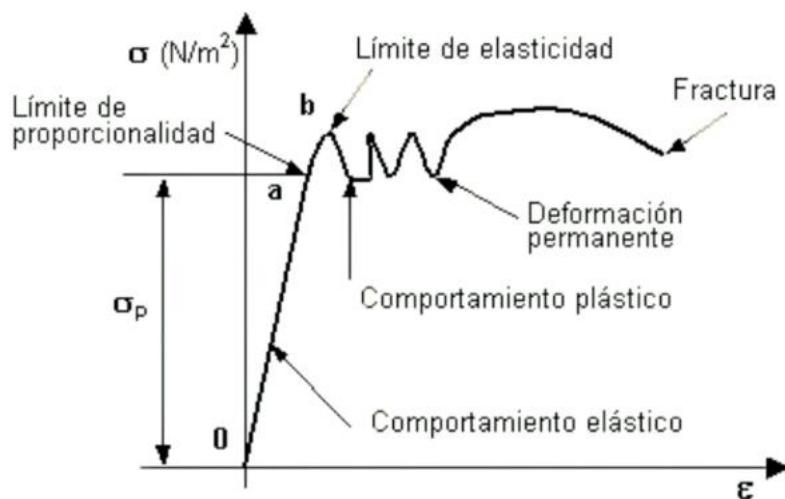


Figura 11. Representación gráfica de la relación entre tensión y deformación

## Capítulo 3. Materiales y métodos

### 3.1 Materiales utilizados

Previamente, antes de realizar los análisis, se va a proceder a explicar de forma detallada los componentes que se emplearán en el proceso experimental.

- Pajitas:

Consiste en una pajita de papel que supondremos que presenta características isotrópicas, lo que significa que tiene propiedades físicas y mecánicas que son iguales en todas las direcciones, como pueden ser la densidad o la resistencia. Presentará una forma cilíndrica hueca, cuyas dimensiones serán 229 mm de largo, 7,8 mm de diámetros exterior y 6,8 mm de diámetro interior, teniendo sus paredes un ancho de 0,5 mm. Presentará una superficie exterior lisa, sin mayores imperfecciones que las resultantes del propio conformado de la misma. Estas pajitas están constituidas por papel reciclado o de pulpa de madera, más comúnmente conocida como fibra de celulosa, la cual, siendo procesada y moldeada mediante agua, presión y calor, permite formar un material sólido, resistente y biodegradable denominado celulosa moldeada o celulosa compactada. Algunas de estas pajitas llevan un recubrimiento, normalmente de algún tipo de polímero, pero en nuestro caso se optó por pajitas sin recubrimiento, apostando así por una opción biodegradable y respetuosa con el medioambiente. A continuación, en la **Tabla 1**, se mostrarán algunas de las características físicas y mecánicas de la celulosa moldeada, las cuales variarán dependiendo de la formulación y espesor:

Propiedad	Valor
Densidad	1,2 - 1,5 g/cm <sup>3</sup>
Biodegradación completa	60-90 días
Coeficiente de Poisson	0,2 y 0,5
Resistencia a la tracción	10 a 30 MPa

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas de la celulosa

En el caso del módulo de elasticidad, no se dispone de un valor estándar debido a las diferencias en la fuente de las fibras, los aditivos utilizados y las condiciones de procesamiento, por lo que trataremos de calcularlo experimentalmente con los ensayos descritos más adelante en el trabajo fin de grado.

- Tabla de plástico: será empleada como base para construir el tablón de ensayos.

Actúa como superficie base para la disposición y fijación de los elementos estructurales durante los experimentos, presentando la suficiente rigidez y estabilidad para ofrecer una plataforma plana y resistente. Sobre ella se situarán tanto los elementos de medida como los de sujeción utilizados para realizar los ensayos que se describirán más adelante.

- Uniones: Las uniones necesarias para el desarrollo de este trabajo fin de grado se materializarán por medio de impresión 3D, la cual emplea el material Sicnova PLA Natural. Este, está compuesto principalmente por PLA (ácido poliláctico), un poliéster termoplástico derivado de recursos renovables. Con

el objetivo llevar a cabo los diferentes ensayos y de conformar estructuras más complejas a partir de múltiples pajitas de papel, se han diseñado uniones personalizadas mediante software de modelado 3D. Estas uniones permiten conectar varias pajitas entre sí en configuraciones específicas, asegurando una alineación precisa y una distribución homogénea de los esfuerzos durante los ensayos mecánicos. De esta manera, se garantiza una conexión rígida y repetible, sin necesidad de usar adhesivos pudiendo montar y desmontar la unión repetidas veces ahorrando así material y facilitando tanto el montaje del conjunto como la reproducción de los ensayos bajo condiciones controladas.

Finalmente, tras múltiples pruebas y ajustes para garantizar que el funcionamiento de las uniones era el adecuado y las pajitas quedaban completamente solidarias, se optó por un diseño de las uniones en forma de tronco de cono, presentando a lo largo del mismo una rosca de diseño propio con paso de 3 milímetros y una altura de 2,4 milímetros.

Es importante tener en cuenta que se han diseñado varios tipos de uniones, cada una con una función específica en los ensayos que se realizarán. Se distinguen, tanto uniones simples, refiriéndonos a estas como las uniones que servirán para conectar pajitas de forma longitudinal; como uniones en 90 grados, las cuales unirán pajitas formando el ángulo ya mencionado y que nos servirán para las esquinas, también las uniones que conecten las pajitas con los tetones de la tabla de ensayos y las uniones propias del ensayo de tracción, las cuales tendrán un diseño que permitirá unir las pajitas a célula de carga para la consecución de este ensayo. A continuación, en las **Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 y 20**, se muestran imágenes de los diferentes tipos de uniones, pudiendo observar claramente la diferencia entre ellas

- Uniones simples



Figura 12. Prototipo 3D real de la unión simple

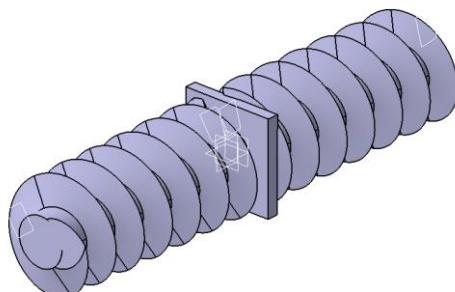


Figura 13. Prototipo 3D Catia V5 de la unión simple

– Uniones de 90 grados



Figura 14. Prototipo 3D real de la unión de 90º

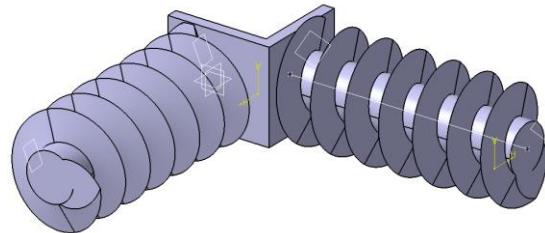


Figura 15. Prototipo 3D Catia V5 de la unión de 90º

– Uniones pajita-tabla de ensayos



Figura 16. Prototipo 3D real de la unión pajita-tabla

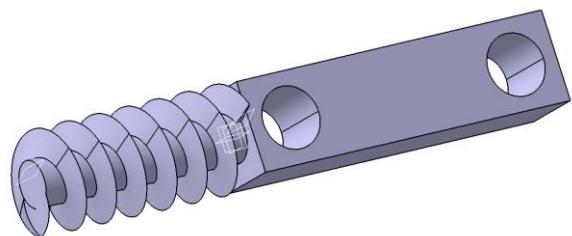


Figura 17. Prototipo 3D Catia V5 de la unión pajita-tabla

– Uniones ensayo de tracción



Figura 18. Prototipo 3D real de la unión para tracción



Figura 19. Prototipo 3D real de la unión para tracción

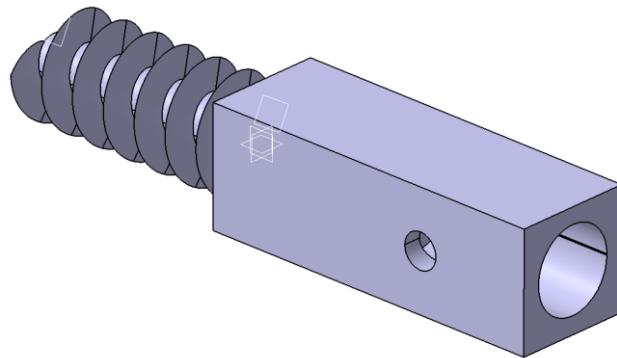


Figura 20. Prototipo 3D Catia V5 de la unión para tracción

- Tetones: Para garantizar una fijación eficaz entre las pajitas de papel y el tablero de ensayos, se han incorporado tetones como elementos de unión mecánica. Estos tetones actúan como salientes cilíndricos que se introducen a presión en las uniones de las pajitas, permitiendo su anclaje firme al soporte sin necesidad de adhesivos. Su diseño asegura una transmisión estable de cargas entre el elemento estructural (la pajita) y la base de pruebas, minimizando posibles desplazamientos no deseados durante los ensayos del pórtico. Además, su utilización facilita el montaje y desmontaje rápido de las muestras, optimizando los tiempos de ensayo y preservando la integridad de los componentes, cuyo aspecto se observa en la **Figura 21**.



Figura 21. Tetones que se emplearán en los ensayos del pórtico [6]

### 3.2 Instrumentación

Para la realización de los ensayos, se emplearán una serie de dispositivos que nos ayudarán a tomar y registrar los diferentes datos para obtener los resultados buscados.

- **Dispositivo laser:** es el equipo empleado para medir la diferencia de desplazamiento que sufre la pajita a lo largo de los ensayos, permitiéndonos

obtener la flecha. Será crucial situarlo en el punto medio de la pajita para obtener los resultados de forma correcta.



Figura 22. Dispositivo láser

Algunas de sus características más importantes son:

1. Alta resolución: 8 µm.
2. Función del zoom-Linealidad: 0,1% (modo-resolución).
3. Tiempo de reacción: < 660 µs (modo de velocidad).
4. Capacidad se de medición con reflejos, brillo o colores muy saturados.

El láser deberá estar a  $12 \pm 6$  cm en eje z (eje vertical) del punto de medición para asegurar su precisión.

- **Célula de carga:** es el instrumento empleado para medir la fuerza aplicada sobre la pajita en cada instante de tiempo. Esto se logra mediante un sensor que mide la fuerza o peso aplicada, convirtiéndolos en una señal eléctrica. Funciona mediante la deformación de un material cuando se aplica una carga, lo que cambia su resistencia eléctrica. Este cambio es detectado por galgas extensométricas dentro de la célula, que transforman la deformación en una señal proporcional al peso aplicado.



Figura 23. Célula de carga

- **Tarjeta de adquisición de datos:** se emplea para trasladar la información recogida por el dispositivo láser a un ordenador en el cual poder registrarla y procesarla por medio de softwares adecuados para el procesamiento de datos. La tarjeta utilizada es SIRIUS HD-SGT.



Figuras 24 y 25. Tarjeta de adquisición de datos

Este equipo está compuesto por varios puertos como:

1. Salida tipo USB para conexión en ordenador.
2. 16 entradas tipo D-USB para conectar sensores.
3. Salida de alimentación para conectar el láser.
4. Entrada de alimentación de corriente eléctrica.

- **Impresora 3D:** este será el instrumento utilizado para materializar los diseños de las uniones diseñados en CATIA V5 en piezas físicas. El laboratorio está dotado de dos impresoras 3D:
  1. Creality Ender-3 Pro
  2. Ultimaker S3: es una impresora 3D de última generación diseñada para la fabricación de prototipos, piezas funcionales y productos personalizados con alta precisión y calidad. Permite crear piezas con gran precisión dimensional y excelentes acabados superficiales, gracias a su sistema de extrusión de doble boquilla (Doble Extrusor), que permite combinar diferentes materiales o utilizar material de soporte soluble.

Debido a la gran precisión necesaria para el conformado de las uniones, será esta última la que se empleó en este trabajo fin de grado, cuya apariencia se observa en la **Figura 26**.

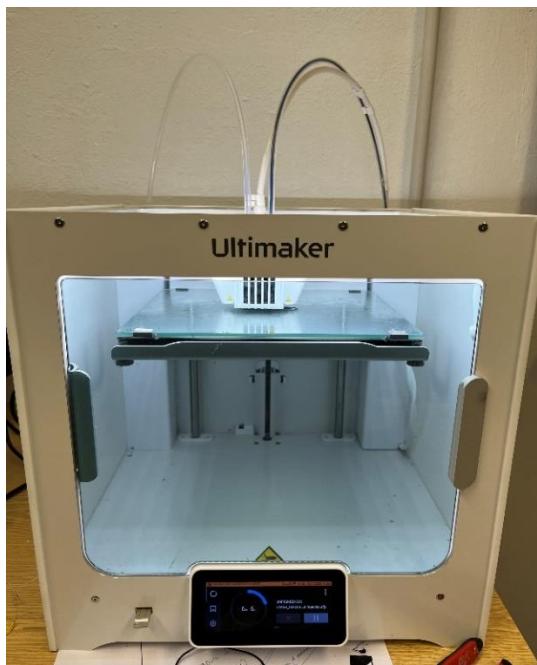


Figura 26. Impresora 3D Ultimaker S3

- **Software para el procesado de datos:** En el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado se ha empleado el software DEWESoftX2, versión SP10, como herramienta principal para el adquisición, visualización y procesamiento inicial de datos experimentales derivados de los ensayos mecánicos realizados.

DEWESoftX2 es un entorno especializado en la captura y análisis de señales provenientes de sistemas de adquisición de datos (DAQ), especialmente diseñado para aplicaciones en el ámbito de la ingeniería, tales como análisis estructural, dinámica, vibraciones o pruebas de materiales. Su empleo ha permitido una gestión eficiente y precisa de los datos obtenidos mediante sensores de fuerza y desplazamiento integrados en el banco de ensayo.

Durante la ejecución de los ensayos, el software permitió la sincronización y monitorización en tiempo real de múltiples canales de medida, facilitando el seguimiento del comportamiento del material en estudio bajo diferentes condiciones de carga. Una vez finalizada la adquisición, los datos brutos fueron tratados mediante las herramientas internas de DEWEsoftX2 para su preprocesado, incluyendo funciones muy interesantes como pueden ser filtrado de ruido y suavizado de la señal, corrección de offset y alineación temporal, conversión de unidades según las necesidades del análisis, exportación de los datos a formatos compatibles con otros entornos de análisis, como Excel (.xlsx) o CSV (.csv). Este tratamiento previo fue fundamental para garantizar la calidad, precisión y coherencia de los datos antes de su representación gráfica y análisis numérico posterior. La combinación de DEWEsoftX2 con otros entornos de análisis (como Microsoft Excel) ha permitido abordar el estudio de forma robusta, estructurada y profesional, alineándose con los estándares actuales en ensayos mecánicos y análisis de materiales.

- **Software empleado para imprimir:** para imprimir las piezas que previamente se diseñaron en CATIA V5, se empleó el software “UltiMaker Cura 5.9.1”. Este, es un software de código abierto utilizado principalmente para preparar modelos 3D y convertirlos en instrucciones que una impresora 3D pueda interpretar. Este proceso se conoce como “laminado o slicing”. El programa permite importar archivos 3D en formatos como STL, configurarlos según las necesidades del usuario y generar un archivo final de tipo G-code, que es el que contiene las instrucciones precisas para la impresión.

Entre sus principales características se destacan las herramientas para configurar parámetros de impresión como la altura de capa, la velocidad, la temperatura del extrusor, el porcentaje de relleno, la generación de soportes y muchos otros aspectos que afectan directamente la calidad del objeto impreso.

Para la utilización del software se ajustaron varios parámetros del mismo, como son el grosor de las paredes, la velocidad de impresión o la creación de soportes para que la pieza se imprima de forma adecuada. También deberemos seleccionar la impresora 3D que vamos a utilizar para imprimir dichas piezas. Una vez ajustados los parámetros lo único que debemos hacer es seleccionar el archivo, en extensión “stl”, que queremos imprimir, hacer click derecho en la opción “slice” y finalmente hacer click derecho en la opción “print via cloud” para pasarle el archivo a la impresora y que materialice dicha pieza.

Cabe destacar la opción “preview”, en la cual el software nos muestra la pieza a imprimir visualizando también el soporte que se genera para que se imprima de manera adecuada.

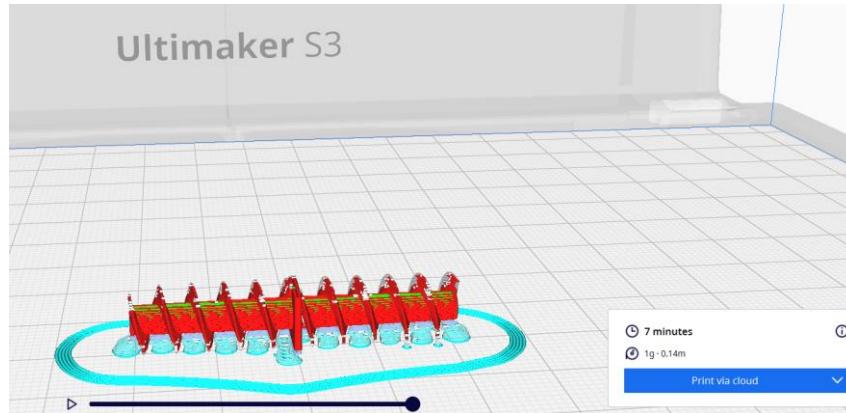


Figura 27. Captura de pantalla del programa UltiMaker Cura 5.9.1

- Excel:** En el presente Trabajo Fin de Grado, se ha empleado Microsoft Excel como herramienta de apoyo para el tratamiento y análisis de datos experimentales obtenidos durante los ensayos de caracterización mecánica. Concretamente, Excel ha sido utilizado para representar la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento registrado, parámetros fundamentales en el estudio del comportamiento mecánico del material analizado. Para ello, se procedió a la introducción ordenada de los datos experimentales en una hoja de cálculo, estableciendo dos columnas correspondientes a las variables independientes (desplazamiento) y dependientes (fuerza). A partir de estos datos, Excel nos permitió generar un gráfico de dispersión (XY) que permitió visualizar de forma clara la tendencia general del material ante cargas crecientes y además generar una recta de regresión de la cual podremos obtener la pendiente, así como el coeficiente de determinación. Todo lo mencionado se mostrará con mucha más profundidad en los apartados de descripción de los ensayos presentes en este trabajo fin de grado.
- Programa de análisis:** se ha seleccionado el software SAP2000 por su capacidad para modelar estructuras con geometrías simples o complejas y su precisión en el análisis mediante elementos finitos. La facilidad para representar materiales no convencionales y aplicar diferentes tipos de carga lo convierte en una herramienta adecuada para este proyecto.
- Software empleado para el diseño de las uniones:** para el modelado de las uniones que proveerán de un anclaje sólido y correcto de las pajitas entre sí, pero optó por utilizar el software “CATIA V5”, siendo este una herramienta de diseño asistido por computadora (CAD) muy utilizada en ingeniería y diseño industrial. Su principal función es permitir el diseño en 3D de piezas, productos y sistemas completos, abarcando desde la etapa de diseño conceptual hasta el análisis y la fabricación. CATIA V5 se utiliza para crear modelos sólidos, superficies, ensamblajes, generar los planos técnicos necesarios para la producción y otras tantas funciones que no serán necesitadas para la elaboración de este TFG.

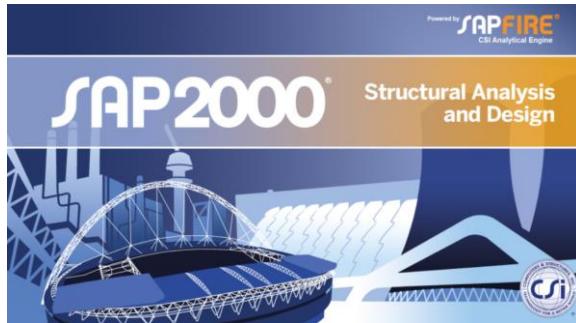


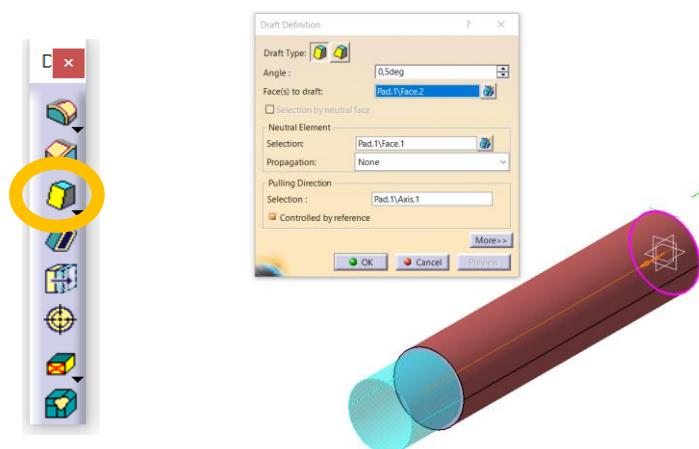
Figura 28. Pantalla de inicio del software SAP2000

### 3.3 Modelado de las uniones

Durante el modelado de las piezas se tuvieron que afrontar múltiples desafíos, debido a que el tipo de unión para el empalme de las pajitas requería de un diseño bastante complejo. El principal obstáculo con el que nos encontramos fue el diseñado de las roscas de las uniones. El software utilizado sí que presenta una herramienta para el modelado de roscas, sin embargo, esta herramienta solo permite diseñar roscas normalizadas y además, no las visualiza sobre el modelo que se está diseñando. Como la impresora 3D solo imprime los elementos que se visualizan, este método para el diseño de la rosca no nos servía, por lo que se optó por el diseño de la rosca de forma manual mediante el módulo de superficies, sobre el cual no se tenían conocimientos de su utilización antes de la realización de este TFG. El módulo de superficies de CATIA V5, conocido como “Generative Shape Design (GSD)”, se utiliza para crear y modelar superficies complejas y de alta calidad que no se pueden lograr solo con el modelado sólido básico. Este módulo permite diseñar superficies libres y detalladas, como curvas, contornos aerodinámicos; así como hélices, las cuales son muy útiles para el modelado de roscas no normalizadas.

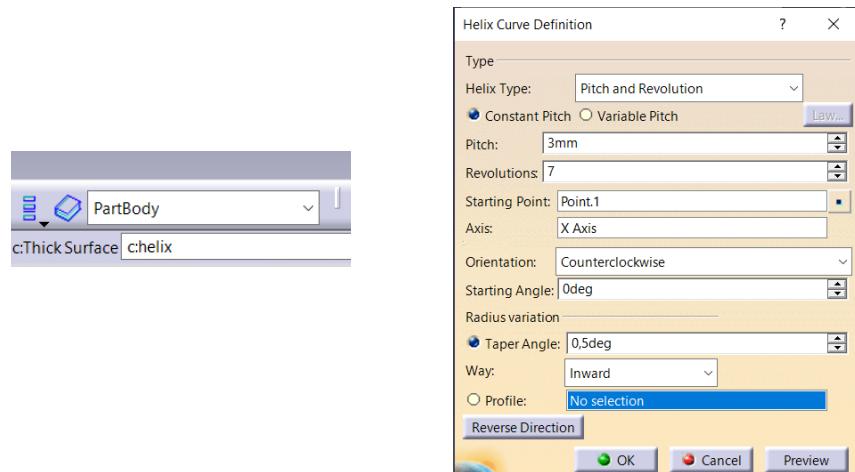
A continuación, se describirán de forma resumida los pasos que se realizaron para el diseño de las roscas anteriormente mencionadas.

Lo primero que se realizó fue un cilindro de radio 2,25 mm y de longitud 20 mm, al que mediante el uso de la herramienta “Draft Angle” se le transformó en un tronco de cono, empleando como se muestra a continuación un ángulo de 0,5°, como se puede observar en las **Figuras 29 y 30**.



Figuras 29 y 30. Creación del tronco de cono con “Draft Angle”

A partir de aquí comenzaremos a hacer uso del módulo de superficies para el diseño de la rosca. En el cuadro de comandos introduciremos de forma manual el comando “c:helix”, el cual nos permite la creación de una hélice tridimensional o curva helicoidal, pudiendo definir parámetros específicos de la hélice, como el paso o el número de revoluciones. Al seleccionar este comando se desplegará el cuadro de instrucciones que se muestra a continuación. En él deberemos indicar el paso de la hélice, el número de revoluciones, el punto de inicio de la hélice y el eje a lo largo del cual se extenderá dicha hélice. También deberemos introducir un “taper angle” de valor igual al introducido a la hora de crear el tronco de cono para garantizar que la hélice aumenta de igual forma que la superficie sobre la que se encuentra. Como se puede observar en la siguiente imagen, se seleccionó un valor de 3 mm paso, presentando la rosca 7 revoluciones a lo largo del tronco de cono y un ángulo de inclinación o “taper angle” igual que el del tronco de cono, es decir, de 0,5°, como se aprecia en las **Figuras 31 y 32**.



Figuras 31 y 32. Empleo del módulo de superficies

Para acabar de construir la hélice, deberemos crear el perfil que deseamos que tenga la misma. En este caso se optó por un perfil de forma triangular de 2,4 mm de alto, como se muestra en la **Figura 33**.

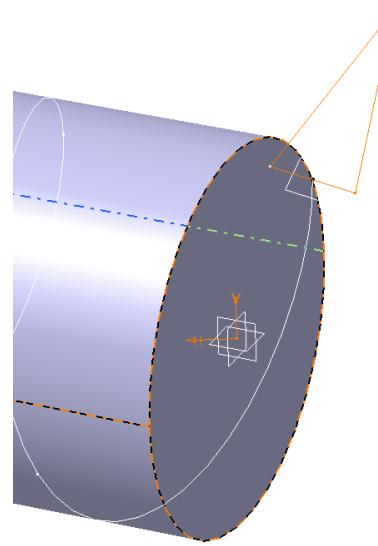
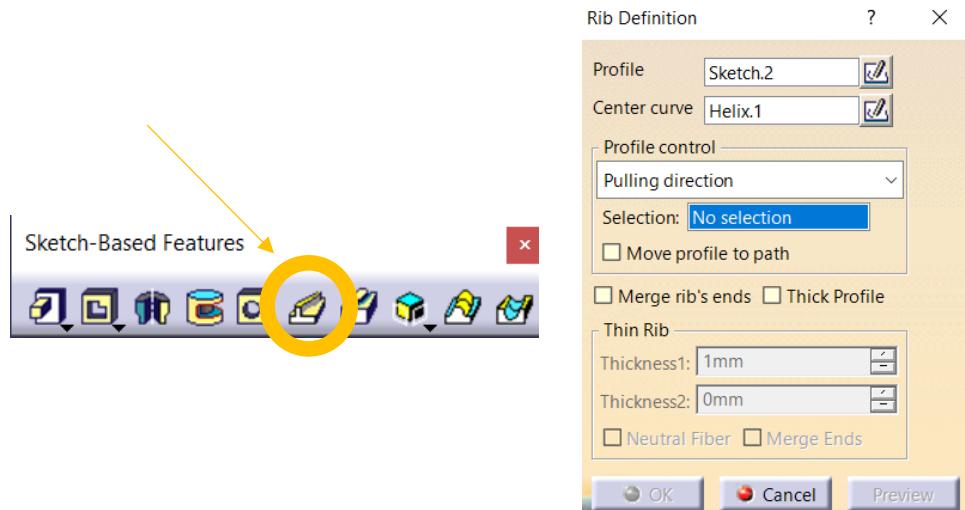


Figura 33. Diseño del perfil de la rosca

Como paso final, usaremos la herramienta “rib” para que se visualice la hélice y pase a formar parte de nuestro sólido, siendo importante seleccionar la opción “Pulling direction” para que la hélice se genere de forma correcta, como se ve en las **Figuras 34 y 35**.



Figuras 34 y 35. Empleo de la herramienta “rib”

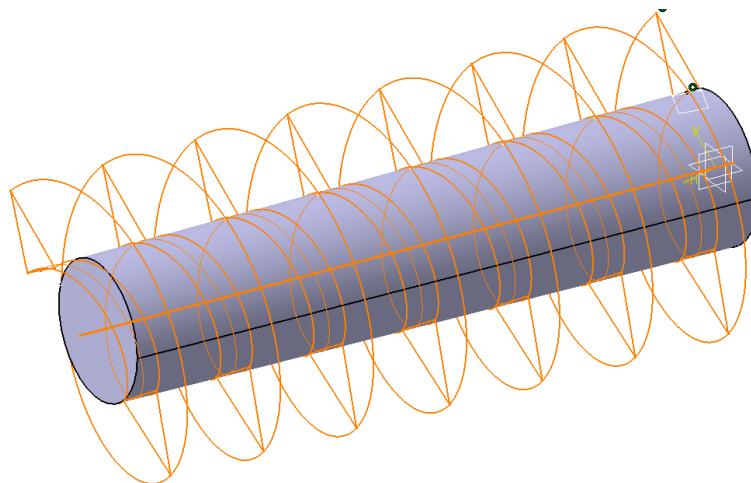


Figura 36. Prevista de la rosca modelada

Obteniendo así la hélice, mostrada en la **Figura 36**, que actuará como rosca en nuestra unión, mejorando de manera considerable la resistencia a esfuerzos de tracción de la unión con las pajitas.

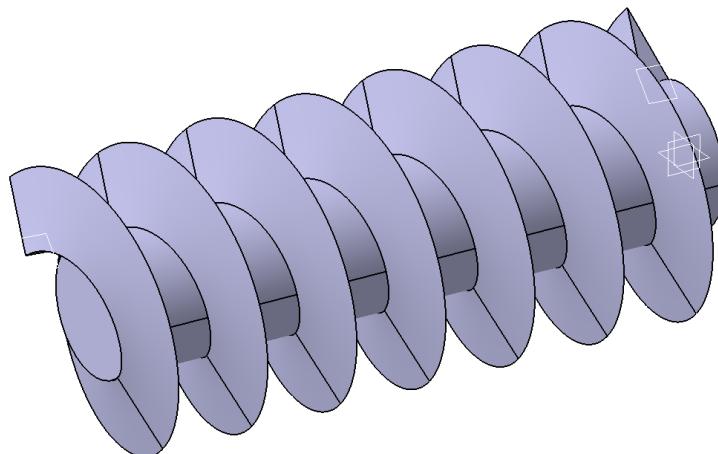


Figura 37. Aspecto final de la rosca

Quedando finalmente unas uniones de forma tronco cónica, cuya apariencia se observa en la **Figura 37**, para que así la unión vaya entrando de forma progresiva en la pajita y la rosca ejerza resistencia, quedando lo suficientemente apretada para resistir posibles efectos a tracción.

### 3.4 Colocación y disposición de los equipos

Una vez se ha citado los diferentes instrumentos necesarios para la realización de los ensayos, se va a comentar a continuación la colocación de estos, sobre la tabla de plástico, en los estudios a realizar.

Lo primero que se realizó, fue marcar las posiciones que iban a ocupar los elementos sobre el tablón de madera habiendo calculado previamente las distancias entre ellos. La distancia entre los tornillos que actuarán como apoyos fijos permitiéndonos aproximar la pajita a una viga biapoyada será de 15 cm y sirviendo de soporte para la pajita a la hora de someterla a los esfuerzos propios del estudio.

Seguidamente, se procedió a realizar el anclaje del láser mediante dos tornillos de forma que quedase perfectamente sujeto al tablón de madera y no pudieran darse errores en las mediciones por el posible movimiento del láser, situando este a una distancia de 12 cm de la probeta. Deberemos tener en cuenta que el láser tiene un margen de medida de  $\pm 6$  cm.

Finalmente, se procedió a situar la célula y el elemento que servirá para arrastrar la pajita, ambos unidos mediante un alambre de acero al que se le realizaron dos dobleces, una en cada extremo, para introducirlos en dos agujeros situados en la célula y en el elemento de arrastre. En este paso fue muy importante situar de forma correcta los elementos de forma que el láser incidiera de forma directa en el medio de la pajita para que las mediciones se obtuvieran de forma correcta y sin errores.

## Capítulo 4. Ensayos y resultados

El objetivo de este capítulo es explicar el proceso experimental que se ha realizado para los distintos ensayos realizados, los métodos de análisis utilizados, así como los resultados obtenidos y su compresión.

El proceso experimental ha contado con varias etapas, comenzando con los experimentos realizados para la caracterización del material y seguidos por los ensayos para el estudio de la resistencia del pórtico construido mediante las pajitas y sus respectivas uniones.

### 4.1 Proceso experimental para la caracterización del material

En esta sección se describirán los pasos y ensayos realizados para obtener las características mecánicas de las pajitas que se utilizarán más adelante en los ensayos de resistencia estructural.

En concreto, se han diseñado y ejecutado ensayos de tracción, compresión y flexión; con y sin las uniones, ya que estas son las principales solicitudes a las que estará sometido el material en las condiciones de servicio previstas. Cada uno de estos ensayos permite simular y analizar distintos modos de fallo y mecanismos de deformación, contribuyendo a una caracterización completa del comportamiento estructural de las pajitas de papel utilizadas. La metodología experimental ha sido adaptada a las características geométricas del material, garantizando la repetibilidad y fiabilidad de los resultados obtenidos.

#### Objetivos del ensayo

La realización de estos ensayos busca objetivos claros:

- a) Determinar las propiedades mecánicas fundamentales del material, obteniendo parámetros como el módulo de elasticidad ( $E$ ) tanto de las pajitas como de las uniones.
- b) Analizar el comportamiento estructural del material bajo distintas condiciones de carga identificando posibles modos de fallo.
- c) Verificar la viabilidad del uso de materiales respetuosos con el medioambiente en aplicaciones estructurales ligeras.
- d) Validar el modelo de barra biapoyada mediante la comparación con resultados experimentales.
- e) Determinar cómo varía la respuesta al introducir las uniones y cómo afecta a las propiedades.

#### 4.1.1 Realización del ensayo a flexión sin el empleo de uniones.

Como ya se había mencionado, se va a realizar un ensayo sometiendo, solamente a la pajita, a un esfuerzo de flexión buscando medir el desplazamiento que experimentará el punto central de la misma en respuesta libre, en función de la carga aplicada.

Tanto este ensayo como el ensayo de flexión con uniones se realizaron de forma experimental en el laboratorio y también de forma digital mediante el software SAP2000.

### Realización de forma experimental en el laboratorio

En la **Figura 38**, se observa la colocación de la pajita, sin cargar, sobre la tabla de ensayos para realizar el ensayo de flexión.

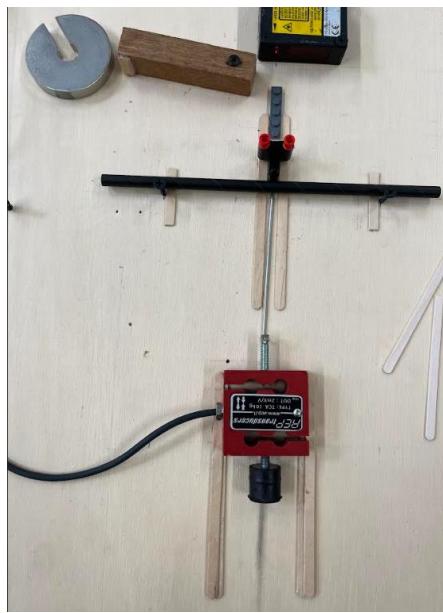


Figura 38. Situación inicial del ensayo sin carga.

Como ya se mencionó anteriormente, para la toma de datos en los ensayos se empleó el software DEWEsoftX2, versión SP10, cuyo manejo es bastante sencillo e intuitivo. A continuación, se van a mostrar los pasos para la utilización del programa.

Lo primero que deberemos hacer tras arrancar el programa será hacer clic en la opción de “Setup” y seguidamente en “Analog in” para configurar los canales de los instrumentos que vayamos a emplear en los ensayos. Seleccionaremos el canal 1 para la célula de carga roja de 10 kg que medirá la fuerza y el canal 2 para el láser negro 3 que medirá el desplazamiento, siendo muy importante seleccionar bien qué célula y láser de los disponibles son los que vamos a utilizar, ya que dependiendo de cuales se utilicen los resultados variarán significantemente.

También en este menú seleccionaremos una frecuencia de muestreo de 100 Hz, como se indica en la **Figura 39**.

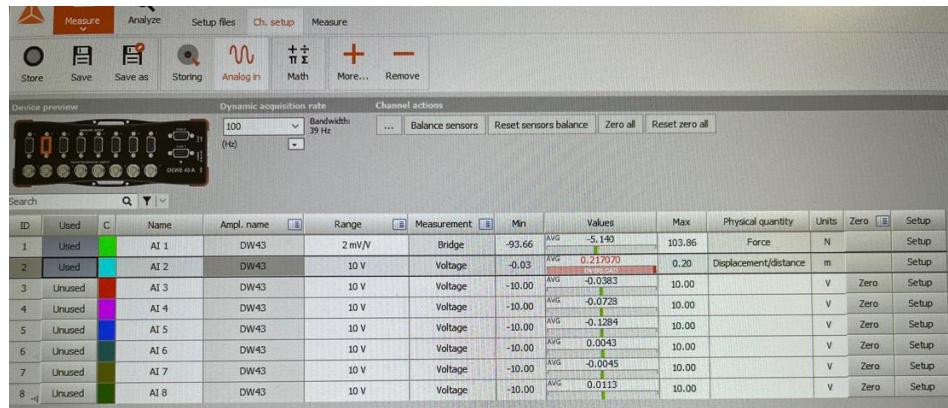


Figura 39. Configuración de los canales de los instrumentos.

Tras ello, ya tendremos el software preparado para medir, por lo que haremos clic en “Measure”, apareciendo las gráficas donde el programa irá representando los valores de la fuerza (gráfica de arriba color verde) y desplazamiento (gráfica de abajo en color azul), mostrado en la **Figura 40**.

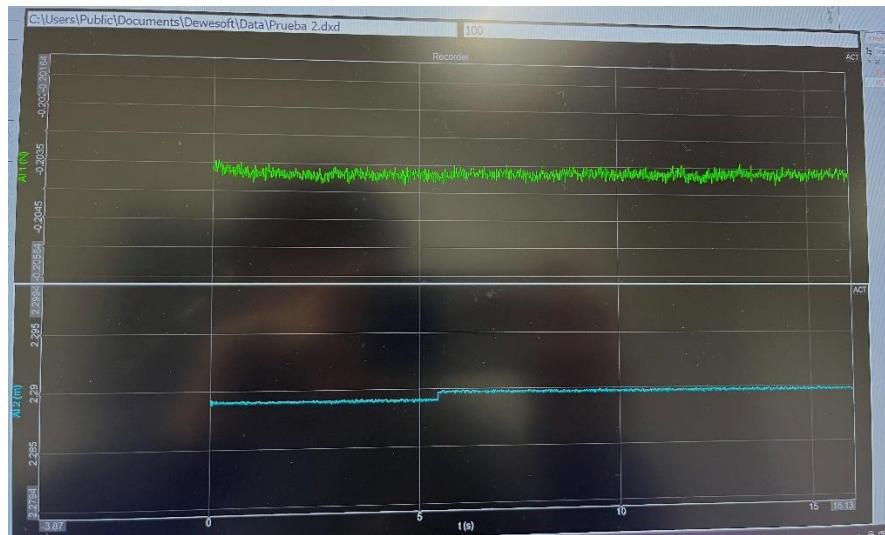


Figura 40. Gráficas de los valores de fuerza y desplazamiento.

También deberemos seleccionar la opción de “Auto scale” del eje Y para ajustar automáticamente el rango de visualización de dicho eje en función de los valores que se están registrando o representando en tiempo real, indicado en la **Figura 41**.

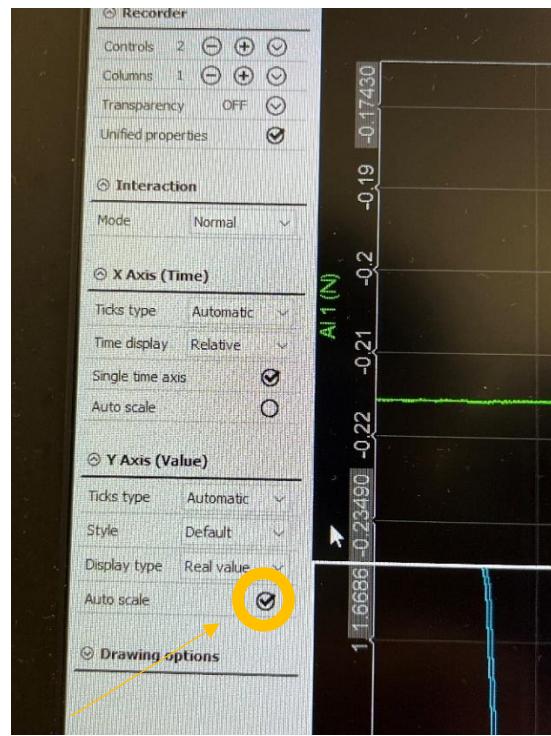


Figura 41. Selección de la opción “Auto scale”

Para comenzar a registrar los resultados lo único que deberemos hacer será hacer clic en “Measure” y cuando bajo nuestro punto de vista ya se hayan realizado los ensayos suficientes, haremos clic en “Stop”.

La realización de los ensayos de flexión consistirá en ir aplicando cargas crecientes de forma manual sobre la célula de carga, de manera que cada vez que se cargue y se descargue se habrá realizado un ensayo. Deberemos realizar varios ensayos para así garantizar que haya suficiente variabilidad y poder descartar errores de precisión, logrando así validez estadística. Según se vayan realizando los ensayos el software irá registrando los valores y generando unas gráficas que se mostrarán por pantalla, en las cuales se podrán diferenciar de forma clara cada uno de los ensayos, como se ve en la **Figura 42**.

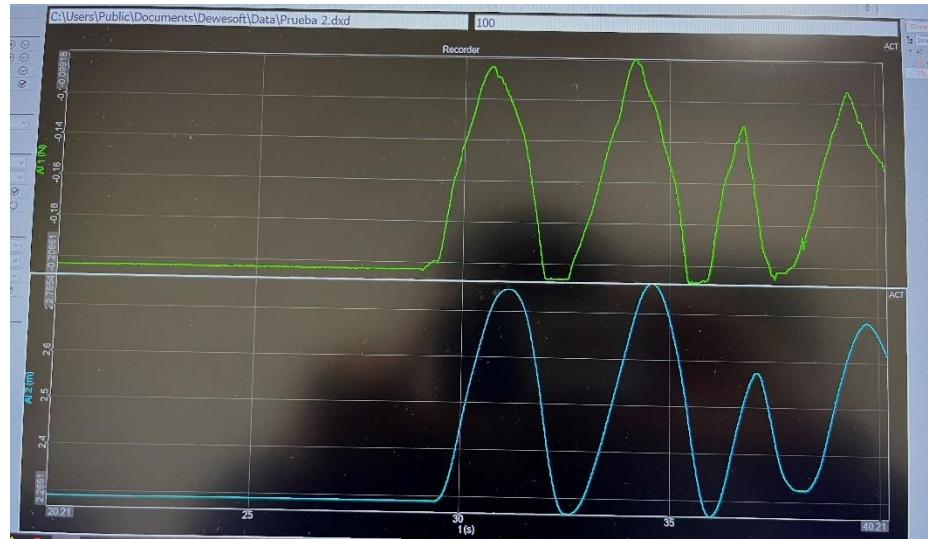


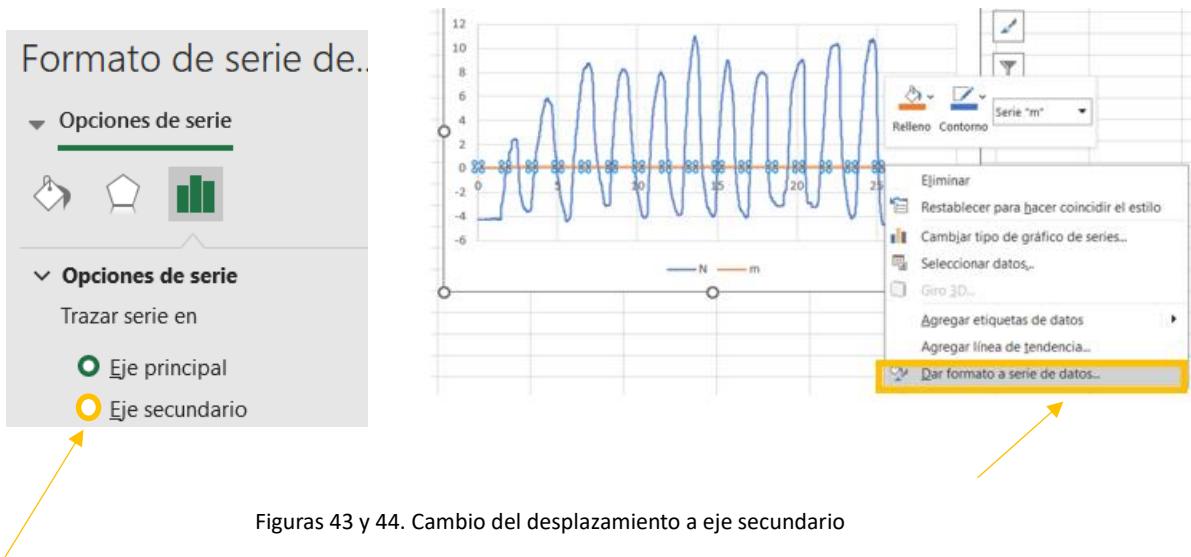
Figura 42. Gráficas de fuerza y desplazamiento tras el registro de datos.

El software de adquisición de datos recibe diferentes valores del desplazamiento vertical a través del láser, tomándolos a lo largo del periodo en el que se esté realizando el ensayo. A lo largo del mismo se van a diferenciar dos zonas de forma muy clara, el periodo de carga en el cual, partiendo desde la situación de carga nula, se va aumentando de forma gradual la carga hasta que se alcance su máximo y la descarga, en el que tras la carga máxima se empieza a reducir la carga hasta que se alcance el valor de carga nula de nuevo. La pajita volverá, o no, a su estado inicial tras la aplicación de la carga dependiendo de si se ha superado el límite elástico del material. En el caso de que vuelva a su estado original, no se habrá superado el límite elástico y la deformación que aparece será elástica. En caso de que no vuelva a su estado original, se dirá que se ha superado el límite elástico, apareciendo una deformación permanente o también denominada plástica que se manifestará en forma de abolladura sobre la superficie de la pajita.

Para tratar, organizar, procesar y representar de forma clara los datos obtenidos durante la campaña experimental, se ha empleado el software Microsoft Excel como herramienta principal de análisis. Esta herramienta nos ha permitido separar los datos, clasificándolos en diferentes ensayos pudiendo así compararlos y poder sacar conclusiones sobre el material.

Lo primero que hicimos fue exportar los datos obtenidos en el software para el procesado de datos. Para ello, en el software para el procesado de datos haremos clic en “Analise” abriendose otra pestaña llamada “Data files” en la que volveremos a hacer clic y finalmente seleccionaremos la opción para mandar los archivos en formato Excel.

Para introducirlos a Excel, simplemente copiaremos y pegaremos los datos exportados desde el software y los representaremos mediante una gráfica de dispersión. Cambiaremos la gráfica del desplazamiento a eje secundario mediante la opción de Excel llamada “Dar formato a serie de datos”, como se muestra en las **Figuras 43 y 44**, lo que nos permitirá ver su gráfica de forma mucho más clara.



Figuras 43 y 44. Cambio del desplazamiento a eje secundario

Al observar la gráfica que acabamos de representar, se observa claramente que existe un desfase entre los datos medidos por el láser con respecto a los medidos mediante la célula de carga. Esto puede deberse a un error de precisión del láser a la hora de comunicar los datos al software utilizado. Este retardo, según hemos ido realizando ensayos, se ha observado que suele tener un valor comprendido entre 0,2 y 0,3 s y la operación a realizar para eliminarlo es muy sencilla. Bastará con, si en el ensayo realizado el retardo entre los valores de ambos instrumentos vale  $x$  segundos, eliminaremos los  $x$  primeros valores del desplazamiento, ya que los datos se toman cada 0,01 s. En el caso actualmente descrito, el retardo es de en torno a 0,3 s entre los datos medidos por ambos instrumentos.

En las **Figuras 45, 46 y 47**, se muestra con dos líneas rojas el desfase presente entre los picos de ambas señales, así como solucionar esta imperfección y cómo queda la gráfica una vez solucionado.

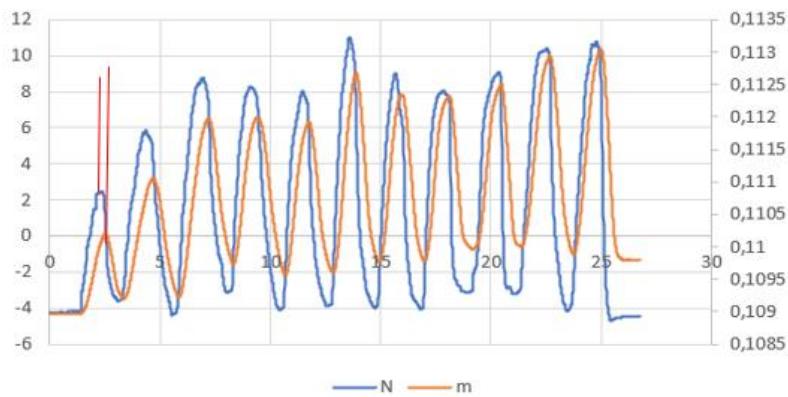
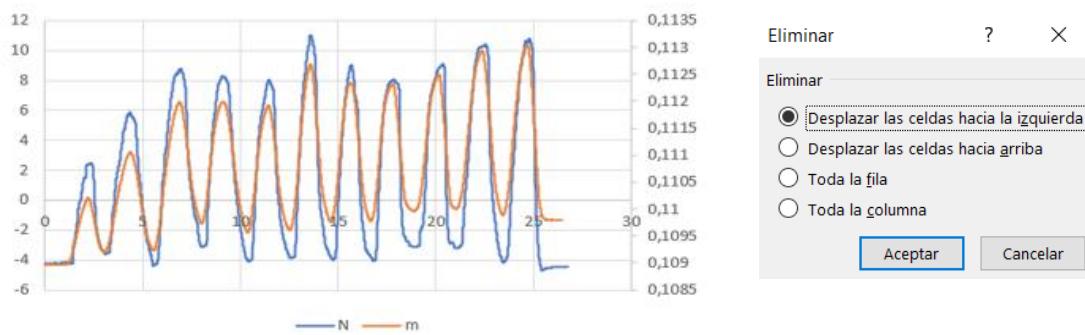


Figura 45. Desfase presente entre los valores de fuerza y desplazamiento.



Figuras 46 y 47. Corrección del desfase entre fuerza y desplazamiento

Observándose claramente como se ha logrado solucionar el desfase anteriormente mencionado.

Lo siguiente que hubo que hacer fue separar los datos en función de a qué ensayo de los realizados pertenecía cada uno, ya que se realizaron múltiples diferentes buscando garantizar que los datos obtenidos no estuvieran condicionados y se obtuvieran resultados similares. Para ello, nos fuimos fijando en los valores de la fuerza; cada vez que se realiza un ensayo la fuerza experimenta el siguiente patrón:

- 1) Comienza a aumentar progresivamente hasta que se alcanza su máximo valor (periodo de carga).
- 2) Tras él, comienza a descender también de forma progresiva hasta que prácticamente se estanca y alcanza su valor mínimo (descarga).
- 3) Alcanzado ese valor mínimo, la fuerza comenzará a aumentar y seguirá el mismo ciclo descrito anteriormente hasta que se detengan los ensayos.

Cada uno de esos períodos descritos de subidas y bajadas consistirá en un ensayo, por lo que se realizó consistió básicamente en lo descrito, buscar los valores mínimos

entre subidas y bajadas y separando los diferentes ensayos, realizando hasta 19 ensayos diferentes.

Una vez tenemos los datos separados en ensayos, deberemos curar los datos de desplazamiento.

El motivo de curar los datos de desplazamiento es debido a que al comienzo de los ensayos el desplazamiento que experimenta la pajita debería ser 0, ya que se encuentra en estado de reposo, sin fuerzas actuando sobre ella, por lo que la deformación experimentada por la misma debería ser nula.

Para ello haremos la siguiente operación en Excel, en una nueva columna restaremos uno por uno, cada uno de los datos contenidos en la columna de los datos de desplazamiento menos el primer valor de la columna de desplazamiento obteniendo así los datos de desplazamiento curados, como se puede observar en la **Figura 48**.

=B24-\$B\$3

	A	B	C	D
1	Time	laser	celula	
2	s	m	N	m curado
3	0	0,10874	-0,32222	=B24-\$B\$3
4	0,01	0,10874	-0,32259	4,54485E-07
5	0,02	0,10874	-0,32392	1,78814E-07
6	0,03	0,10874	-0,32372	2,75671E-07
7	0,04	0,10874	-0,32126	-3,7253E-08
8	0,05	0,10874	-0,32423	3,57628E-07
9	0,06	0,10874	-0,3244	3,57628E-07
10	0,07	0,10874	-0,32668	5,51343E-07

Figura 48. Cura de los datos de desplazamiento.

A partir de los datos de fuerza y desplazamiento curado, se generó un gráfico que permitió visualizar de forma clara la tendencia general del material ante cargas crecientes.

La mejor opción para representar estos datos fue mediante el uso de una gráfica de dispersión dado que permite visualizar de forma precisa la relación entre dos variables continuas, fuerza aplicada y desplazamiento. Este tipo de gráfico facilita la identificación de comportamientos lineales y no lineales y, además, la dispersión de datos posibilita la aplicación de regresiones lineales en la fase elástica, mejorando el ajuste y análisis de propiedades mecánicas. Como se indica a continuación, Excel nos ofrece la posibilidad de representar de forma sencilla estas gráficas, representando este tipo de grafico en todos los ensayos realizados como se muestra en la **Figura 49**.

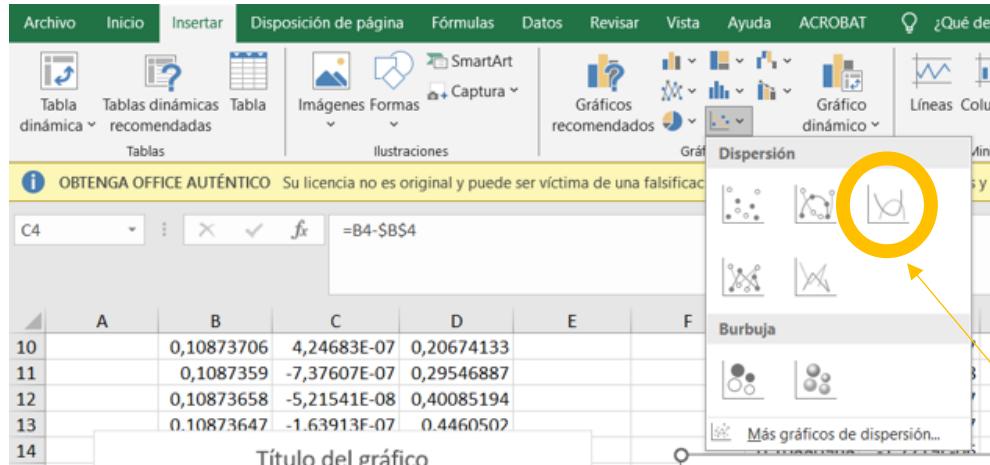


Figura 49. Generación de los gráficos de dispersión.

Posteriormente, sobre dicho gráfico se añadió una línea de tendencia lineal, también conocida como recta de regresión o recta de dispersión, que representa el ajuste matemático más adecuado de los datos. Esta recta se generó empleando la funcionalidad incorporada de Excel para el ajuste lineal, mostrando además en el propio gráfico tanto la ecuación de la recta (de la forma  $y=mx+by = mx + by=mx+b$ ) como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que indica el grado de correlación entre las variables.

La pendiente de la recta obtenida, calculada automáticamente por Excel, proporciona una estimación directa del módulo de rigidez lineal del material dentro del intervalo elástico, lo cual es de gran interés para el análisis mecánico desarrollado en este trabajo.

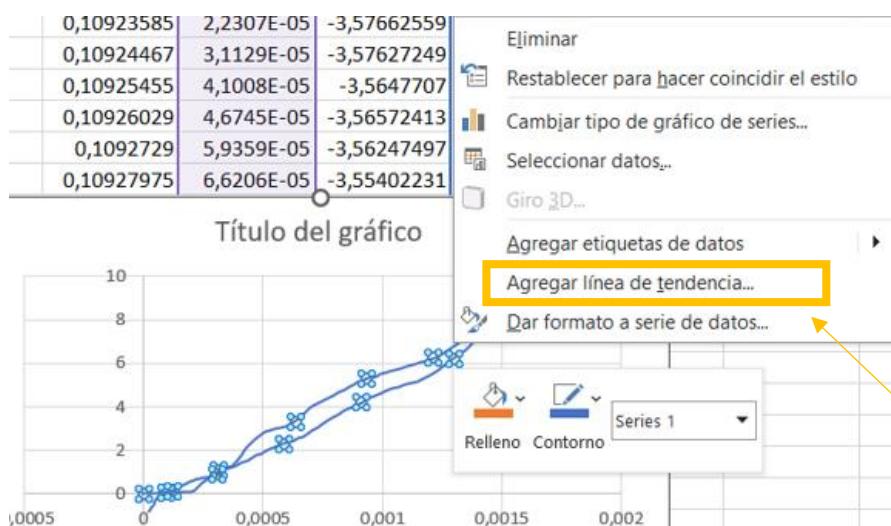


Figura 50. Generación de la línea de tendencia.

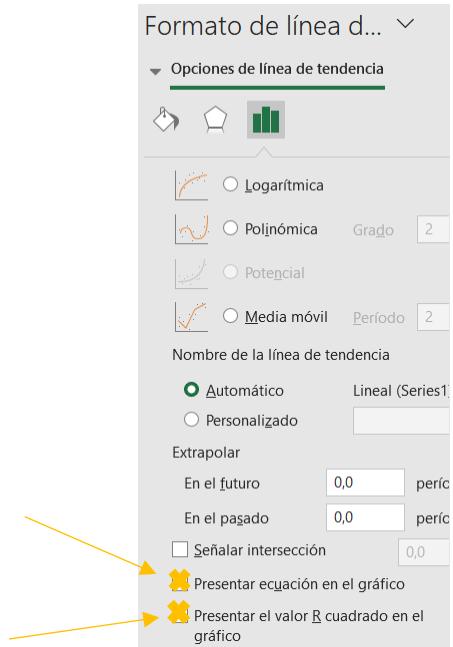


Figura 51. Generación de la ecuación de la recta y el  $R^2$ .

Seguidamente, mediante las gráficas generadas, calcularemos las pendientes de carga y descarga de cada uno de los ensayos realizados. Para ello tomaremos dos puntos a lo largo de la parte de la gráfica correspondiente a la carga, haciendo lo propio con la parte de descarga de la misma y empleando la fórmula mostrada a continuación, podremos calcular las pendientes de carga y descarga de cada uno de los ensayos, como se representa en la Figura 52.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

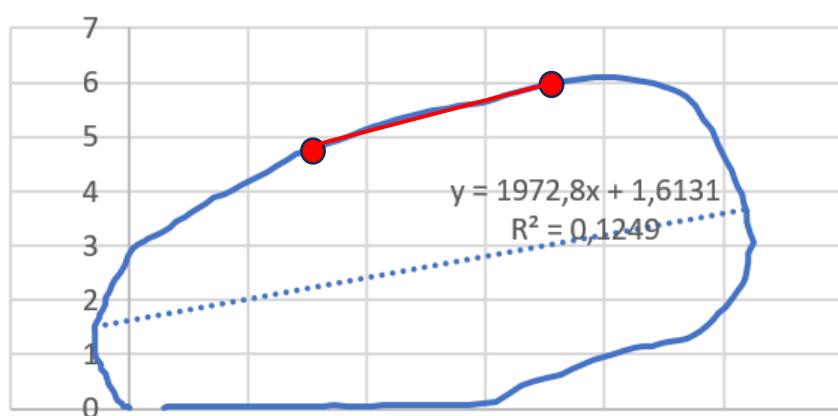


Figura 52. Cálculo de pendientes

Finalmente, una vez realizados todos los ensayos, se elaboró una tabla en la que se muestran parámetros obtenidos durante los mismos, mostrados de forma clara y ordenada en la **Tabla 2**.

ENSAYO	FUERZA MÁXIMA (N)	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO (mm)	PENDIENTE DE CARGA	PENDIENTE DE DESCARGA	MEDIA DE LAS PENDIENTES	PENDIENTE EXPERIMENTAL
1	2,9	0,5233	1906	1992,9	1949,45	1900,4
2	3,423	0,596	1940,04	1715	1827,52	1856,74
3	4,909	0,837	2971,43	1881,08	2426,255	1946,2
4	5,084	0,685	2923,33	2189,02	2556,175	2685,5
5	6,091	1,05	2456,11	2530,94	2493,525	1972,8
6	5,1375	0,896	2786,29	2203,74	2495,015	2147,6
7	6,45	1,243	1859,23	2575,63	2217,43	1949,4
8	7,568	1,685	1392,95	1092,7	1242,825	1079,1
9	7,595	1,6	1838,02	1043,7	1440,86	1482,5
10	7,966	1,94	860,5	658,18	759,34	758,68
11	8,169	2,393	382,35	375,864	379,107	305,26
12	7,4586	2,25	1262,615	1320,705	1291,66	1140,6
13	7,867	2,99	694,57	819,84	757,205	756,5
14	8,1539	3,59	57,23	63,54	60,385	54,529
15	7,543	3,55	417,1	525,8	471,45	487,17
16	7,438	3,4	419,62	465,885	442,753	436,88
17	7,273	4,45	242,96	284	263,48	276,09
18	6,2	3,385	517,57	435	476,285	456,97
19	6,82	4,13	510,4	519,59	515	586,17

Tabla 2. Datos obtenidos del ensayo de flexión sin uniones

Fijándonos en la gráfica del ensayo 14, se observa que se llega a un punto en el que el desplazamiento sigue aumentando, aunque no aumentemos la carga, de hecho, se observa que necesitamos cargas menores a las que necesitábamos para aumentar el desplazamiento, se produce un descenso de la carga necesaria. Esto se debe a que la deformación experimentada por la pajita pasó de ser una deformación elástica que desaparecería después de cada proceso de carga a una deformación plástica permanente que se manifestó en forma de abolladura en la superficie externa de la pajita. La aparición de esta deformación permanente redujo de forma considerable la resistencia a la flexión de la pajita, observando que a partir de este ensayo número 14 en el que se producía la abolladura, los desplazamientos que se producen para fuerzas similares previas a este ensayo han aumentado de forma muy considerable. A continuación, se presentan varias imágenes para mostrar de forma visual lo mencionado anteriormente.

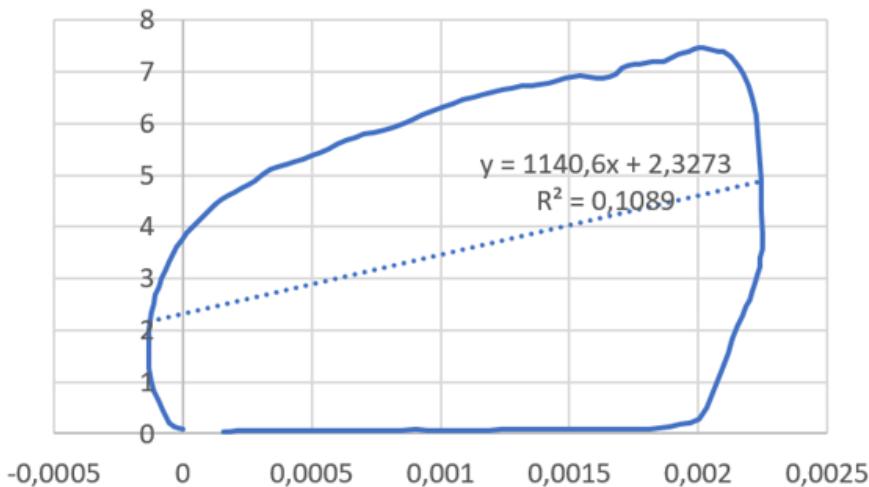


Figura 53. Gráfica del ensayo 12 de flexión sin unión.

En la **Figura 53**, se muestra un ensayo en el que la deformación que experimenta la pajita es elástica, sin producirse abolladura y volviendo a su estado de deformación nula inicial. Se observa como el desplazamiento va aumentando de forma lineal según se va aumentando la fuerza.

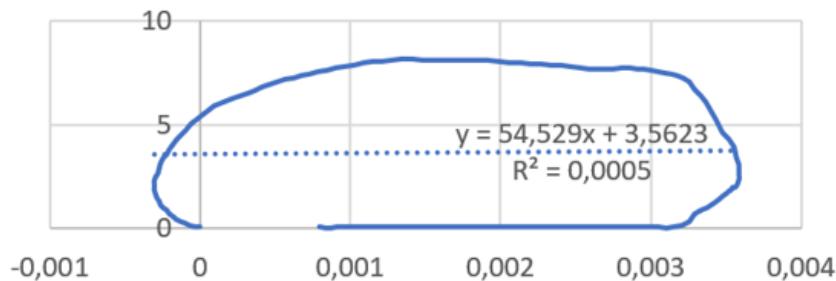


Figura 54. Gráfica del ensayo 14 de flexión sin unión.

En la **Figura 54**, se observa cómo llega un momento del ensayo donde la fuerza necesaria para aumentar el desplazamiento alcanza un máximo y comienza a disminuir, mientras que el desplazamiento sigue aumentando, aunque como hemos dicho la fuerza se disminuya. Esto se debe a que se ha producido una deformación plástica ya que hemos superado el límite elástico del material y la resistencia interna que ofrece la pajita se ha visto reducida significativamente ya que muchas de sus fibras se han roto o reordenado y como resultado, el material cede más fácilmente y, por tanto, se necesita menos fuerza para seguir deformándolo. El ensayo mostrado anteriormente (ensayo 14) es el primero de los ensayos en el que se superó el límite elástico del material y se manifestó deformación permanente.

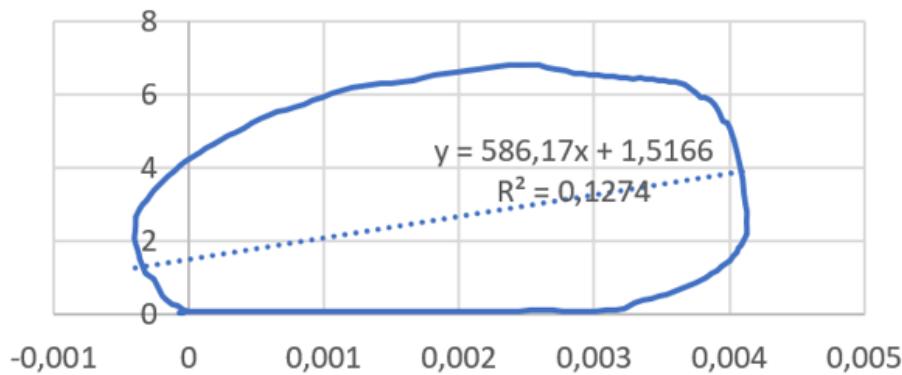


Figura 55. Gráfica del ensayo 19 de flexión sin unión.

Observamos cómo, a partir del ensayo 14 mostrado anteriormente, la fuerza necesaria para lograr desplazamientos elevados se ha visto reducida considerablemente. En la Figura 55, por ejemplo, aplicando una fuerza máxima de 6,82 N (dato obtenido de la tabla) logramos un desplazamiento máximo de 4,13 mm y, además observamos como al final del mismo vuelve a parecer la deformación plástica que se generó en el ensayo 14. En cambio, en el ensayo 11, empleando un valor de fuerza máxima de 8,169 N, únicamente logramos un desplazamiento máximo de valor 2,393 mm.

También se observa que, según se va aumentando la carga las pendientes disminuyen. Al principio de los ensayos usábamos cargas bajas y obteníamos pendientes muy elevadas y según se ha ido aumentado de forma progresiva la carga, la pendiente ha ido disminuyendo, es decir son inversamente proporcionales. Esto puede deberse a una pérdida progresiva de la rigidez del material debido al comienzo de la deformación plástica y a daños internos acumulados.

La pendiente decreciente refleja una respuesta no lineal del sistema y la pérdida de rigidez, típica de materiales en proceso de fallo o de estructuras que se están acercando a su capacidad última.

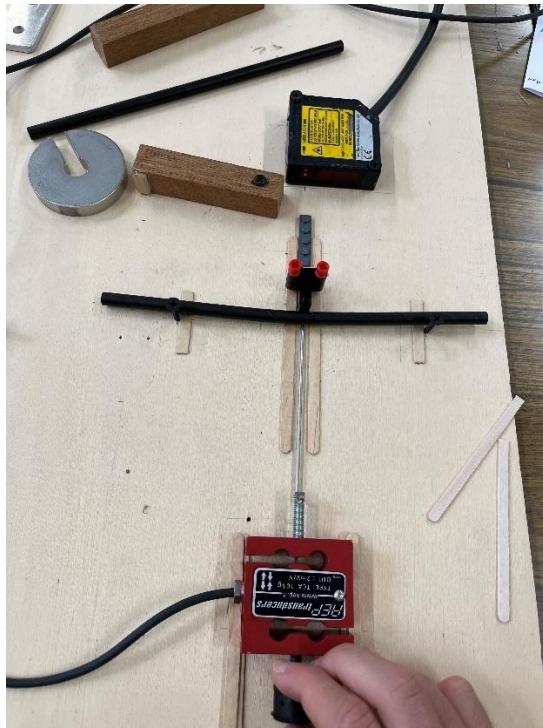


Figura 56. Situación de carga del ensayo de flexión.



Figura 57. Deformación irreversible tras el ensayo de flexión.

En las **Figuras 56 y 57** se muestra la realización del ensayo de flexión en el momento que se produce deformación plástica y el aspecto que tiene la misma sobre la superficie de la pajita.

Para descartar que se pudieran producir posibles alteraciones en las propiedades de las pajitas, pudiendo afectar esto a los resultados que se obtuvieran en los ensayos dependiendo de que pajita se utilizara para su realización, se optó por realizar un ensayo idéntico, pero con una pajita diferente para ver qué ocurría. Se comprobó que los resultados alcanzados con esta otra pajita fueron muy similares a los obtenidos en el primer ensayo, pudiendo así descartar posible variabilidad en los resultados según qué pajita se utilizase. En las **Figuras 58 y 59** se comparan los resultados obtenidos con la primera pajita y los obtenidos con la segunda.



Figura 58. Gráfica del ensayo de flexión sin unión pajita 1



Figura 59. Gráfica del ensayo de flexión sin unión pajita 2

Con los datos obtenidos de los ensayos podríamos obtener numéricamente el valor del módulo de elasticidad. Para ello, como ya se había mencionado anteriormente, vamos a aproximar la pajita a una viga biapoyada isostática con una fuerza puntual vertical aplicada en el punto medio de la misma, como se muestra en la **Figura 60**.

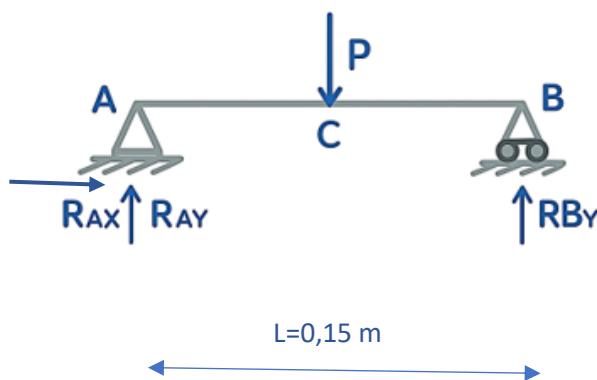


Figura 60. Viga isostática con fuerza puntual aplicada en su punto medio

Mediante el método de principios virtuales (PTV) estudiado a lo largo del grado. Debido a que se trata de una estructura isostática, podemos calcular las reacciones mediante equilibrio, obteniendo:

$$R_{Ax}=0 \quad R_{Ay} = R_{By} = \frac{P}{2}$$

A continuación, se indican tanto el estado isostático como el estado virtual con los respectivos cortes que se van a realizar, mostrados en las **Figuras 61 y 62**.

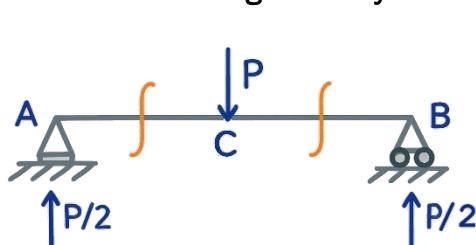


Figura 61. Estado isostático

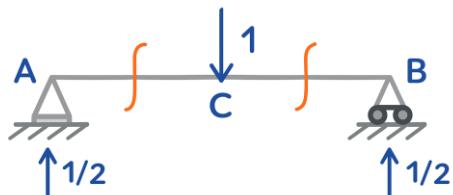


Figura 62. Estado virtual

Realizando los pertinentes cortes de obtiene que los momentos en los tramos son los que se muestran a continuación.

$$M(x) = \frac{P}{2}x \quad m(x) = \frac{x}{2}$$

Aplicamos la ecuación de compatibilidad de PTV.

$$\delta_{Vc} = 2 \int_0^{L/2} M(x) * m(x) * \frac{dx}{EI}$$

En la que, para nuestro problema, conocemos todos los valores excepto el módulo de elasticidad (E), sustituyendo en la ecuación para el caso de una fuerza F=4 N, obtenemos:

$$\delta_{Vc} = 6,96465 * 10^{-4} = \frac{4 * 0,15^3}{48 * E_{pajita} * 1,20416 * 10^{-10}}$$

Despejando, obtenemos que el módulo de elasticidad de la pajita tiene un valor de:

$$E_{pajita} = 3,35 * 10^9 \text{ Pa}$$

### Realización mediante el software SAP2000

Se va a proceder a realizar el ensayo anterior pero esta vez mediante el software de simulación estructural SAP2000, pudiendo así comparar los resultados obtenidos con los ensayos realizados manualmente y los obtenidos mediante computación.

En esta ocasión, al tratarse del primer ensayo en el que se emplea este programa, se irá haciendo una introducción al mismo a la vez que se vaya realizando el ensayo.

#### Introducción SAP 2000:

Este trabajo fin de grado ha sido ejecutado con el apoyo del programa informático SAP2000, una herramienta ampliamente reconocida a nivel global para el cálculo de estructuras.

SAP2000 es un software de análisis por elementos finitos que dispone de una interfaz gráfica 3D basada en objetos, lo que facilita la modelación, el análisis y el diseño estructural de una amplia variedad de sistemas de ingeniería. Su gran flexibilidad permite simular una amplia gama de estructuras, desde pórticos simples hasta puentes, edificios de gran altura, presas o estructuras industriales. Su motor de cálculo posibilita tanto análisis lineales como no lineales, estáticos y dinámicos, así como estudios en el dominio del tiempo y la frecuencia.

Este programa incorpora la capacidad de generar automáticamente acciones externas como sismos, cargas de viento o tránsito vehicular, y permite el cálculo, dimensionamiento y verificación automatizada de estructuras en hormigón armado, acero, aluminio y perfiles conformados en frío, todo ello conforme a múltiples

normativas internacionales, incluidas las europeas, americanas, canadienses, turcas, indias y chinas.

Entre sus funcionalidades se incluyen el análisis de envolventes, la aplicación de códigos de diseño, simulaciones de carga de viento y frecuencia peatonal, así como estudios modales, análisis de carga móvil y análisis en el dominio de la frecuencia. Para ello, permite emplear distintos tipos de elementos estructurales, como barras, elementos de membrana y sólidos tridimensionales.

En resumen, SAP2000 es una herramienta potente y versátil que permite abordar con rigor el estudio estructural de sistemas reales o experimentales, como el pórtico desarrollado en este proyecto.

Para resolver cualquier duda surgida durante la utilización del programa, se ha hecho uso de la ayuda integrada en SAP2000 o de manuales de usuario disponibles [7].

La pajita será modelada en el programa como una viga biapoyada, por lo que a continuación se describirán los pasos para modelarla.

El primer paso consistirá en definir la geometría del ensayo, contenido para ello el programa un catálogo con las geometrías más comunes para facilitar la creación de éstas. Con esto, se busca alcanzar el objetivo de simplificar la creación de los modelos, pues solo habría que introducir ciertos parámetros de las características del mismo para lograr el diseño seleccionado.

Los pasos que seguiremos para la creación de la misma son los siguientes:

- Arrancar el programa, seleccionar la opción “file” → “new model”, indicado en la **Figura 63**.

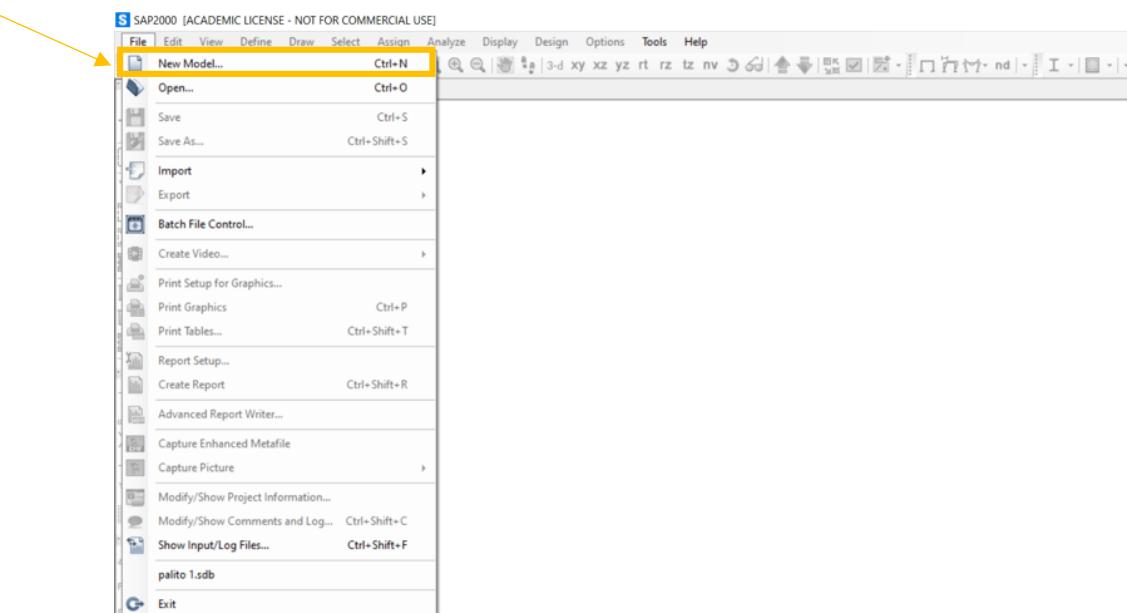


Figura 63. Pantalla de inicio SAP 2000.

- Aparecerá la siguiente ventana donde se podrá seleccionar el modelo con el que se va a trabajar. Seleccionaremos las unidades que se vayan a emplear, en nuestro caso se va a trabajar con las unidades: Newton (N), metro (m) y grados centígrados (°C).
- También se va a seleccionar “Europe” en el apartado de “Default Materials” dado que es la región en la que se está trabajando.
- Una vez se ha realizado lo mencionado anteriormente, se va a seleccionar la geometría de estudio. Al ser una placa de poco espesor, no se tiene una geometría definida por defecto, por lo que se seleccionará la opción “Grid Only”

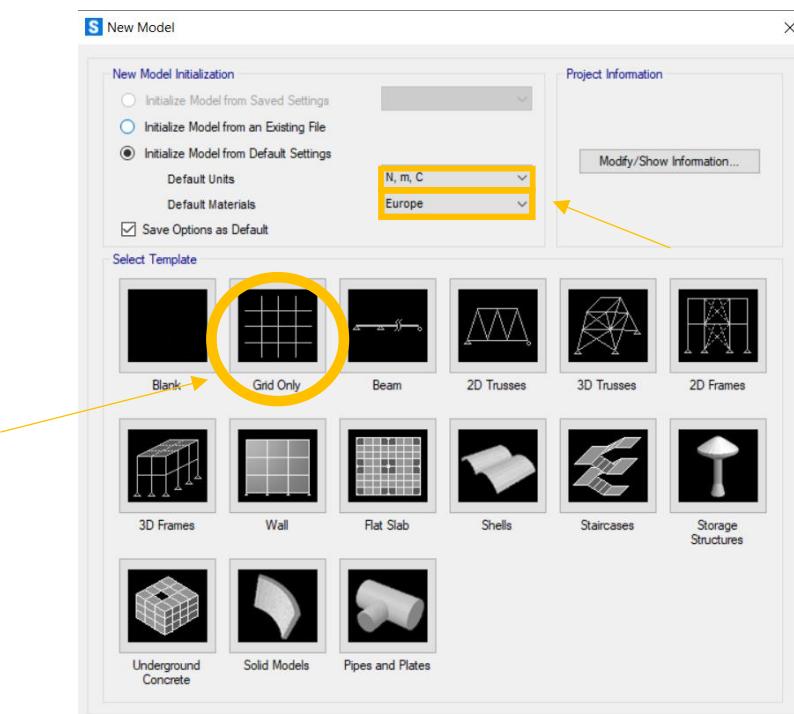


Figura 64. Definición del modelo SAP2000.

- Tras seleccionar la opción de “Grid Only” se nos desplegará la siguiente ventana en la que deberemos introducir el número de líneas por eje “Number of Grid Lines”, seleccionando 3 para el eje X y una para los ejes Y y Z. También deberemos indicar el espaciado entre líneas, tomando un valor de 0,075 y se seleccionará “OK”, como se observa en la **Figura 65**.

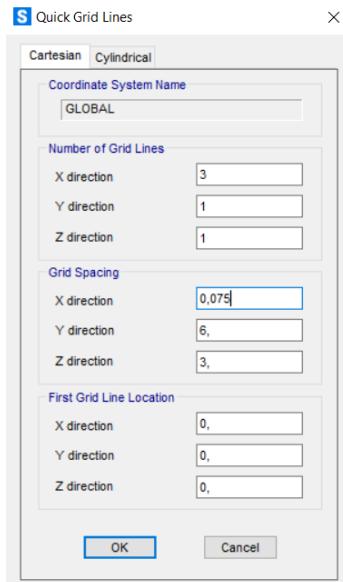


Figura 65. Definición de las propiedades de la rejilla.

- A continuación, se desplegarán tres ventanas diferentes de las cuales únicamente nos interesa la del medio, por lo que procederemos a cerrar las otras dos haciendo “click” en la “x” como se puede ver en la **Figura 66**.

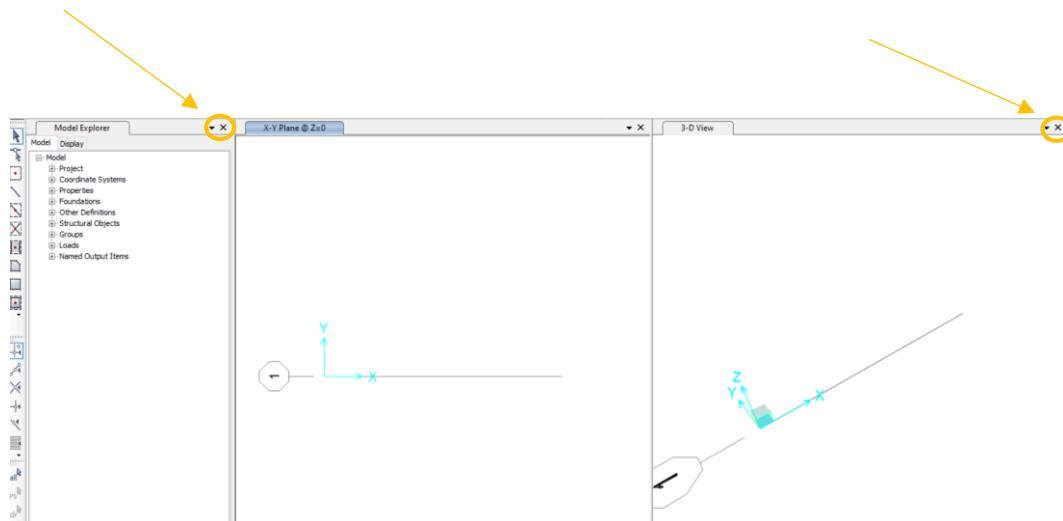


Figura 66. Pantalla completa SAP 2000 con las tres ventanas.

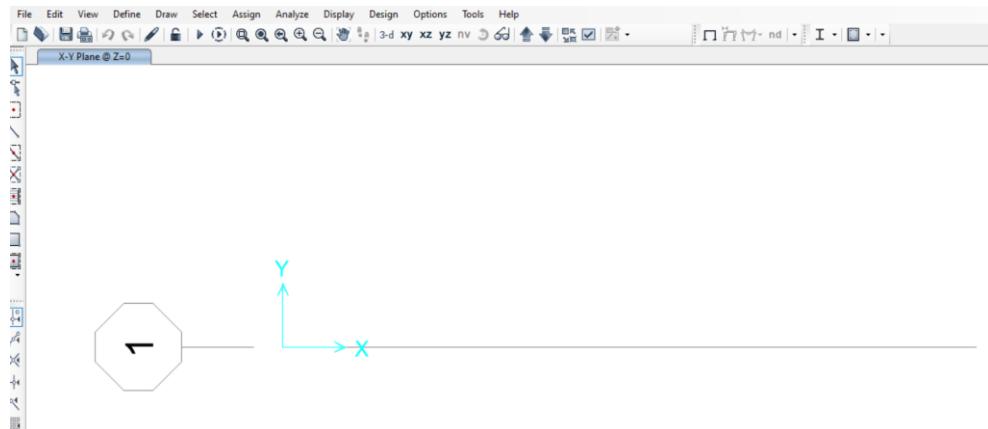


Figura 67. Pantalla completa SAP 2000.

- Haremos “click” derecho en el fondo blanco y seleccionaremos la opción de “Edit Grid Data” como se ve en la **Figura 68**.

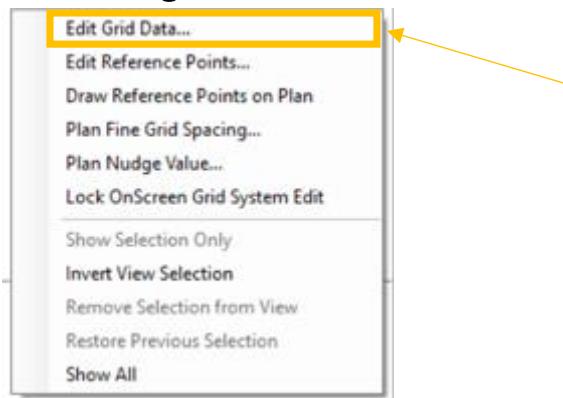


Figura 68. Selección “Edit Grid Data”.

- Tras ello aparecerá la siguiente ventana, en la que modificaremos el sistema global que viene por defecto. Para ello “click” en la opción “Modify/Show System” como se muestra a continuación y haremos “click” en “OK”, tal como se muestra en la **Figura 69**.

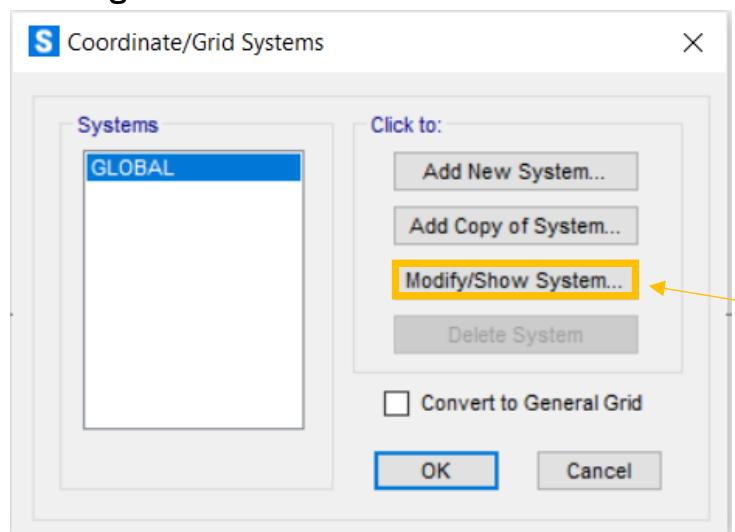


Figura 69. Modificación del sistema global.

- Posteriormente, aparecerá la siguiente ventana en la que deberemos ocultar las burbujas haciéndolas muy pequeñas ya que este programa no contempla la opción de eliminarlas, seleccionando un valor muy pequeño en la casilla “Bubble Size”, como se realizó en la **Figura 70**.

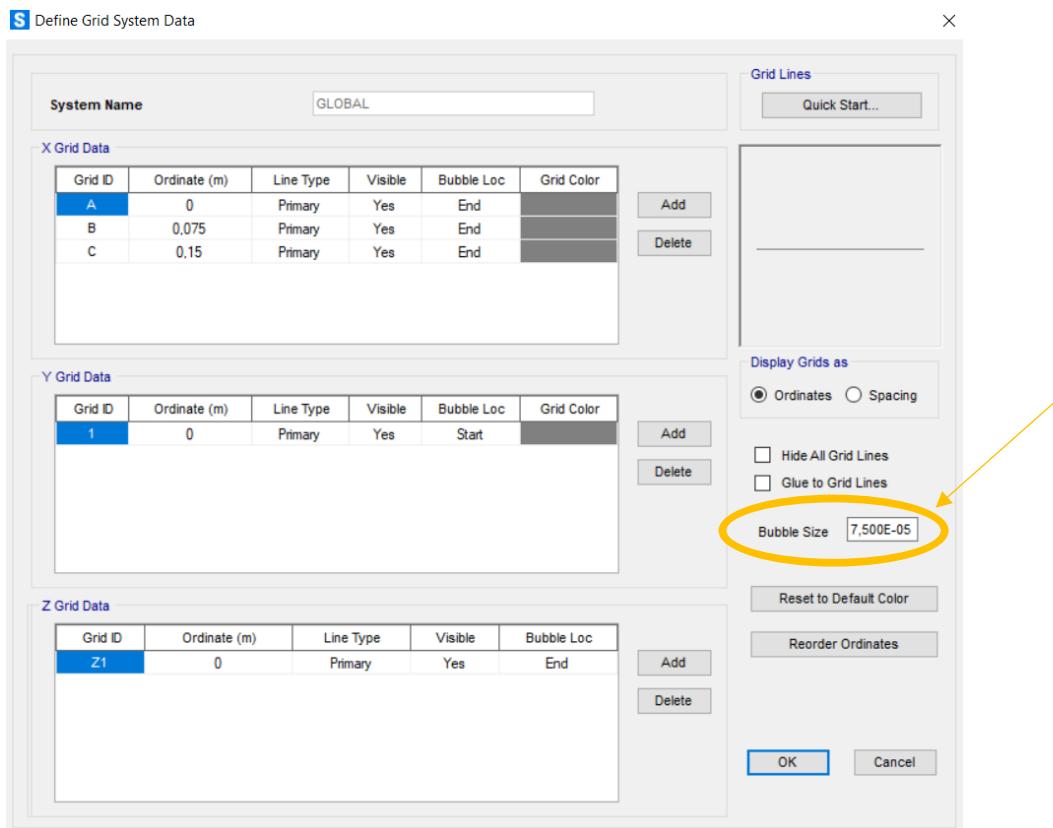


Figura 70. Modificación del tamaño de las burbujas.

- Después, deberemos cambiar el sistema de referencia en que queremos trabajar. El programa nos selecciona por defecto el sistema “xy” y nosotros queremos el sistema “xz”, por lo que haremos “click” en la opción “xz” que se muestra a continuación en la **Figura 71**.

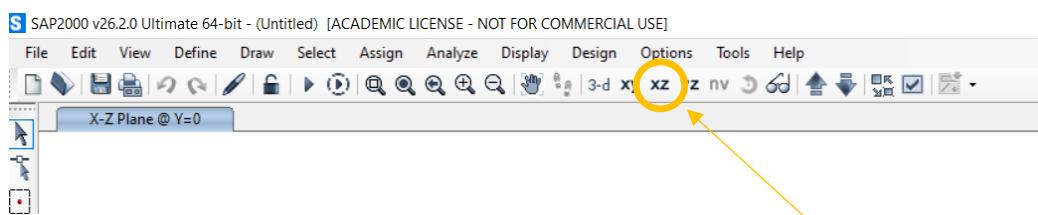


Figura 71. Modificación del sistema de referencia.

- Ahora procederemos a definir el material, para ello haremos “click” en la pestaña “Define” seleccionado la opción “Materials” que se despliega, como se aprecia en la **Figura 72**.

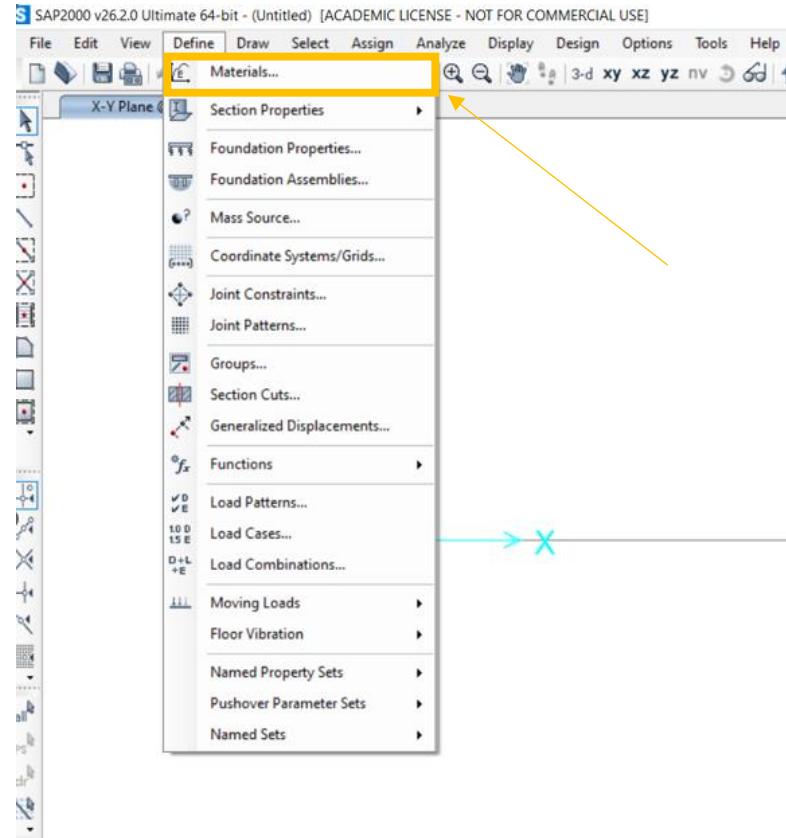


Figura 72. Definimos el material.

- Por defecto el programa nos proporciona varios materiales, pero añadiremos otro diferente. Para ello haremos “click” en la opción “Add New Material”, tal como se indica en la **Figura 73**.

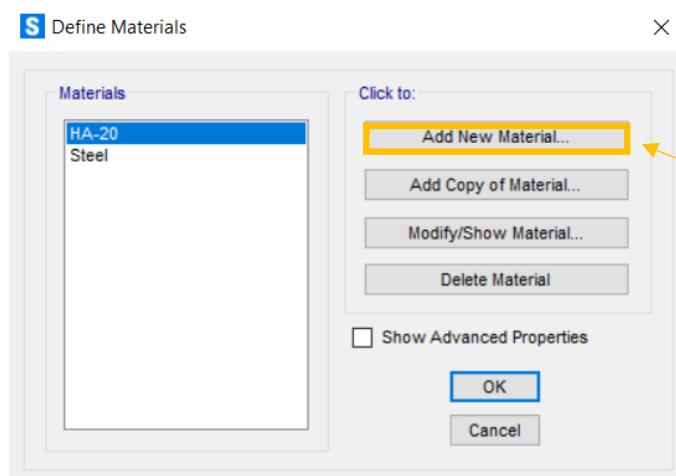


Figura 73. Definición de un nuevo material.

- Tras ello, se desplegará otra ventana en la que se deberemos seleccionar varios parámetros. Primero haremos “click” en “Material Type” y seleccionaremos la opción de acero “Steel”, después haremos “click” en “Region” seleccionando “Europe” y finalmente haremos “click” en “Grade” y seleccionaremos el tipo de acero “S275” y haremos “click” en “OK”,

quedando el menú como se muestra a continuación, mostrado en la **Figura 74.**

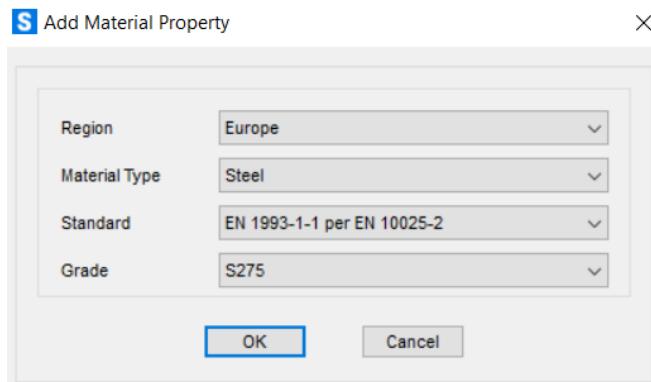


Figura 74. Creación del material a emplear.

- Ahora, deberemos hacer “click” en “Add Copy of Material” seleccionando el material que acabamos de crear y en la ventana que se despliega modificaremos el módulo de elasticidad a  $2,1 \times 10^{11}$ Pa y haremos “click” en “OK”, como se observa en la **Figura 75.**

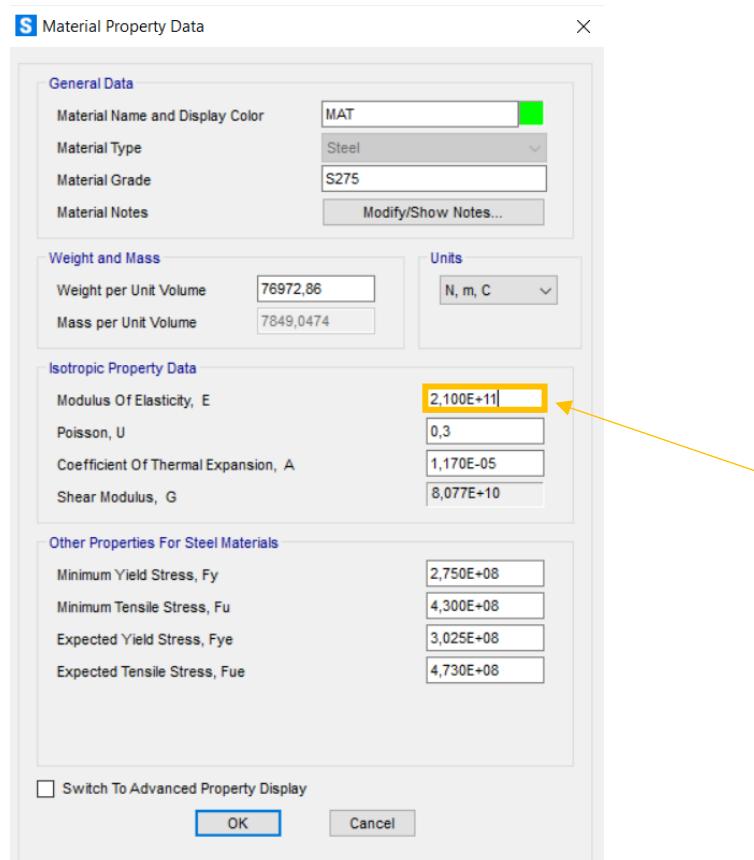


Figura 75. Modificación del valor del módulo de elasticidad.

- Una vez hayamos definido el material, debemos pasar a definir la sección, para ello haremos “click” en la casilla “Define” y tras ello se desplegará una

ventana en la que debemos hacer “click” en la opción “Section Properties” desplegándose otra ventana en la que deberemos seleccionar “Frame Sections”, al igual que en la **Figura 76**.

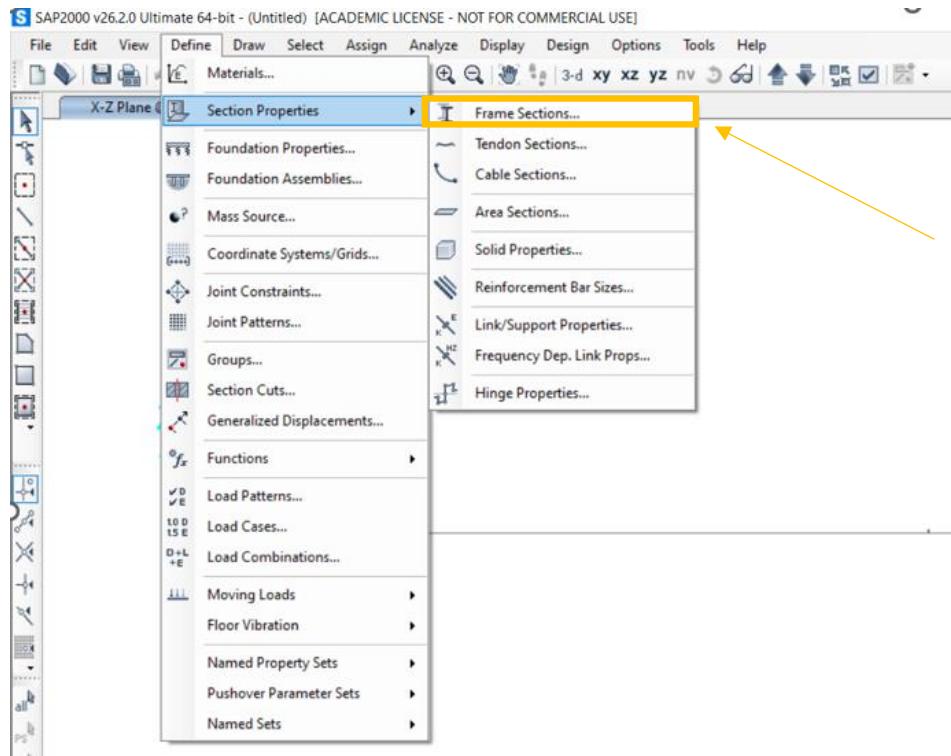


Figura 76. Definición de la sección.

- Tras haber seleccionado la opción anteriormente mencionada, se desplegará una ventana en la que podremos importar barras de una librería o añadir una barra nueva, en este caso decidiéndonos por la opción de crear una nueva, por lo que haremos “click” en la opción de “Add New Property”, como se muestra en la **Figura 77**.

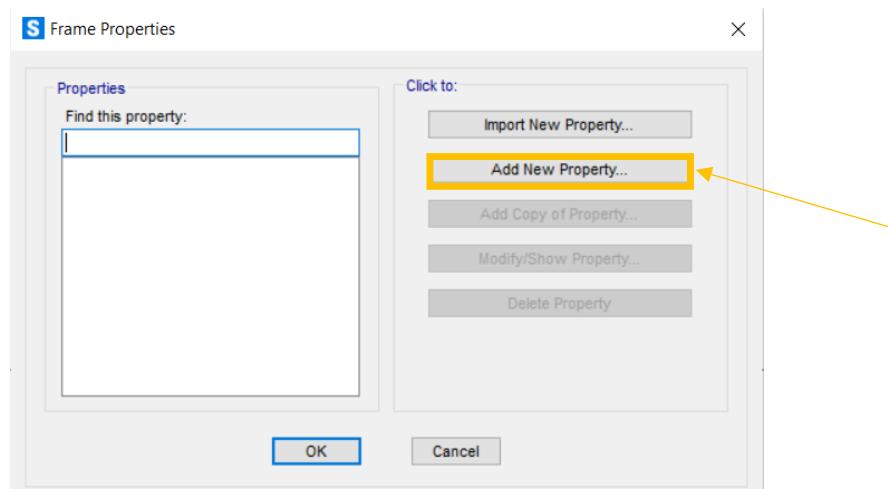


Figura 77. Definición de la sección.

- Al seleccionar esa opción se desplegará otra ventana en la que deberemos introducir el material de nuestra sección y el programa nos mostrará las secciones típicas usadas con ese material. En nuestro caso seleccionaremos la opción “Steel”, mostrándonos el programa las opciones más típicas de secciones de acero. Como en este Trabajo Fin de Grado se está trabajando con pajitas, se seleccionará la opción de sección circular hueca designada en el programa como “Pipe”, como se observa en la **Figura 78**.

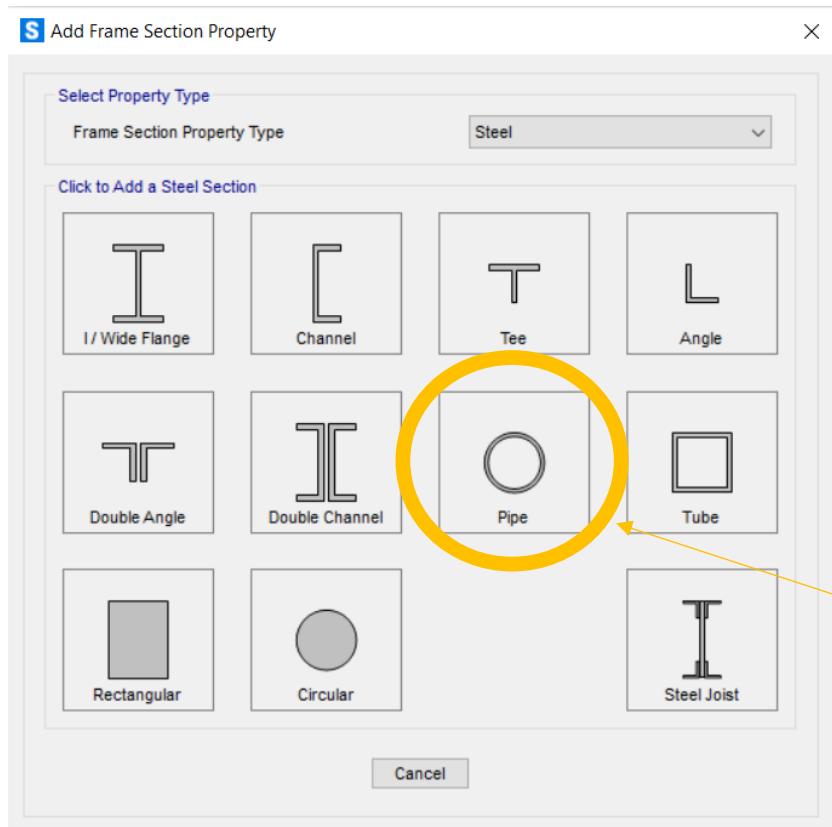


Figura 78. Seleccionamos el tipo de sección.

- Tras seleccionar la opción anterior aparecerá por pantalla la siguiente ventana en la que deberemos introducir datos como el nombre de la sección, a la que llamaremos “Sección Pajita”, el tipo de material, seleccionando el material creado con anterioridad “S275” y las dimensiones de la sección, introduciendo en la casilla del diámetro exterior “Outside Diameter” un valor de 0,0078 m y en el grosor de la pared “Wall Thickness” un valor de 0,001 m, haciendo “click” en “OK”, mostrado en la **Figura 79**.

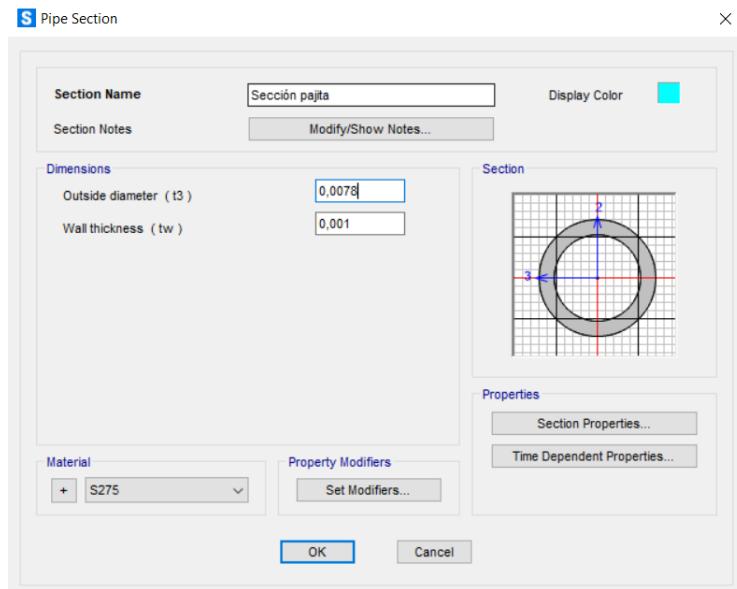


Figura 79. Introducimos las características de la sección.

- Ahora debemos pasar a introducir las cargas, para ello haremos “click” en la opción “Define” y en la ventana que se despliega haremos “click” en la opción “Load Patterns” al igual que se ve en la **Figura 80**.

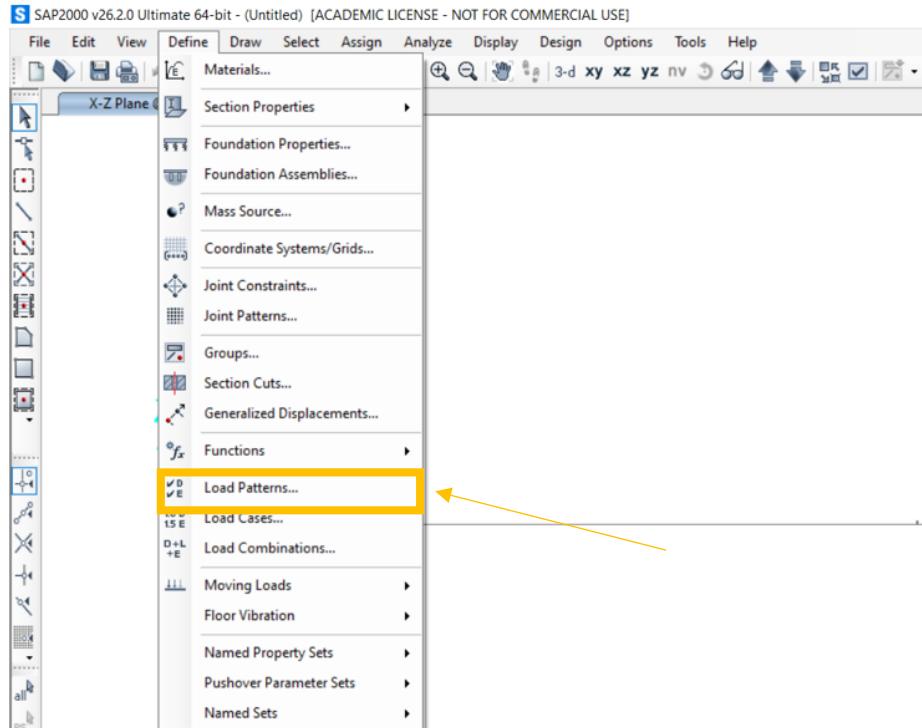


Figura 80. Definición de las cargas.

- Tras seleccionar esta opción se desplegará una ventana en la que deberemos introducir el nombre de la carga, a la cual designaremos como “F” y también deberemos hacer “click” en “Type”, donde seleccionaremos la opción “Other” y haremos “click” en “Add New Load Pattern”, haciendo finalmente “click” en “OK”, como se ve en la **Figura 81**.

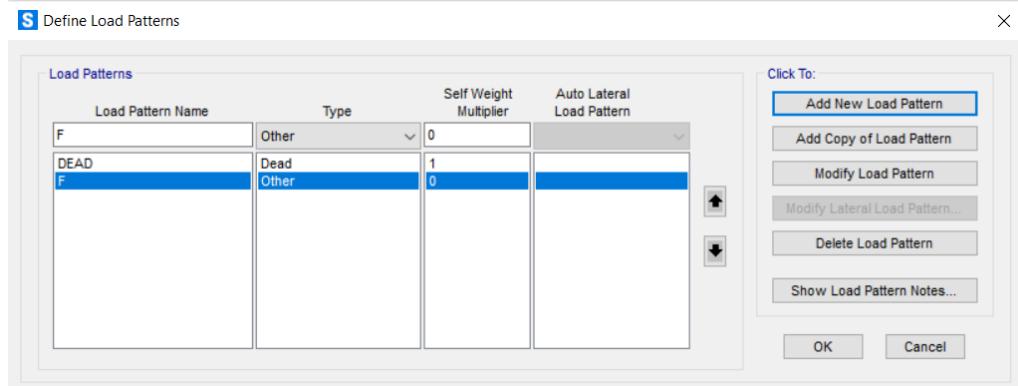


Figura 81. Creamos la carga.

- Ahora debemos asociar la geometría que hemos hecho con el material y la sección y cargarla. Para ello haremos “click” en la casilla “Quick Draw Frame/Cable” y la pantalla principal se mostrará como en la **Figura 82**.

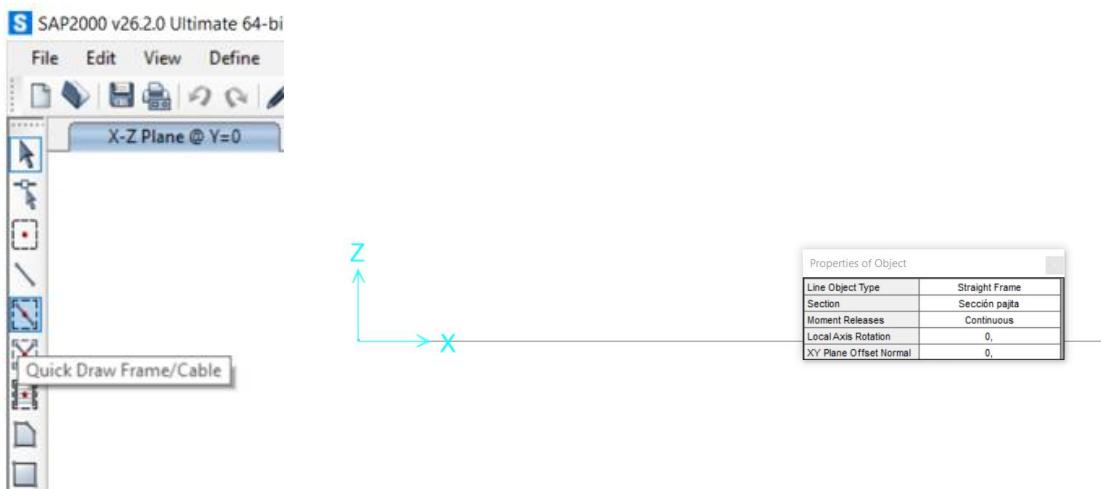


Figura 82. Asociamos la geometría la material y sección

- Vemos que el cursor habrá cambiado de aspecto y sobre los elementos que hagamos “click” con el mismo, los convertiremos en barras de I sección y material introducidos. Haremos “click” sobre las dos barras que presenta nuestro dibujo en pantalla y al finalizar teclearemos “Escape”, observando que nuestra viga habrá cambiado claramente de aspecto, como se observa en la **Figura 83**.

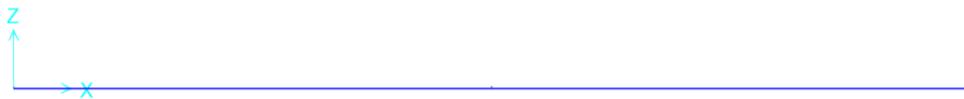


Figura 83. Aspecto de la geometría tras definir material y sección.

- Observamos que el programa nos está mostrando la viga en 2D. Para cambiar la vista a tres dimensiones y poder observar la sección haremos “click” en la casilla “Set Display Options” al igual que en la **Figura 84**.

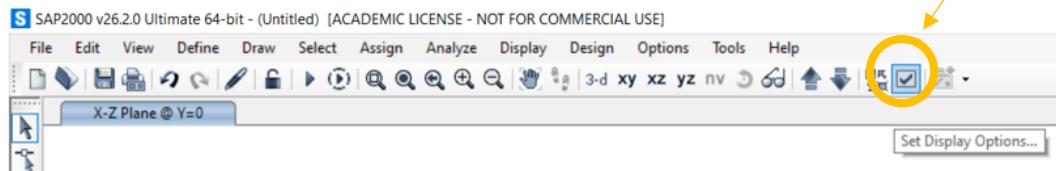


Figura 84. Cambio de vista de 2D a 3D.

- Tras seleccionar esta opción se desplegará la siguiente ventana en la que deberemos hacer “click” en “General Options” y seleccionar la opción “Extrude” y haremos “click” en “Apply” como se aprecia en la **Figura 85**.

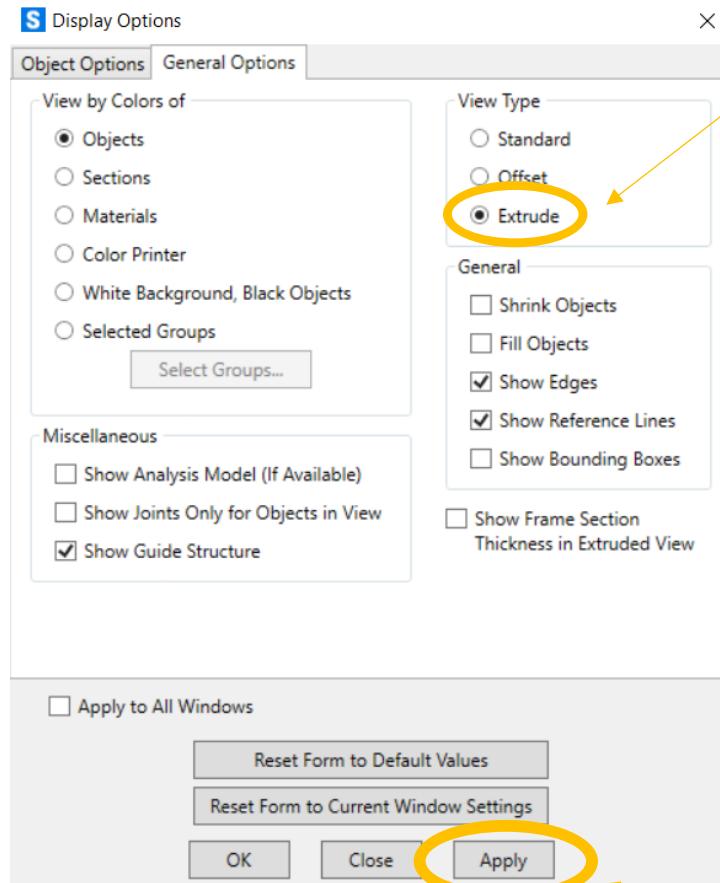


Figura 85. Seleccionamos la opción “Extrude”

- Vemos que el aspecto de la barra en dos dimensiones se habrá modificado y para mostrarla en 3D deberemos hacer “click” en la opción “Set Default 3D View”, observando que nuestra viga cambiará de aspecto y se mostrará en tres dimensiones, como se muestra en la **Figuras 86 y 87**.

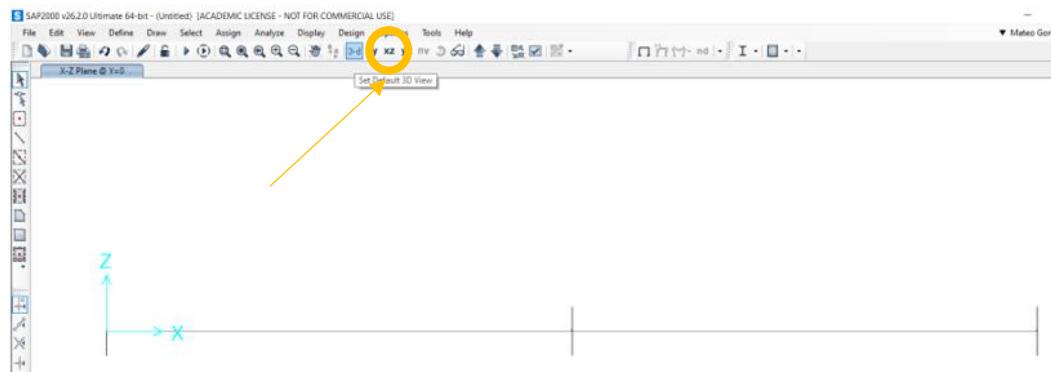


Figura 86. Vista en dos dimensiones.

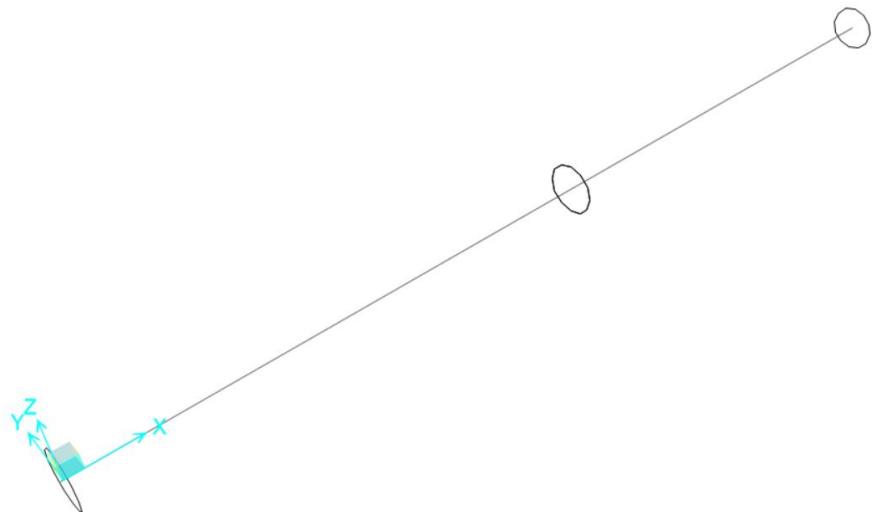


Figura 87. Vista en tres dimensiones.

- Ahora deberemos introducir las condiciones de contorno. Para ello, haremos “click” en “Set Display Options” y en la casilla de “Object Options” en el apartado de “Joints”, desmarcaremos la opción de “Invisible”, mostrándonos así los apoyos como se puede ver en la **Figura 88**.

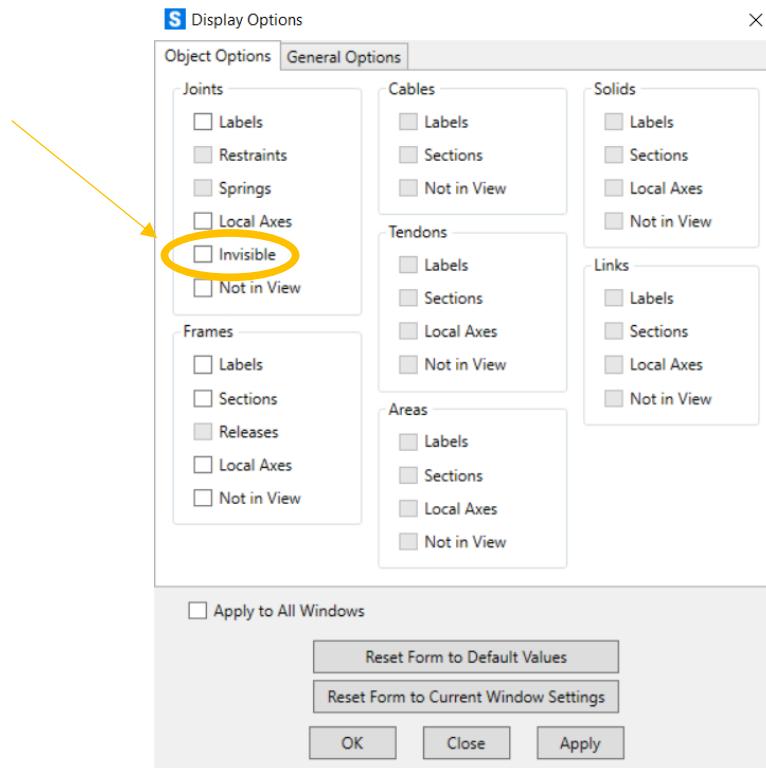


Figura 88. Desmarcamos la opción “Invisible”.

- Una vez hecho lo anterior, para introducir las condiciones de contorno, lo primero que debemos hacer será hacer pinchar en los nudos en los que queremos introducir los apoyos. Tras esto, haremos “click” en “Assign”, seleccionando la opción de “Joint” y finalmente haremos “click” en “Restraints”, como queda indicado en la **Figura 89**.

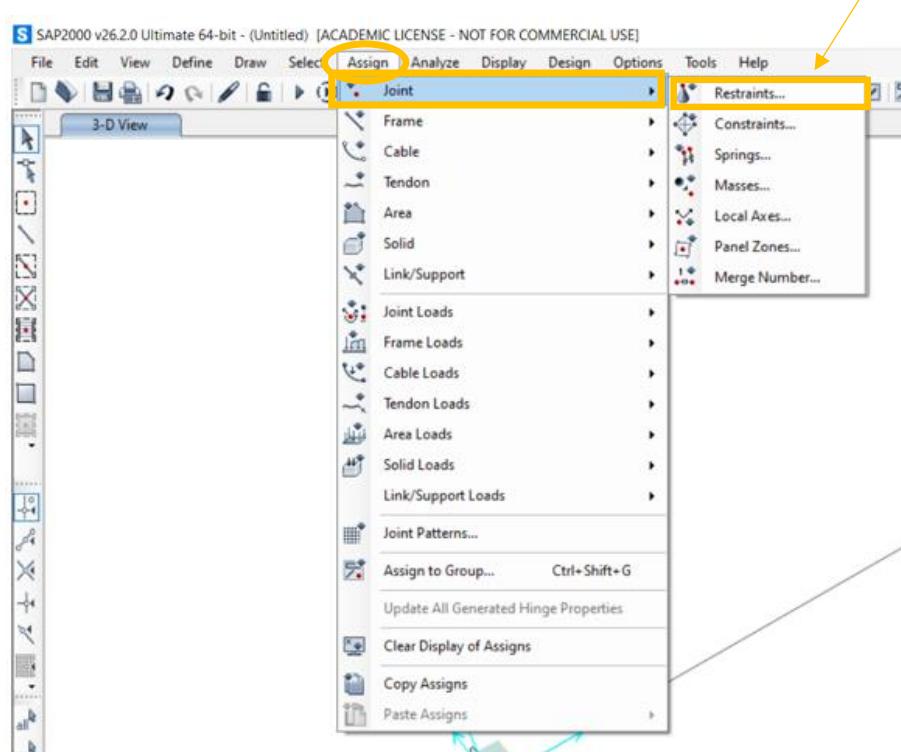


Figura 89. Definición de los apoyos

- Tras hacer lo anterior se desplegará una ventana en la que debemos seleccionar el apoyo que queremos introducir, seleccionando para ambos apoyos la opción de apoyo fijo, haremos “click” en “Apply” y finalmente para abandonar esta ventana, en “OK”, al igual que en la **Figura 90**.

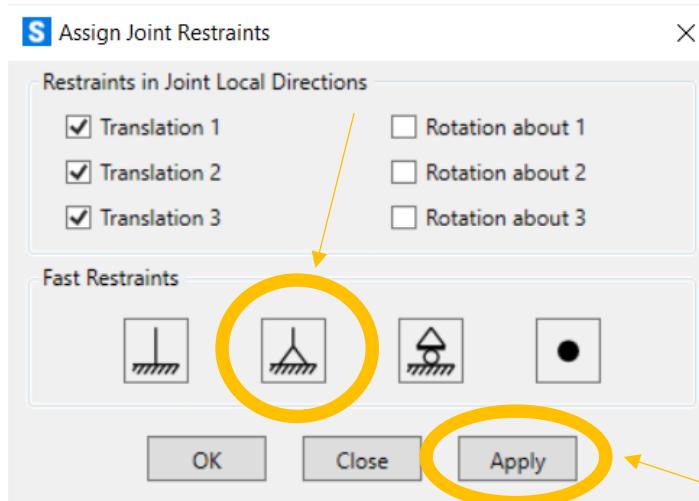


Figura 90. Introducimos los apoyos.

- Ahora debemos introducir una fuerza en el punto medio de la barra. Para ello, lo primero que haremos será pinchar sobre el nudo en el que queramos situar la fuerza puntual. Tras ello, haremos “click” en “Assign”, seleccionando la opción de “Joint Loads” y haremos “click” en “Forces”, como se indica en la **Figura 91**.

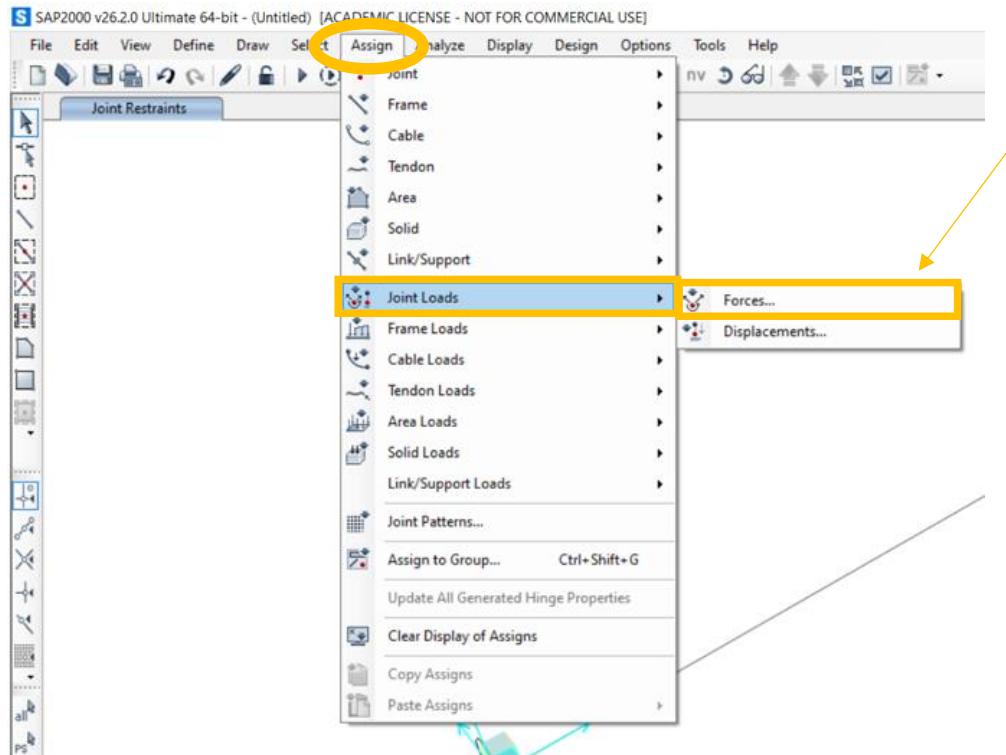


Figura 91. Introducimos las fuerzas.

- Al hacer lo anterior, se desplegará una ventana en la que deberemos seleccionar en la opción de “Load Pattern” la fuerza “F” que creamos anteriormente y deberemos introducir el valor que tendrá la fuerza, en este caso situada en la dirección del eje Z, en la casilla “Force Global Z”, en donde introduciremos un valor de -4 N. Finalmente, haremos “click” en “Apply” y tras ello en “OK”, como se ve en la **Figura 92**.

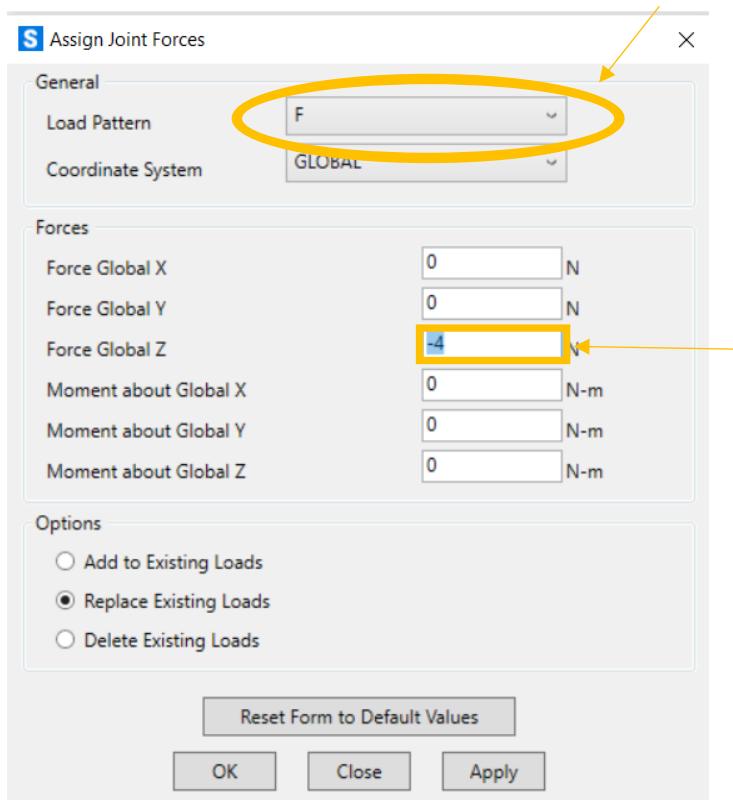


Figura 92. Definimos la fuerza y su valor.

- Una vez hayamos hecho todo lo mencionado anteriormente, ya tendremos todo listo para llevar a cabo la ejecución. Para ello, haremos “click” sobre la casilla “Run Analysis” como se indica en la **Figura 93**.

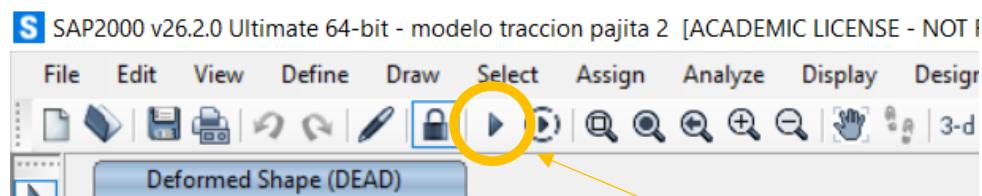


Figura 93. Ejecutamos el programa.

- Lo siguiente que deberemos hacer será hacer “click” sobre la casilla “Show Deformed Shape”, desplegándose la siguiente ventana. En ella deberemos seleccionar en “Case/Combo Name” nuestra fuerza “F”, también deberemos marcar la opción “Wire Shadow” para que el programa nos dibuje la indeformada y haremos “click” en “Apply” y en “OK”, como queda indicado en las **Figuras 94 y 95**.

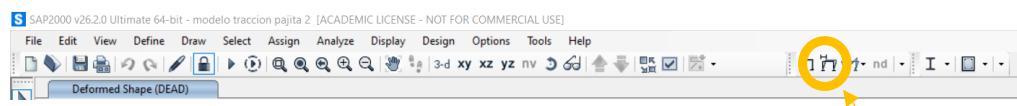


Figura 94. Seleccionamos la opción de “Show Deformed Shape”

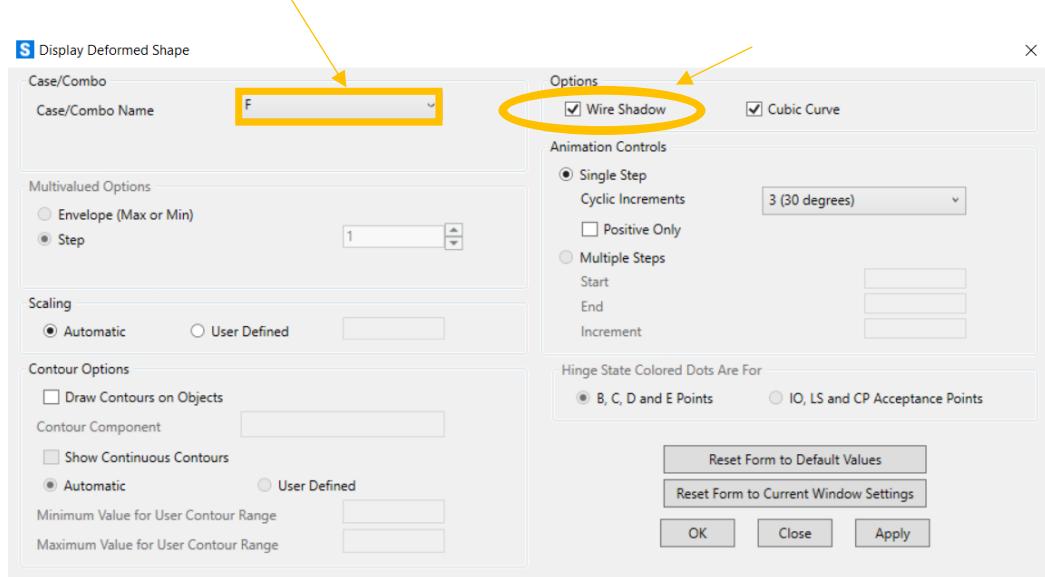


Figura 95. Seleccionamos la fuerza “F” y activamos la opción “Wire Shadow”.

- Observamos que el programa me está dibujando la deformada para el caso de carga F, como se puede observar en las **Figuras 96 y 97**.

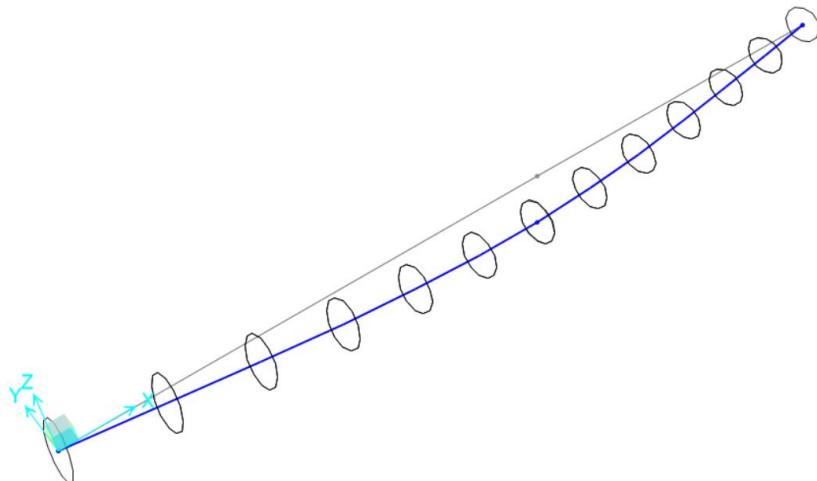


Figura 96. Deformada caso de carga F en 3D.

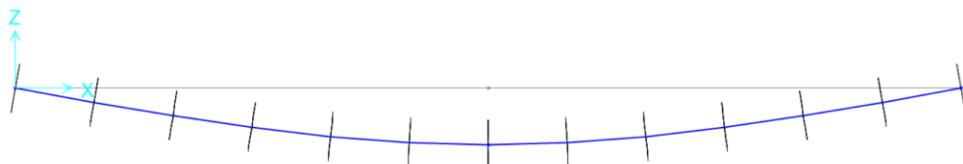


Figura 97. Deformada caso de carga F en 2D.

- Para calcular el desplazamiento máximo con el programa, haremos “click” derecho sobre el punto que más desplazamiento haya experimentado, que en este caso va a ser el punto central de nuestra barra, y el programa nos

mostrará la siguiente ventana en la que nos indica el desplazamiento de todos los nudos, siendo el de valor  $-1,12 \times 10^{-5}$  m el que nos interesa como se ve en la **Figura 98**.

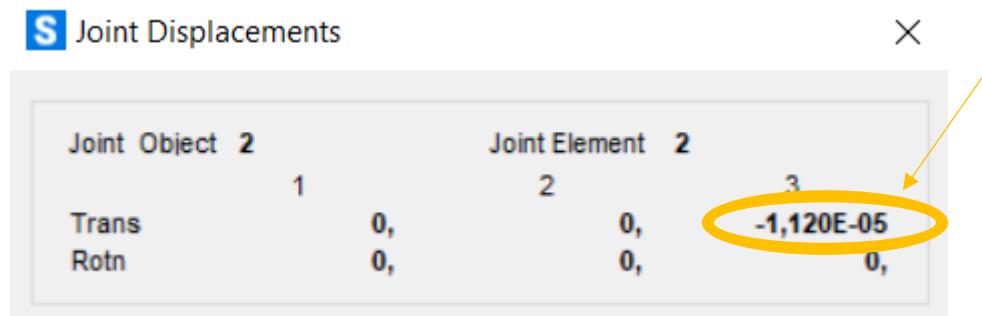


Figura 98. Desplazamiento de los nudos de la barra.

- Los resultados que nos está mostrando el programa son para una viga cuyo módulo de elasticidad es de valor  $E=2,1 \times 10^{11}$  Pa y para una fuerza aplicada de 4 N. Para calcular el módulo de elasticidad de la pajita calcularemos, con los resultados escritos en las tablas y empleando una regla de tres, el desplazamiento que originaría una fuerza de 4 N.

Obtendremos que, para ese valor de fuerza se originaría un desplazamiento de 0,696465 mm.

$$\delta = 6,96465 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Para hallar el módulo de elasticidad de la pajita bastará con hacer una regla de 3 en la que relacionaremos el módulo de elasticidad del acero, el desplazamiento experimentado por la barra de acero para una fuerza de 4 Newton, el módulo de elasticidad de la pajita (desconocido) y el desplazamiento experimentado por la pajita para una fuerza de 4 N.

$$\frac{E_{\text{pajita}}}{E_{\text{acero}}} = \frac{\delta_{\text{acero}}}{\delta_{\text{pajita}}}$$

$$\delta_{\text{acero}} = -1,12 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\delta_{\text{pajita}} = -6,96465 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$E_{\text{acero}} = 2,1 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$E_{\text{pajita}} = \frac{\delta_{\text{acero}}}{\delta_{\text{pajita}}} \times E_{\text{acero}} = 3,377 \times 10^9 \text{ Pa}$$

Valor que observamos que es muy próximo al que se calculó numéricamente con los datos obtenidos de los ensayos en el laboratorio, concluyendo que el valor obtenido por ambas vías es correcto.

- Una vez obtenido este valor, volveremos al programa y cambiaremos el módulo de elasticidad de  $2,1 \times 10^{11}$  a  $3,377 \times 10^9$  Pa. Volveremos a ejecutar la operación y haciendo de nuevo “click” derecho sobre el punto de

desplazamiento máximo hallaremos que este presenta un valor de  $6,967 \times 10^{-4}$  m, valor que es prácticamente igual al que obtuvimos con los datos de las tablas, como se observa en la Figura 100.

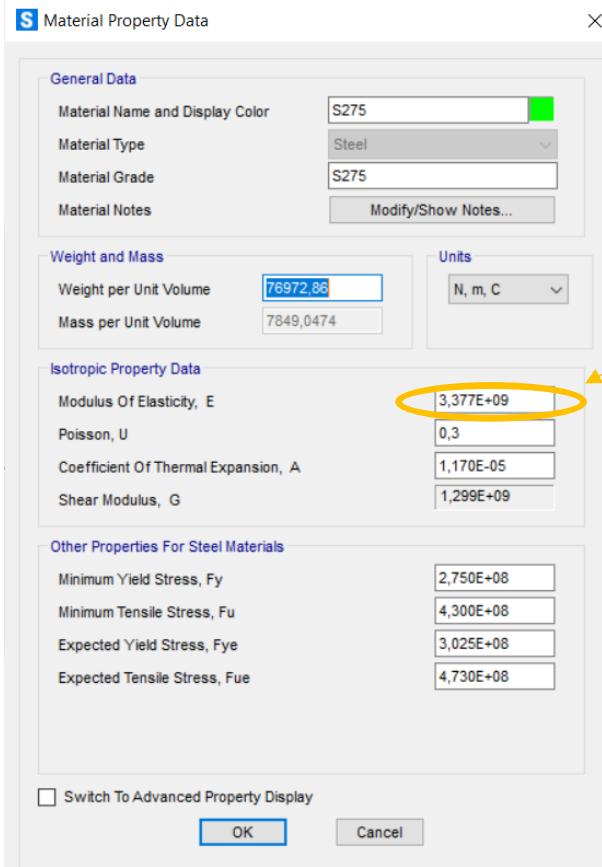


Figura 99. Cambiamos el valor del módulo de elasticidad.



Figura 100. Obtenemos el valor del desplazamiento con el nuevo módulo de elasticidad.

#### 4.1.2 Realización del ensayo a flexión empleando las uniones.

Se realizará un ensayo muy similar al anteriormente descrito, pero en esta ocasión se realizará a dos pajitas unidas mediante una de las uniones simple diseñadas. Al igual que se hizo en el ensayo anterior, se realizará tanto de forma manual en el laboratorio como mediante el software SAP2000.

Se someterá al conjunto a un esfuerzo de flexión buscando medir el desplazamiento que experimentará el punto central del mismo en respuesta libre, en función de la carga aplicada.

#### Realización de forma experimental en el laboratorio

En la **Figura 101**, se puede observar el aspecto que presenta el ensayo en su estado inicial sin cargar.

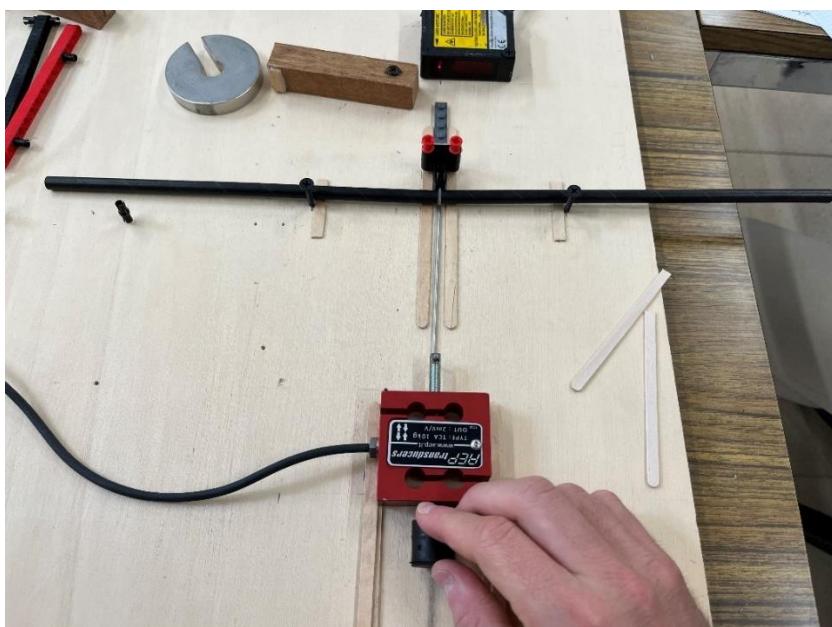


Figura 101. Situación inicial del ensayo sin carga.

La forma de proceder en este ensayo será exactamente igual que en el ensayo de flexión de únicamente la pajita, por lo que se va a obviar la explicación del empleo del software DEWEsoftX2 así como la utilización de Excel para el manejo de los datos. Pasaremos a exponer directamente los resultados que obtenemos fruto de los ensayos.

Como se hizo anteriormente, se ha realizado una tabla en la que se muestran parámetros obtenidos durante los mismos, mostrados de forma clara y ordenada en la **Tabla 3**.

ENSAYO	FUERZA MÁXIMA (N)	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO (mm)	PENDIENTE DE CARGA	PENDIENTE DE DESCARGA	MEDIA DE LAS PENDIENTES	PENDIENTE EXPERIMENTAL
1	6,7307	1,23	5889,03	4122,39	5005,71	5529,5
2	9,474	1,842	6215,77	5719,18	5967,475	5518,3
3	13,159	2,75	5222,195	4552,764	4887,48	5194,7
4	11,406	2,26	5221,05	5208,9	5214,975	5309,5
5	12,143	2,33	5908,02	4270,43	5089,225	5438,1
6	14,9235	3,08	5068,644	5312,98	5190,812	5286,8
7	13,012	2,48	4997,674	4611,94	4804,807	5224,2
8	12,1	2,412	5344,92	5054,54	5199,73	5289,3
9	12,246	2,254	6092,67	5794,12	5943,4	5255,4
10	13,638	2,926	6020,65	4843,75	5432,2	5025
11	14,924	3,159	5281,81	5329,835	5305,823	5133,4

Tabla 3. Datos obtenidos del ensayo de flexión con uniones

Se puede apreciar en las gráficas obtenidas mediante Excel, como a partir del ensayo número 8 llega un punto a partir del cual el desplazamiento sigue aumentando, aunque no se aumente la fuerza, incluso se observa como disminuyendo la fuerza se consigue que el desplazamiento siga en aumento. Esto se debe a que se superó el límite elástico del material, produciéndose la abolladura de la pajita, pasando de tener un comportamiento elástico, recuperando su forma inicial al descargar a aparecer una deformación plástica que se manifiesta sobre la superficie de la pajita. A continuación, se presentan una serie de imágenes para ilustrar lo mencionado anteriormente.

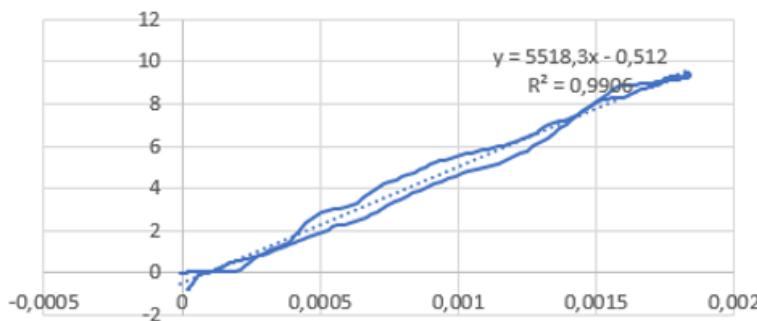


Figura 102. Gráfica del ensayo 2 de flexión con unión.

En la **Figura 102**, se muestra un ensayo en el que la deformación que experimenta el conjunto es elástica, sin producirse abolladura y volviendo a su estado de deformación nula inicial. Se observa como el desplazamiento va aumentando de forma lineal según se va aumentando la fuerza.

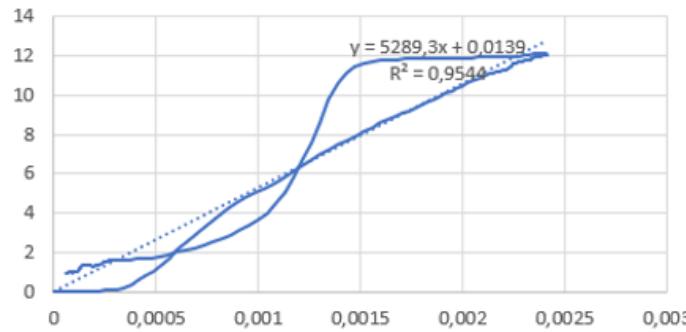


Figura 103. Gráfica del ensayo 8 de flexión con unión.

En la **Figura 103**, se observa claramente como la fuerza alcanza un máximo y a partir del mismo se mantiene, mientras que el desplazamiento sigue en aumento, aunque no apliquemos más fuerza, debido a que se superó el límite elástico del material y se produjo deformación permanente. A partir de este ensayo la fuerza necesaria para lograr desplazamientos elevados se ha reducido, aunque de forma bastante menos notable que en los ensayos con la pajita aislada. Por ejemplo, en el ensayo 6 para lograr un desplazamiento de 3,08 mm necesitamos aplicar una fuerza de 14,9235 N (antes de la deformación plástica) y en cambio para el ensayo 10 conseguimos lograr un desplazamiento similar aplicando casi 1 N menos de fuerza.

Para garantizar que los resultados obtenidos no dependieran de la pajita empleada en el ensayo, se realizó otro ensayo idéntico con otras dos pajitas para comprobar qué ocurría. Pudimos observar que los resultados obtenidos con unas y otras pajitas son prácticamente idénticos por lo que podemos descartar que se produzca variabilidad en los resultados por posibles cambios en las propiedades dependiendo de qué pajita se use, al presentar todas características prácticamente iguales, como se observa en las **Figuras 104 y 105**.

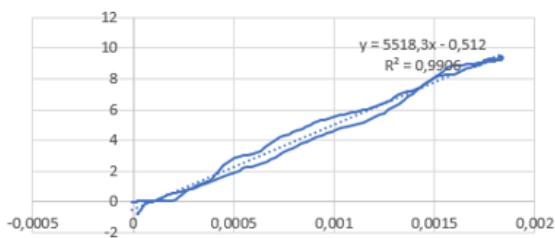


Figura 104. Gráfica del ensayo de flexión con unión pajita 1

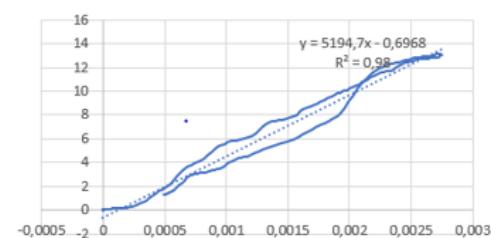


Figura 105. Gráfica del ensayo de flexión con unión pajita 2

Si comparamos los ensayos con y sin uniones, se observa que el conjunto formado por la pajita y las uniones aguanta cargas mucho más elevadas hasta alcanzar la deformación plástica de lo que lo hacían las pajitas por separado. Comparando datos obtenidos de ambos ensayos observamos que, para desplazamientos máximos de valores en torno a 3 mm antes de producirse deformación plástica, en el ensayo de

la pajita aislada la fuerza máxima para lograr ese valor del desplazamiento fue de 7,867 N y para el caso de las pajitas con las uniones fue de 13,638 N, prácticamente el doble.

También observamos que para superar el límite elástico del material la fuerza a aplicar es bastante superior en el ensayo realizado con las uniones al realizado con la pajita aislada.

Hemos comprobado que el empleo de las uniones aumenta muy considerablemente la resistencia del conjunto, lo cual se debe a que la unión rígida no solo mejora la distribución de esfuerzos entre las pajitas, sino que también incrementa su capacidad portante, permitiendo soportar cargas mayores antes de alcanzar la deformación plástica. El hecho de que se requiera una fuerza significativamente superior para alcanzar un mismo desplazamiento en el sistema unido indica un incremento claro en la rigidez estructural. Este resultado refleja cómo una configuración adecuada y la conexión efectiva entre elementos individuales pueden optimizar el comportamiento mecánico de estructuras ligeras, incluso con materiales tan frágiles como el papel.

Al igual que se hizo anteriormente, con los datos obtenidos a lo largo de este ensayo, podremos calcular numéricamente el valor del módulo de elasticidad de las uniones. La forma de proceder será exactamente la misma que en el ensayo anterior, con la única diferencia de que en este caso tendremos dos módulos de elasticidad distintos en el modelo de viga biapoyada isostática, el de las pajitas y el de las uniones, como se aprecia en la **Figura 106**.

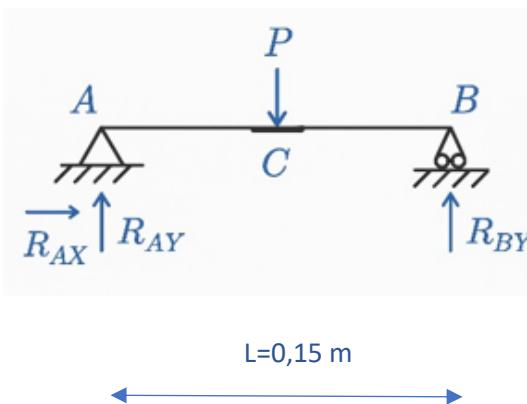


Figura 106. Viga isostática con fuerza puntual aplicada en su punto medio

El valor de las reacciones será exactamente el mismo:

$$R_{Ax}=0 \quad R_{Ay} = R_{By} = \frac{P}{2}$$

En este caso, al estar la viga biapoyada constituida por dos materiales diferentes, deberemos realizar 4 cortes, pero al tratarse de una estructura verticalmente simétrica, bastará con hacer los cortes de una mitad de la misma y multiplicar por dos a lo obtenido, como se observa en las **Figuras 107 y 108**.

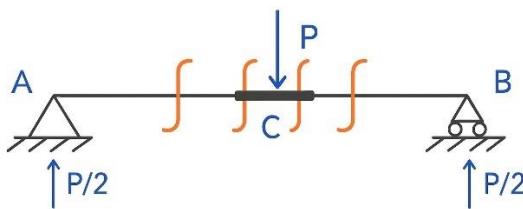


Figura 107. Estado isostático

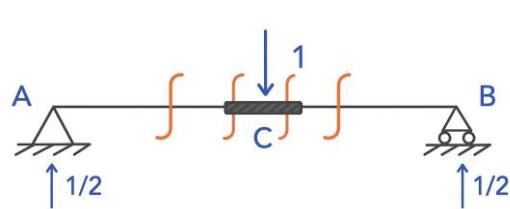


Figura 108. Estado virtual

Realizando los pertinentes cortes de obtiene que los momentos en los tramos son los que se muestran a continuación.

$$M(x) = \frac{P}{2}x \quad m(x) = \frac{x}{2}$$

Aplicamos la ecuación de compatibilidad de PTV, en la que en esta ocasión tendremos que diferenciar entre las inercias y los módulos de elasticidad de las uniones y de las pajitas.

$$\delta_{Vc} = 2 \int_0^{0,055} M(x)_{\text{pajita}} * m(x)_{\text{pajita}} * \frac{dx}{EI} + 2 \int_{0,055}^{0,075} M(x)_{\text{unión}} * m(x)_{\text{unión}} * \frac{dx}{EI}$$

Integrando obtenemos la siguiente expresión:

$$\delta_{Vc} = \frac{2}{E_{\text{pajita}} * I_{\text{pajita}}} \left( \frac{F * 0,055^3}{12} \right) + \frac{2}{E_{\text{unión}} * I_{\text{unión}}} \left( \frac{F}{4} \left( \frac{0,075^3 - 0,055^3}{3} \right) \right)$$

En la que, para nuestro problema, conocemos todos los valores excepto el módulo de elasticidad (E), sustituyendo en la ecuación para el caso de una fuerza F=4 N, obtenemos:

$$\delta_{Vc} = 7,31 * 10^{-4} = \frac{2}{3,35 * 10^9 * 1,20416 * 10^{-10}} \left( \frac{4 * 0,055^3}{12} \right) + \frac{2}{E_{\text{unión}} * 5,14710^{-12}} \left( \frac{4}{4} \left( \frac{0,075^3 - 0,055^3}{3} \right) \right)$$

Despejando, obtenemos que el módulo de elasticidad de la unión tiene un valor de:

$$E_{\text{unión}} = 7,3 * 10^{10} \text{ Pa}$$

Como conclusión podemos afirmar que la mayor fuerza soportada y la menor deformación bajo la misma carga se deben al aumento de rigidez estructural y capacidad portante proporcionados por la unión, que convierte dos elementos débiles en un conjunto mucho más eficiente mecánicamente, logrando:

- Mayor inercia efectiva
- Distribución de esfuerzos
- Restricción de deformaciones: la unión rígida impide que las pajitas se deformen libremente de forma independiente.
- Reducción de pandeo local

## Realización mediante el software SAP2000

Debido a que los pasos son muy similares a los llevados a cabo en el ensayo anterior, se obviarán los pasos iguales, pasando únicamente a explicar los que sean distintos.

En esta ocasión tendremos dos superficies diferentes a introducir en el programa, pajita y uniones. La forma de proceder será exactamente igual que en el caso anterior, con la única diferencia de que deberemos definir ambos materiales y dividir por tramos en el programa diferenciándolos, por lo que obviaremos la mayoría de pasos al ser los mismos que en el ensayo anterior.

- Dividimos el espacio de ensayo entre apoyos del programa para así más adelante añadir los materiales, como se indica en la **Figura 109**.

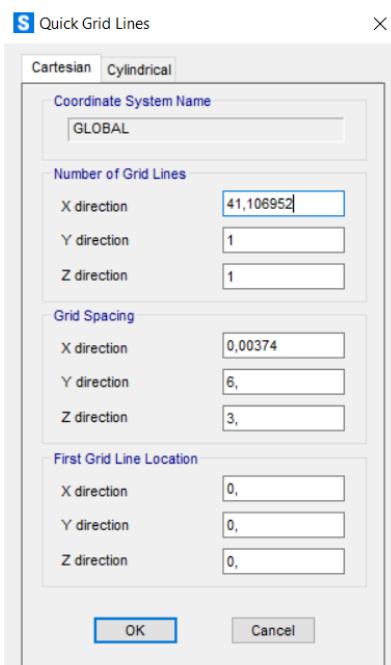


Figura 109. Dividimos el espacio que hay entre los apoyos entre lo que mide la unión.

- Definimos los materiales de la unión y de la pajita, introduciendo el módulo de elasticidad del papel calculado en el ensayo anterior y el módulo de elasticidad del acero para la unión, sabiendo que más adelante deberemos modificarlos tras calcularlo, como se ve en las **Figuras 110 y 111**.

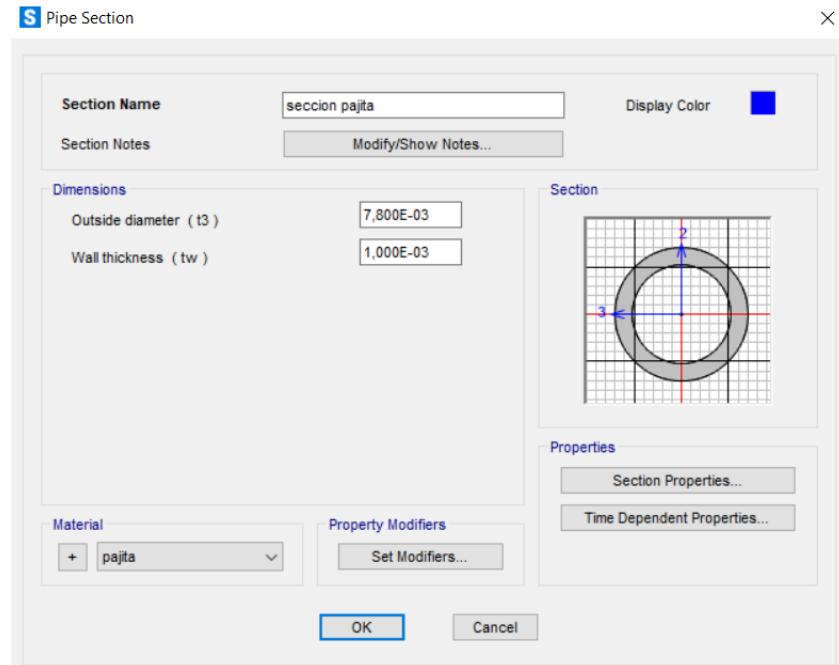


Figura 110. Definición pajita.

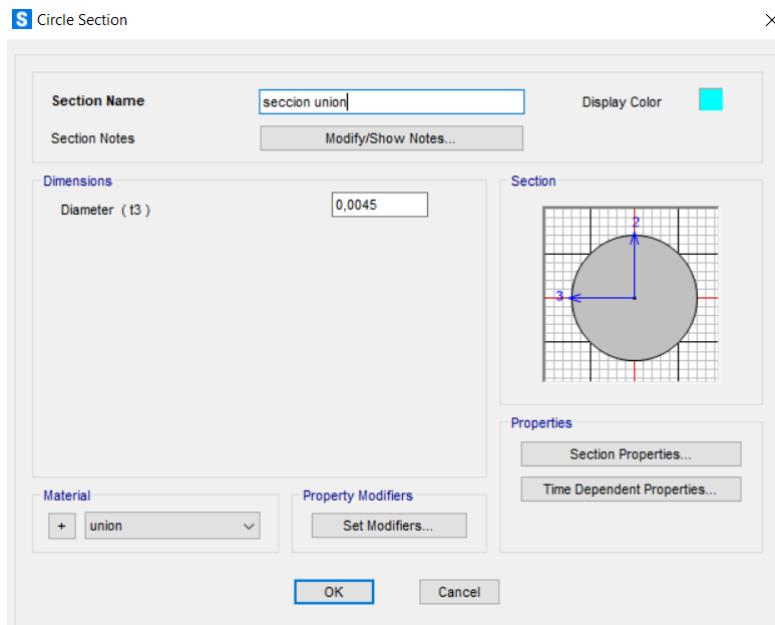


Figura 111. Definición unión.

- Definiremos qué material presenta cada tramo de los definidos al principio del ensayo, tal como se ve en la **Figura 112**.

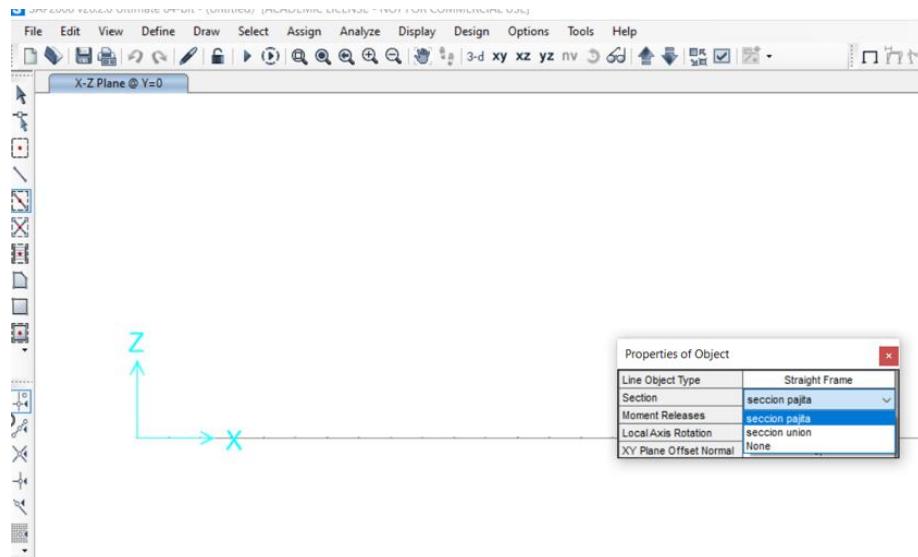


Figura 112. Definición de cada tramo de material.

- Seleccionamos qué tramos van a presentar cada material, quedando como se muestra a continuación, donde la unión son los dos tramos centrales que se presentan en color verde y las pajitas son los dos tramos que quedan a los dos lados de la unión, tal como se aprecia en la **Figura 113**.

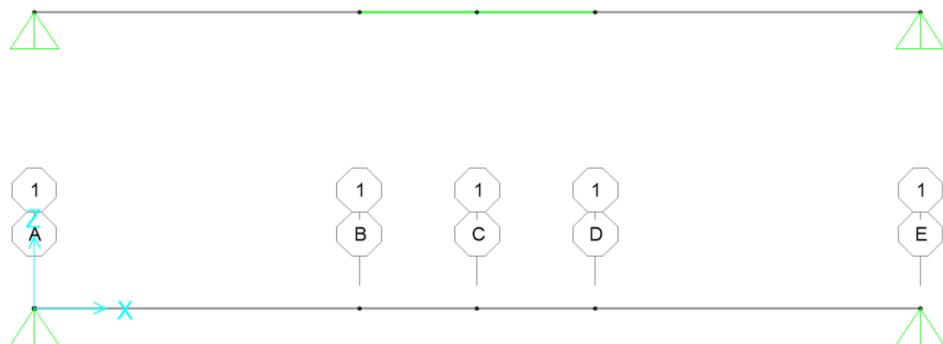


Figura 113. Situación inicial sin carga.

- Al igual que hicimos en el ensayo de solo la pajita, ejecutaremos y obtendremos el desplazamiento en el punto central de la unión, observando que presenta un desplazamiento:

$$\delta = 2,805 \times 10^{-4} \text{ m}$$

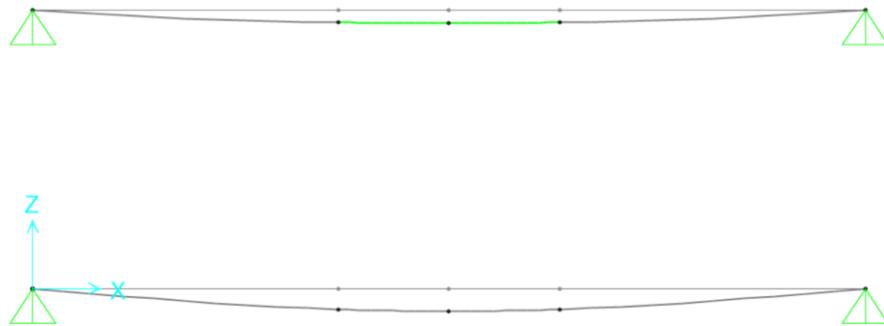


Figura 114. Deformación en 2D.

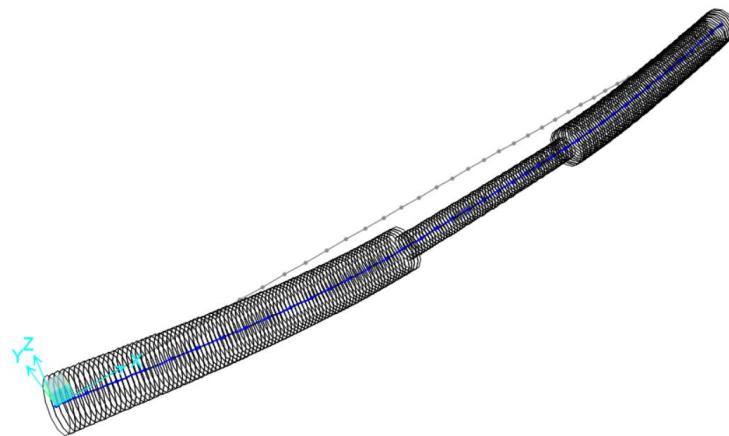


Figura 115. Deformación en 3D.

- Los resultados que nos está mostrando el programa son para una viga cuyo módulo de elasticidad de la unión es de valor  $E=2,1 \times 10^{11}$  Pa y para una fuerza aplicada de 4 N. Para calcular el módulo de elasticidad de la unión calcularemos, con los resultados escritos en las tablas y empleando una regla de tres, el desplazamiento que originaría una fuerza de 4 N. Obtendremos que, para ese valor de fuerza se originaría un desplazamiento de 0,731 mm.

Para hallar el módulo de elasticidad de la unión bastará con hacer una regla de 3 en la que relacionaremos el módulo de elasticidad del acero, el desplazamiento experimentado por la barra, habiendo supuesto un módulo de elasticidad de unión igual al del acero, el módulo de elasticidad de la unión (desconocido) y el desplazamiento experimentado por la pajita para una fuerza de 4 N.

$$\frac{E_{\text{unión}}}{E_{\text{acero}}} = \frac{\delta_{\text{acero}}}{\delta_{\text{unión}}}$$

$$\delta_{\text{acero}} = -2,805 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\delta_{\text{unión}} = -7,31 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$E_{\text{acero}} = 2,1 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$E_{\text{unión}} = \frac{\delta_{\text{acero}}}{\delta_{\text{unión}}} \times E_{\text{acero}} = 7,675 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

Valor que observamos que es muy próximo al que se calculó numéricamente con los datos obtenidos de los ensayos en el laboratorio, concluyendo que el valor obtenido por ambas vías es correcto.

- Una vez obtenido este valor, volveremos al programa y cambiaremos el módulo de elasticidad de  $2,1 \times 10^{11}$  a  $7,675 \times 10^{10}$  Pa en la unión. Volveremos a ejecutar la operación y haciendo de nuevo “click” derecho sobre el punto de desplazamiento máximo hallaremos que este presenta un valor de  $7,626 \times 10^{-4}$  m, valor que es muy próximo al que obtuvimos con los datos de las tablas, como se observa en la **Figura 116**.

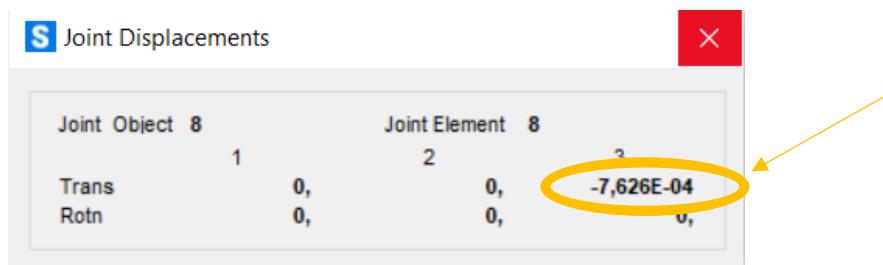


Figura 116. Valor de desplazamiento obtenido mediante el programa.

Se observa que el valor de desplazamiento del ensayo de flexión con unión es mayor que el obtenido en el ensayo de flexión sin hacer uso de las uniones. Esto puede resultar llamativo en un primer momento ya que al emplear las uniones lo esperado sería que el conjunto se volviera más rígido y el desplazamiento del mismo fuera menos que sin hacer uso de las uniones. Que ocurra justo lo contrario puede deberse a que al introducir las uniones de forma interior en las pajitas y cargar, las uniones impidan la deformación en los puntos en los que se encuentra presente, pero traslade dicha deformación a los puntos en los que ya no hay unión, ocasionando una mayor deformación que en el caso en que no se emplean las uniones.

#### 4.1.3 Realización del ensayo de compresión.

Al contrario de los ensayos de flexión, los ensayos de compresión se realizarán únicamente a las pajitas sin uniones y solo se realizarán de forma manual en el laboratorio, no se empleará ningún software de simulación en esta ocasión. El objetivo de este ensayo será obtener la fuerza máxima o también llamada carga crítica de pandeo que soportan las pajitas antes de que se produzca la deformación plástica sobre la misma. En esta ocasión solo nos interesarán los datos de fuerza obtenidos mediante la célula de carga, por lo que para este experimento el láser no

se utilizará y donde antes se encontraba el mismo, situaremos un cubo de madera que hará de tope a la pajita.

Colocaremos la pajita de manera perpendicular a la célula de carga y al bloque de madera. En la **Figura 117**, se puede observar el aspecto que presenta el ensayo en su estado inicial sin cargar.



Figura 117. Situación inicial del ensayo sin carga.

Al igual que en el resto de ensayos, emplearemos el software DEWEsoftX2, versión SP10 para el registro de los datos, siendo la forma de proceder exactamente la misma que en los ensayos de flexión con la única diferencia que, como ya se ha mencionado, en esta ocasión no habrá datos de desplazamiento.

El objetivo de este ensayo será calcular la fuerza máxima que alcanza nuestro elemento estructural antes de que ocurra el pandeo. La forma de realizar los ensayos será muy sencilla. Una vez tengamos la pajita colocada en la posición inicial sin cargar mostrada en la imagen superior, comenzaremos a aplicar fuerza sobre la célula de carga de manera que la pajita comience a comprimirse hasta que no soporte más fuerza y ocurra el pandeo, apareciendo una deformación permanente en la pajita. La fuerza aplicada justo antes de que ocurra dicha deformación será el valor que nos interese.

Para calcular dicha fuerza nos apoyaremos en la herramienta Excel, mediante la cual representaremos una gráfica con los datos obtenidos en el software para el registro de los datos, como se puede apreciar en la **Figura 118**.

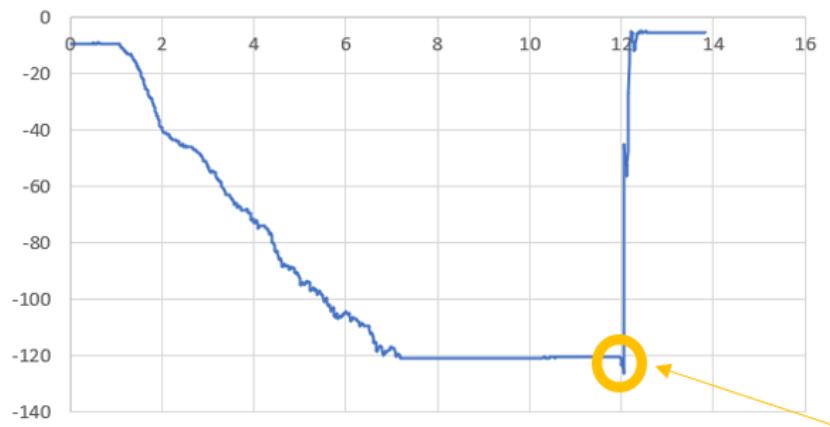


Figura 118. Gráfica obtenida en el ensayo de compresión 4.

En la **Figura 119** se muestra cómo queda la pajita una vez aparece la deformación.



Figura 119. Deformación tras superar la fuerza de pandeo.

A continuación, se muestra una tabla en la que se presentan las fuerzas máximas que soportaron las pajitas en cada uno de los ensayos de compresión llevados a cabo, indicados en la **Tabla 4**.

ENSAYO	FUERZA MÁXIMA (N)
1	126,193
2	123,729
3	126,223
4	124,449
5	127,1295

Tabla 4. Datos obtenidos del ensayo de compresión

Como se puede ver en la **Figura 120**, se realizaron varios ensayos para garantizar la validez de los resultados, observando que para diferentes pajitas los resultados obtenidos fueron bastante similares y además las pajitas tendían a deformarse por secciones muy próximas unas a otras en todos los ensayos realizados, pudiendo suponer que el comportamiento mecánico de las pajitas se considera homogéneo, presentando propiedades similares entre unidades, por lo que la respuesta estructural no depende significativamente de cuál se seleccione para el ensayo.



Figura 120. Deformación experimentada en los diferentes ensayos.

También podemos calcular el módulo de elasticidad del material por medio de la fórmula de la carga crítica de pandeo

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

Donde:

- $P_{cr}$  es la carga crítica de pandeo
- $E$  es el módulo de elasticidad
- $I$  es la inercia de la sección transversal de la pajita
- $L$  es la longitud transversal de la pajita
- $K$  es un factor que depende de las condiciones de apoyo finales

Realizando los cálculos obtenemos que el valor del módulo de elasticidad es de  $3.356 \times 10^9$  Pa, valor que es muy próximo al obtenido anteriormente en los ensayos de flexión de la pajita sin unión.

#### 4.1.4 Ensayo de tracción

Este ensayo al igual que el ensayo de compresión, únicamente se realizará de forma manual en el laboratorio, no se emplearán softwares de simulación en esta ocasión.

Para la realización de este ensayo se diseñaron unas uniones específicas, las cuales ya se mencionaron en el apartado de materiales, que constarán de una parte que se introducirá de forma roscada en uno de los extremos de la pajita y un agujero interior mediante el cual anclaremos la célula de carga a la unión y en consecuencia a la pajita. En el extremo opuesto se insertará otra unión que nos permitirá sujetar la pajita a un bloque de madera anclado a la tabla de ensayos de modo que quede ese extremo solidario al conjunto bloque-tabla. En la **Figura 121**, se observa cómo queda sujetada la pajita una vez se ha introducido la pieza roscada en su interior, viendo claramente que queda perfectamente anclada mediante el sistema diseñado.



Figura 121. Nervios marcados en la superficie de la pajita al introducir la rosca de la unión.

Al igual que en el ensayo de compresión, solo nos interesarán los datos de fuerza obtenidos mediante la célula de carga, por lo que para este experimento el láser no se utilizará y donde antes se encontraba el mismo, situaremos un cubo de madera al que se anclará la pajita.

En la **Figura 122** se puede observar el aspecto que presenta el ensayo en su estado inicial sin cargar.



Figura 122. Situación inicial del ensayo sin cargar.

Al igual que en el resto de ensayos, emplearemos el software DEWEsoftX2, versión SP10 para el registro de los datos, siendo la forma de proceder exactamente la misma que en los ensayos de compresión, sabiendo que en esta ocasión no habrá datos de desplazamiento.

El objetivo de estos ensayos es anclar a pajita en uno de sus extremos y traccionar en el extremo opuesto por medio de la célula de carga, comprobando cuál es la fuerza máxima que alcanza el conjunto hasta que se produce la separación de sus componentes.

Una vez tengamos la pajita colocada en la posición inicial sin cargar mostrada en la imagen superior, comenzaremos a aplicar fuerza a tracción y de forma progresiva sobre la célula de carga hasta lograr separar el conjunto formado por la unión y la pajita. La fuerza alcanzada justo antes de que ocurra esto será el valor que nos interese.

Para calcular dicha fuerza nos apoyaremos en la herramienta Excel, mediante la cual representaremos una gráfica con los datos obtenidos en el software para el registro de los datos, tal como se ve en la **Figura 123**.

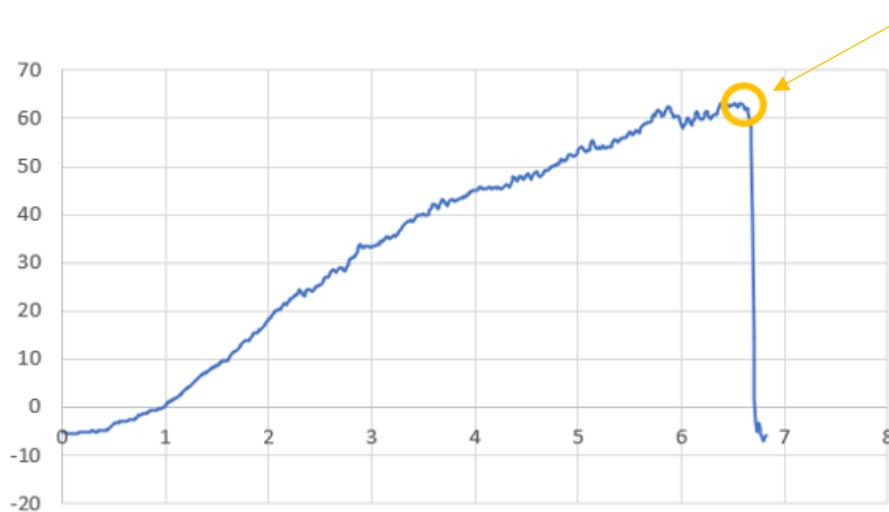


Figura 123. Gráfica obtenida del ensayo de tracción 1

En la **Figura 124**, se muestra como la unión ha desgarrado la superficie interior de la pajita al alcanzar la fuerza máxima y separarse ambos componentes.



Figura 124. Superficie interior desgarrada tras alcanzar la fuerza máxima.

A continuación, se muestra una tabla en la que se presentan las fuerzas máximas que soportaron las pajitas en cada uno de los ensayos de compresión llevados a cabo, indicadas en la **Tabla 5**.

ENSAYO	FUERZA MÁXIMA (N)
1	62,624
2	59,152
3	58,89
4	57,37
5	54,567

Tabla 5. Datos obtenidos en el ensayo de tracción

Como se puede observar, se realizaron diferentes ensayos para garantizar la validez de los resultados y descartar que existiera variabilidad entre las diferentes pajitas

utilizadas, comprobando que obtenemos resultados bastante similares en cada uno de los ensayos, pudiendo afirmar que las pajitas presentan características similares y la respuesta no depende significativamente de cuál se seleccione para el ensayo. Sin embargo, se puede observar una clara tendencia descendente de la fuerza máxima necesaria que debemos aplicar, lo cual puede ser debido al desgaste de la unión al someterla de forma continuada a esfuerzos de tracción y que esta pudiera acabar acusando estos esfuerzos, llegándose a desgastar, de forma no apreciable a simple vista, la rosca de la unión.

#### 4.2 Proceso experimental para el estudio de la resistencia del pórtico

El objetivo de estos ensayos consiste en, una vez ya tenemos caracterizados tanto la pajita como las uniones, comprobar la resistencia del pórtico conformado con los materiales caracterizados en los ensayos anteriores frente a diferentes situaciones de carga.

##### 4.2.1 Montaje y dimensiones del pórtico a estudiar

Se va a construir un pórtico simétrico mediante el uso de las uniones diseñadas a lo largo de este trabajo fin de grado y pajitas. A continuación, se aporta una imagen en la que se muestran las dimensiones del pórtico, así como los elementos de unión empleados para conformar el mismo, mostrados en la **Figura 125**.

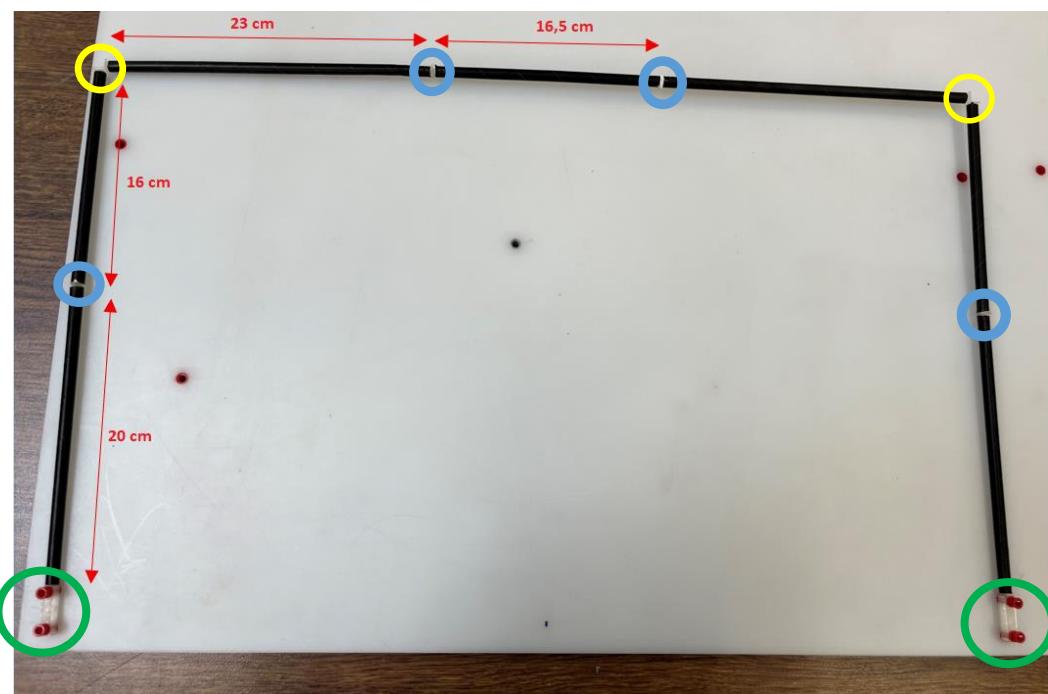


Figura 125. Componentes y dimensiones del pórtico

Para unir las pajitas se emplearon las siguientes uniones:

- 2 uniones pajita-tabla de ensayos, señaladas en verde.
- 2 uniones de 90°, señaladas en amarillo.
- 4 uniones simples, señaladas en azul.

Es importante tener en cuenta que el tronco de cono de las uniones tiene una longitud de 2 cm.

El objetivo de este ensayo es someter al pórtico a diferentes situaciones de carga y observar cómo se comporta y qué desplazamientos y posibles deformaciones ocurren, así como comprobar la forma en la que reaccionan las uniones y si funcionan de manera correcta.

Se van a llevar a cabo dos situaciones de carga diferentes, una primera en la que se someterá al conjunto a una carga vertical que actuará sobre el punto medio de la parte horizontal del pórtico y una segunda situación en la que se aplicará una carga horizontal sobre el nudo izquierdo de 90°.

#### 4.2.2 Ensayo del pórtico para el caso de carga vertical aplicada en el punto medio de la barra horizontal.

Este ensayo consistirá en ir aplicando, de forma progresiva, una fuerza vertical sobre el punto medio de la barra horizontal del pórtico y al igual que hicimos en el resto de ensayos, ir registrando los datos de fuerza y desplazamiento medidos por célula de carga y el láser, respectivamente.

La disposición inicial del pórtico sin cargar era la siguiente, indicado en la **Figura 126**.

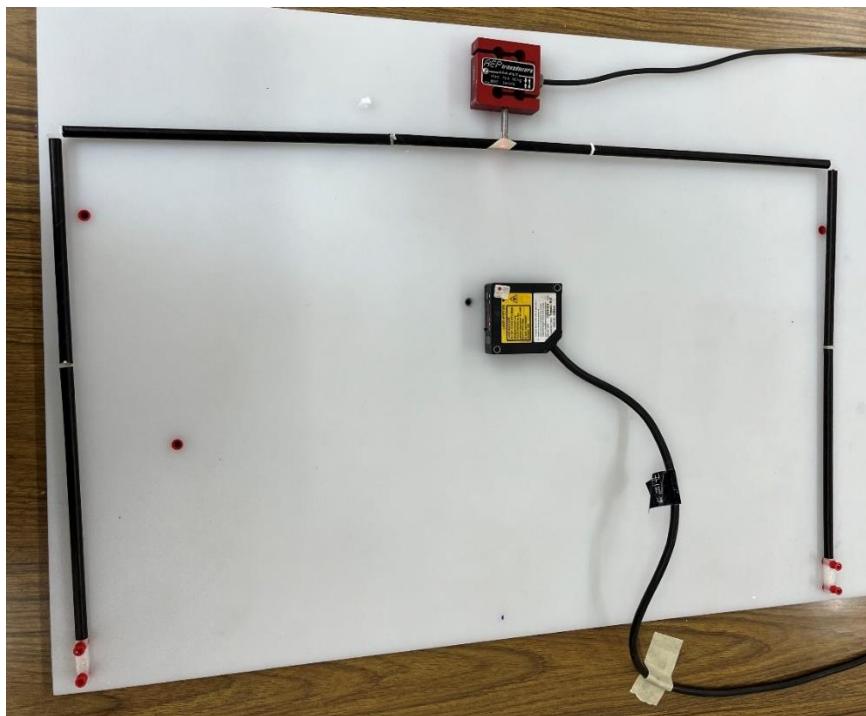


Figura 126. Ensayo del pórtico para fuerza vertical sin cargar

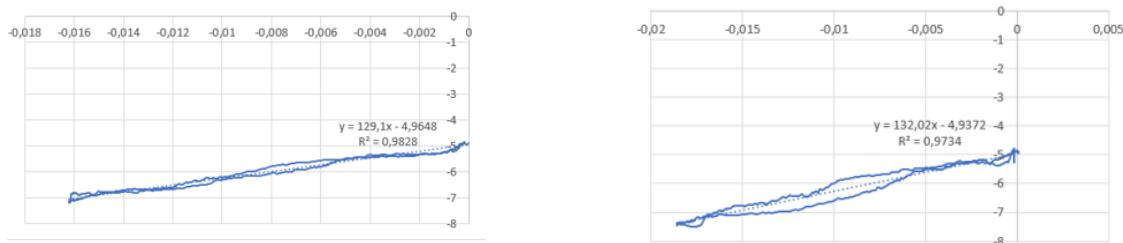
La forma de proceder en este ensayo será exactamente igual que en el ensayo de flexión de únicamente la pajita, por lo que se va a obviar la explicación del empleo del software DEWEsoftX2 así como la utilización de Excel para el manejo de los datos. Pasaremos a exponer directamente los resultados que obtenemos fruto de los ensayos.

Como se hizo en el resto de ensayos, se ha realizado una tabla en la que se muestran parámetros obtenidos durante los mismos, mostrados de forma clara y ordenada en la **Tabla 6**.

ENSAYO	FUERZA MÁXIMA (N)	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO (M)	PENDIENTE DE CARGA	PENDIENTE DE DESCARGA	MEDIA DE LAS PENDIENTES	PENDIENTE EXPERIMENTAL
1	7,1627	0,01575	129,79	136	132,895	120,48
2	7,1858	0,016202	136,175	113,6	124,8875	129,1
3	7,285452	0,0173818	133,352	122,38	127,866	132,51
4	7,49165	0,0186	123,41	142,384	132,897	132,02

Tabla 6. Datos obtenidos en el ensayo del pórtico de fuerza vertical

Se puede observar cómo en este ensayo, para fuerza de valores no muy elevados se logran desplazamientos considerables. También se observa que los valores de las pendientes son muy similares, por lo que el comportamiento del pórtico a lo largo de los ensayos ha sido homogéneo, como se aprecia en las **Figuras 127 y 128**.



Figuras 127 y 128. Comparativa entre ensayos diferentes del ensayo de fuerza vertical

## Realización del ensayo anterior en el programa SAP2000.

La realización de este ensayo en el programa SAP2000 será similar a los realizados anteriormente, aunque sin embargo habrá detalles que cambiarán con respecto al resto de casos. Aprovechando que en el ensayo de flexión de las pajitas con unión ya definimos tantos los materiales como las respectivas secciones, partiremos de este modelo para la realización de este ensayo, ahorrándonos definir de nuevo todos los parámetros tanto de los materiales como de las secciones.

En esta ocasión, se realizarán las divisiones del modelo fijándonos en las dimensiones mencionadas al principio de este apartado, para llevar a cabo la simulación del ensayo, como se muestra en la **Figura 129**.

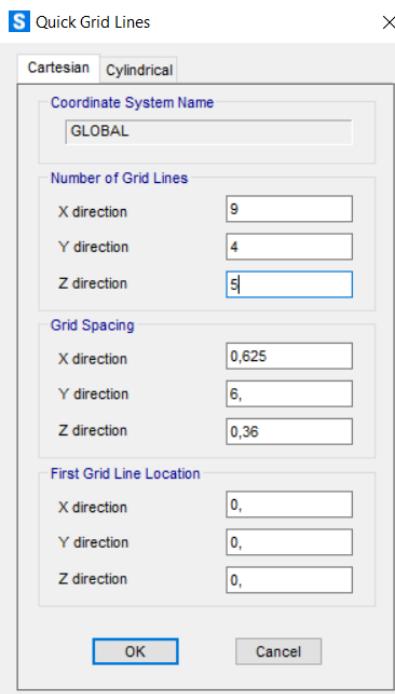


Figura 129. Divisiones del modelo

Seleccionamos que nos muestre el dibujo en el sistema de referencia xz, al igual que lo hemos hecho en el resto de casos y modificaremos el tamaño de las burbujas. También ajustaremos las divisiones según los diferentes tramos que presente nuestro pórtico, fijándonos en los diferentes tramos que presenta cada material, prestando atención a la presente más arriba. Para ello, click derecho sobre el fondo blanco y pinchamos en la opción de “Edit Grid Data”. Pinchamos en la opción de “Modify/Show system”, como queda reflejado en la **Figura 130**.

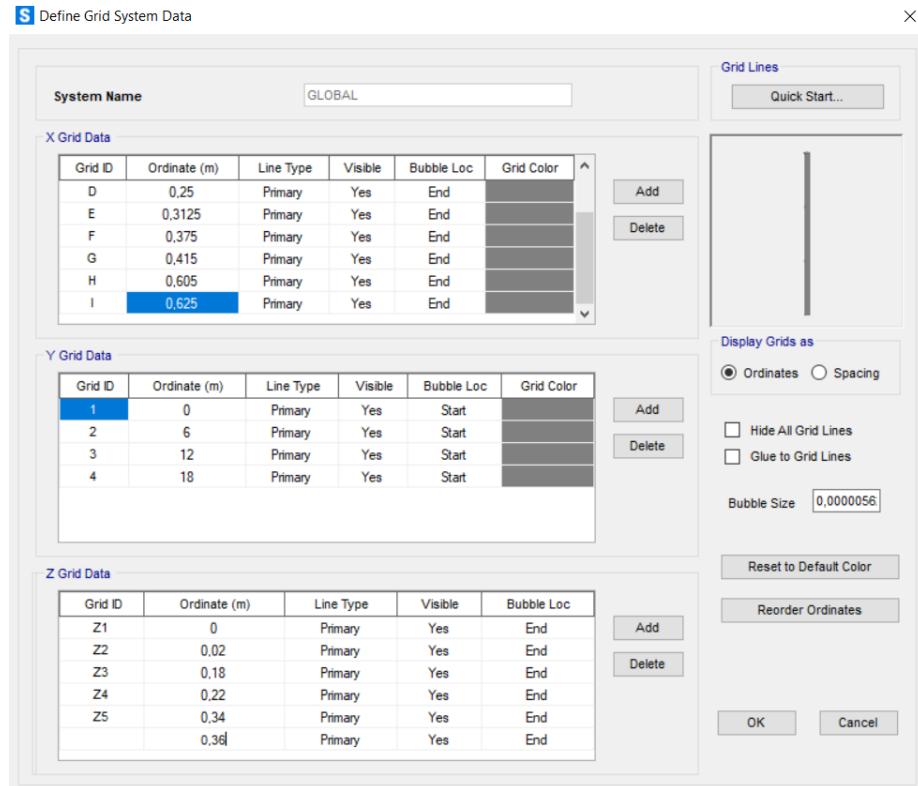


Figura 130. Configuración del modelo

Quedando el modelo distribuido del siguiente modo, mostrado en la **Figura 131**:

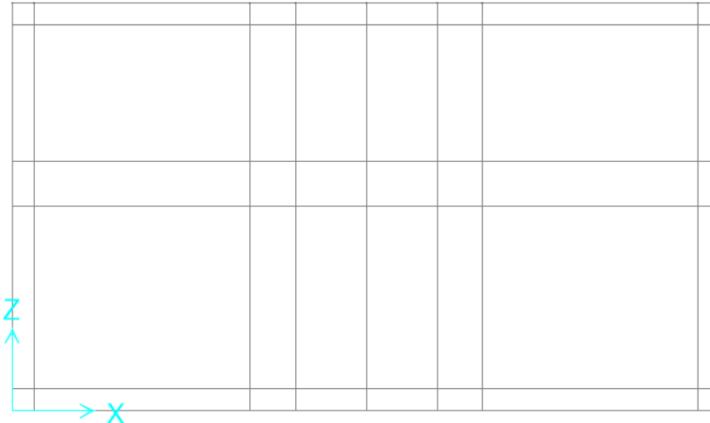


Figura 131. Modelo tras hacer las divisiones

Lo siguiente que deberemos hacer, será seleccionar el material que presenta cada uno de los tramos definidos en el paso anterior, para ello haremos “click” en la casilla “Quick Draw Frame/Cable”, sabiendo que debemos distinguir entre los tramos de unión y los de pajita, como se indica en la **Figura 132**.

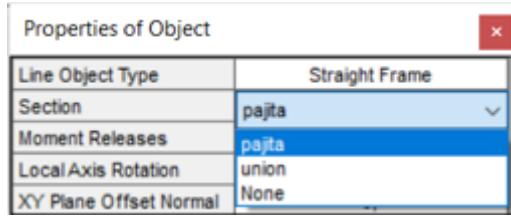


Figura 132. Selección del material en cada tramo

Cambiaremos los colores para poder distinguir más fácilmente los tramos diferentes del pórtico dependiendo del material del cual estén hechos, mostrando en color azul los tramos de pajita y en morado los tramos de unión, tal como se ve en la **Figura 133.**

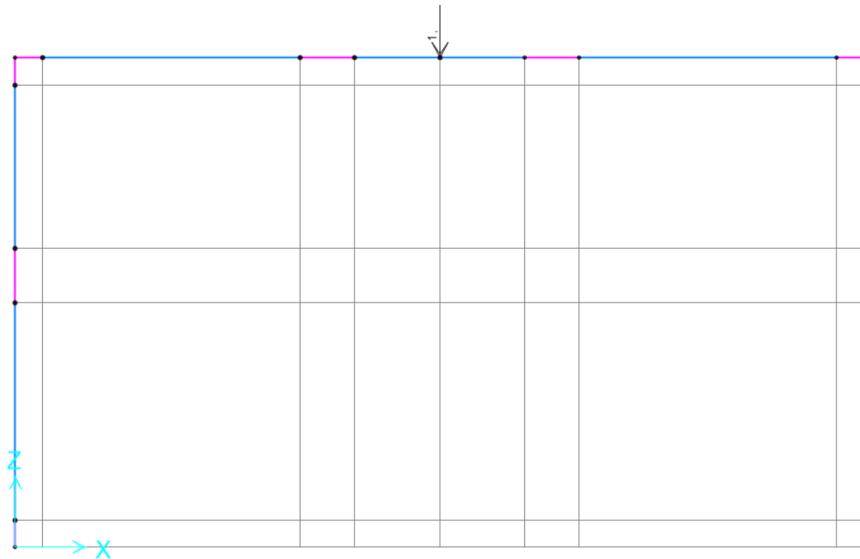


Figura 133. Aspecto del modelo tras definir el material en cada tramo

Ahora deberemos añadir los apoyos del pórtico, pero ello pinchamos en “Assign”, seleccionando la opción de “Joint” y finalmente haremos “click” en “Restraints”, seleccionando los nudos en los que vayamos a poner el apoyo, que en esta ocasión serán los nudos en los que tenemos presentes las uniones pajita-tabla de ensayos, modelando esta unión a la tabla de ensayos como un empotramiento, como se indica en la **Figura 134.**

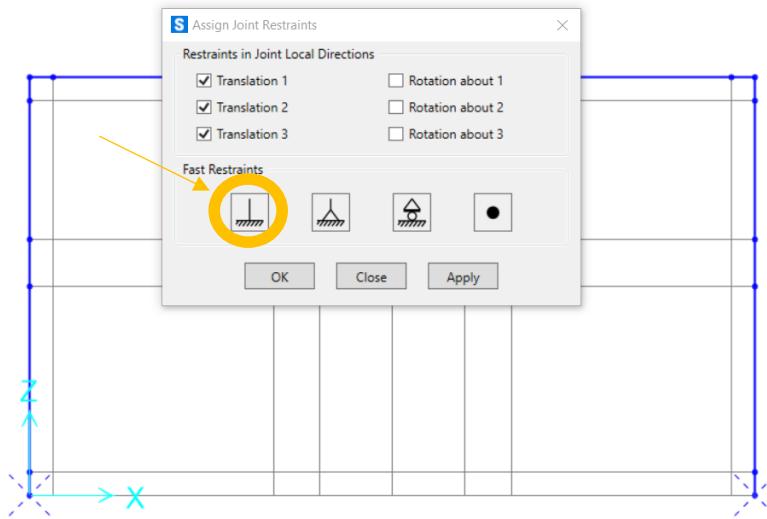


Figura 134. Implementación de los apoyos

Observando cómo se han situado en los dos nudos mencionados anteriormente un empotramiento, tal como se observa en la **Figura 135**.

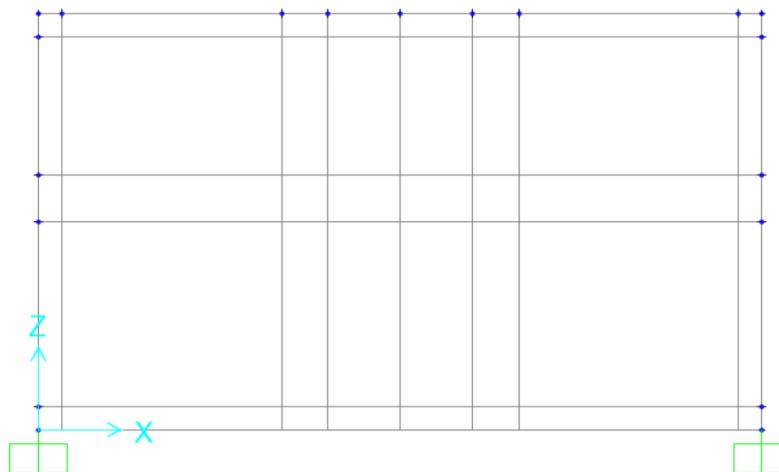
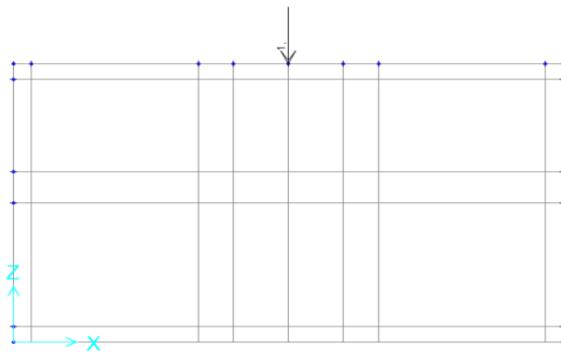
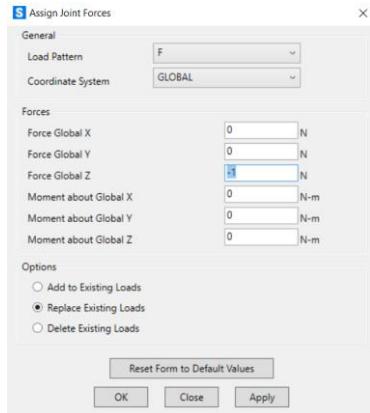


Figura 135. Aspecto del modelo tras introducir los apoyos

Ahora deberemos añadir la carga, para ello haremos serán pinchar sobre el nudo en el que queramos situar la fuerza puntual. Tras ello, haremos “click” en “Assign”, seleccionando la opción de “Joint Loads” y haremos “click” en “Forces”, seleccionando la opción de la fuerza F y un valor en z de -1, como se puede apreciar en las **Figuras 136 y 137**.



Figuras 136 y 137. Definición de la fuerza que actúa sobre el pórtico

Una vez hayamos hecho todo lo anterior, pasaremos a ejecutar el modelo al igual que hicimos en los ensayos anteriores y obtendremos la deformada del pórtico. Es importante recordar, que al igual que hicimos en los casos anteriores, deberemos seleccionar en “Case/Combo Name” nuestra fuerza “F”, también deberemos marcar la opción “Wire Shadow” para que el programa nos dibuje la indeformada, como se ve en la **Figura 138**.

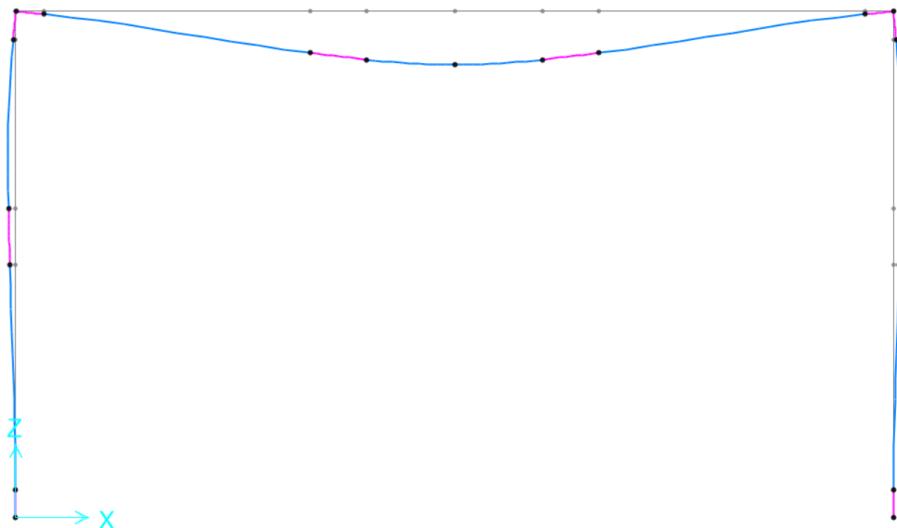


Figura 138. Deformación experimentada por el pórtico en el ensayo de fuerza vertical

Haciendo “click” derecho sobre el nudo en el que está aplicada la fuerza vertical, obtenemos que el programa calcula que este sufrirá un desplazamiento de valor  $\delta = -3,81$  mm en la dirección negativa del eje z para una fuerza vertical aplicada  $F = -1$  N, como se observa en la **Figura 139**.

S Joint Displacements			X
Joint Object 8		Joint Element 8	
1		2	
Trans	0,	0,	-0,00381
Rotn	0,	0,	0,

Figura 139. Desplazamiento sufrido por el punto en el que se aplica la fuerza

Con los valores de desplazamiento obtenidos experimentalmente que se expusieron anteriormente en la tabla, calcularemos utilizando una regla de tres, qué desplazamiento sufriría ese nudo para una fuerza aplicada de 1 N, obteniendo un valor de desplazamiento de  $\delta = -2,48$  mm.

Observamos que, aunque el valor del desplazamiento obtenido no es exactamente el mismo, los valores son relativamente próximos. Los motivos de que no se haya obtenido el mismo desplazamiento por los dos medios estudiados puede deberse a imperfecciones y comportamientos no predecibles de las pajitas y las uniones, concluyendo que el valor más correcto será el obtenido mediante el software SAP2000.

Con el objetivo de apreciar la semejanza de los resultados obtenidos de manera experimental en el laboratorio y los obtenidos mediante el software de simulación SAP2000, se superpusieron ambas deformaciones, pudiéndose ver que los resultados obtenidos son notablemente similares, tal como se aprecia en la Figura 140.



Figura 140. Comparación de las deformadas

También, en esta ocasión generamos las reacciones y los diagramas de esfuerzos del pórtico tras la deformación. En el caso de las reacciones haremos "click" en "Display", seleccionar en la ventana emergente la opción "Show

Forces/Stresses” y finalmente seleccionar la opción “Joints”, marcando en la ventana emergente nuestra fuerza F, como se indica en la **Figura 141**.



Figura 141. Reacciones en el ensayo de fuerza vertical

Para generar los diagramas de esfuerzos, deberemos hacer “click” en “Display”, seleccionar en la ventana emergente la opción “Show Forces/Stresses” y finalmente seleccionar la opción “Frames/Cables/Tendons” en la nueva ventana que se genera, como se ve en la **Figura 142**.

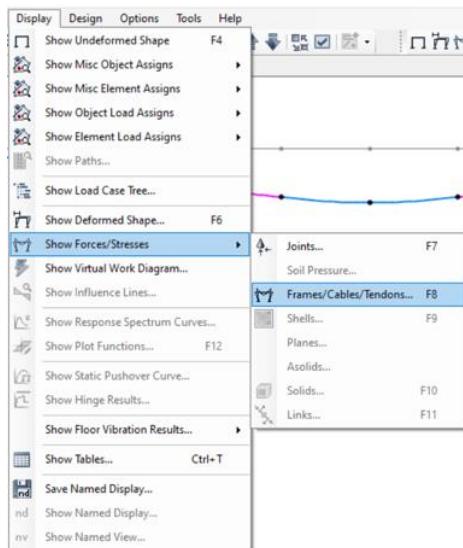


Figura 142. Generamos los diagramas de esfuerzos

Seleccionaremos nuestra fuerza F y el tipo de diagrama de esfuerzo que deseamos generar, teniendo en cuenta que el cortante que debemos seleccionar en el programa es el 2 y el flector el 3.

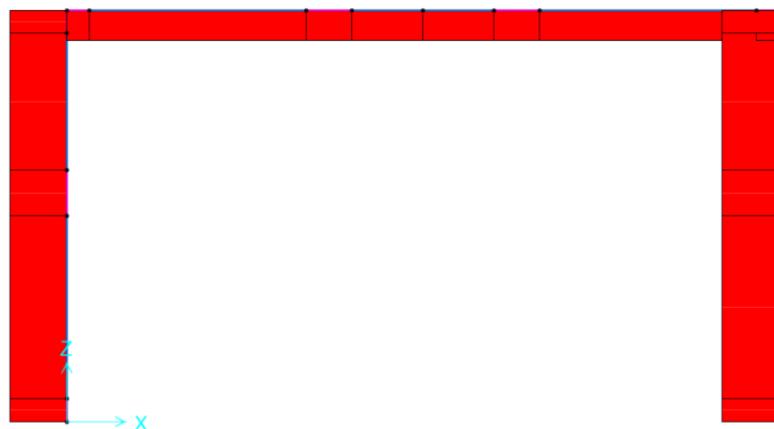


Figura 143. Diagrama de axiles del pórtico en el ensayo de fuerza vertical

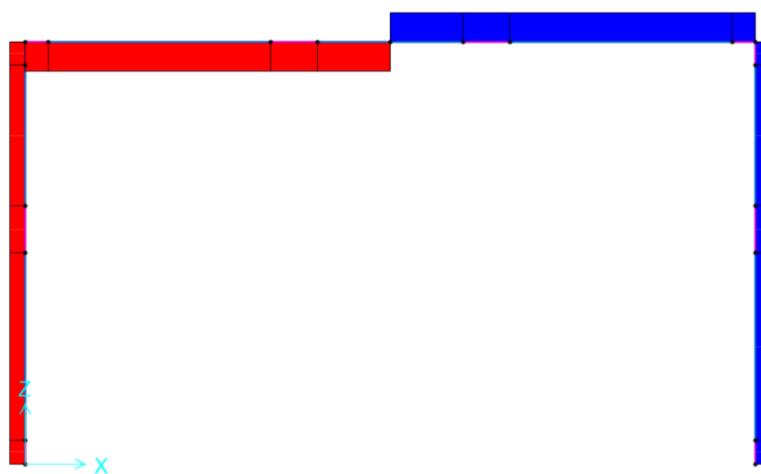


Figura 144. Diagrama de cortantes del pórtico en el ensayo de fuerza vertical

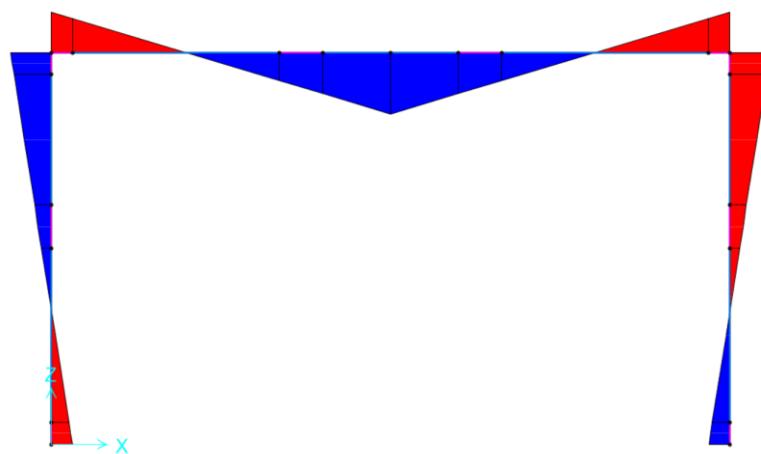


Figura 145. Diagrama de axiles del pórtico en el ensayo de fuerza vertical

Observando los diagramas de esfuerzos podemos hacernos una idea de cuál es el punto o los puntos más críticos en nuestra estructura. Teniendo en cuenta que esfuerzo más perjudicial al que se va a poder enfrentar nuestro pórtico será la flexión y fijándonos en su diagrama, se puede observar como el punto de mayor

flector es el punto sobre el que se aplica la fuerza con un valor de momento flector de aproximadamente 0,0942 Nm, como se ve en la **Figura 146**, por lo que podemos esperar que este sea el punto más crítico de nuestra estructura y, por tanto, el primero que fallaría en caso de alcanzar la fuerza necesaria para ello.

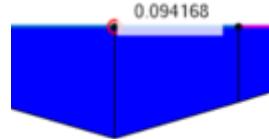


Figura 146. Valor del punto con mayor momento flector en el ensayo de fuerza vertical

#### 4.2.3 Ensayo del pórtico para el caso de carga horizontal aplicada en la esquina izquierda del pórtico

Este ensayo consistirá en ir aplicando, de forma progresiva, una fuerza horizontal sobre la esquina izquierda del pórtico y al igual que hicimos en el resto de ensayos, ir registrando los datos de fuerza y desplazamiento medidos por célula de carga y el láser, respectivamente.

La disposición inicial del pórtico sin cargar era la siguiente, mostrado en la **Figura 147**.

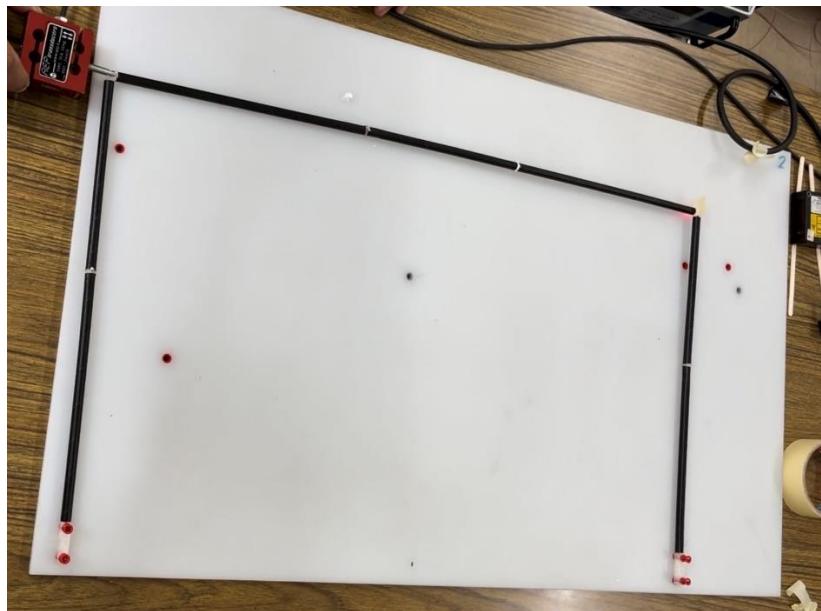


Figura 147. Ensayo del pórtico para fuerza horizontal sin cargar

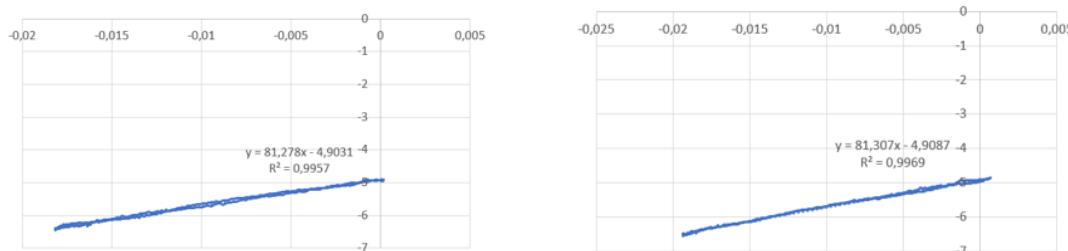
En cuanto a la realización experimental del ensayo, la forma de proceder será exactamente igual que en el caso anterior, iremos cargando progresivamente y finalmente obtendremos los siguientes datos de fuerza y desplazamiento expresados por medio de la **Tabla 7**.

ENSAYO	FUERZA MÁXIMA (N)	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO (M)	PENDIENTE DE CARGA	PENDIENTE DE DESCARGA	MEDIA DE LAS PENDIENTES	PENDIENTE EXPERIMENTAL
1	6,003	0,01264	82,878	75,972	79,425	81,002
2	6,2475	0,01508	83,932	83,932	83,932	84,227
3	6,4495	0,01814	83,27	83,27	83,27	81,278
4	6,5482	0,01937	82,648	82,648	82,648	81,307
5	6,4732	0,01963	81,756	77,62	79,688	76,012

Tabla 7. Datos obtenidos en el ensayo del pórtico de fuerza horizontal

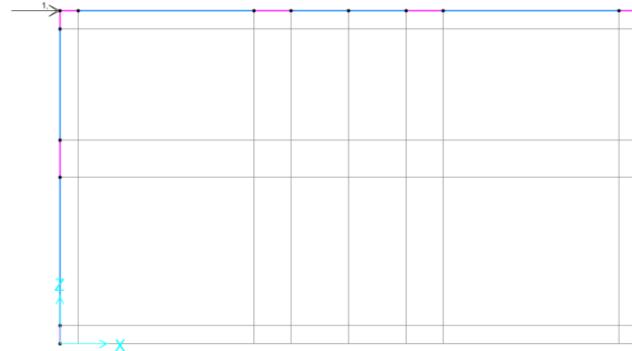
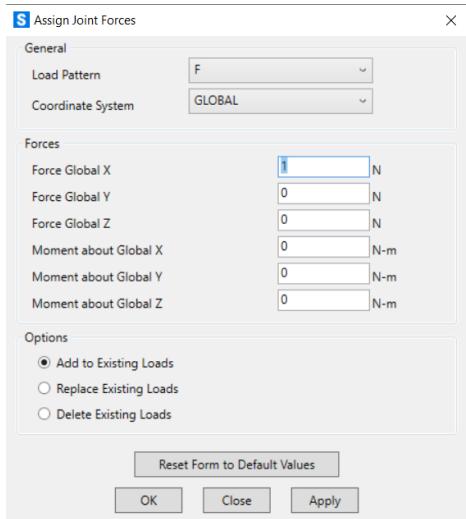
Observamos que al igual que en el caso anterior se logran desplazamiento elevados para valores de fuerza relativamente pequeños, viendo además que en este caso los valores de desplazamiento alcanzado para fuerzas menores son mayores, por lo que el pórtico es menos rígido en este punto que en el punto de estudio del ensayo anterior.

También se observa que los valores de las pendientes son muy similares, por lo que el comportamiento del pórtico a lo largo de los ensayos ha sido homogéneo, observando también que las líneas de carga y de descarga son prácticamente coincidentes, por lo que el comportamiento del pórtico al cargar y descargar se podría decir que es igual, tal como se aprecia en las **Figuras 148 y 149**.



Figuras 148 y 149. Comparativa entre ensayos diferentes del ensayo de fuerza horizontal

En cuanto a la realización del ensayo en SAP2000, los pasos a seguir serán los mismos que en el ensayo anterior a excepción del paso para definir la fuerza, debiendo introducir en este caso la carga en el nudo que es la esquina superior izquierda. Tras ello, haremos "click" en "Assign", seleccionando la opción de "Joint Loads" y haremos "click" en "Forces", seleccionando la opción de la fuerza F y un valor en x de 1, como se indica en las **Figuras 150 y 151**.



Figuras 150 y 151. Definición de la fuerza horizontal aplicada sobre el nudo

Ejecutando el modelo resultante obtendremos la siguiente deformación del pórtico, mostrada en la **Figura 152**.

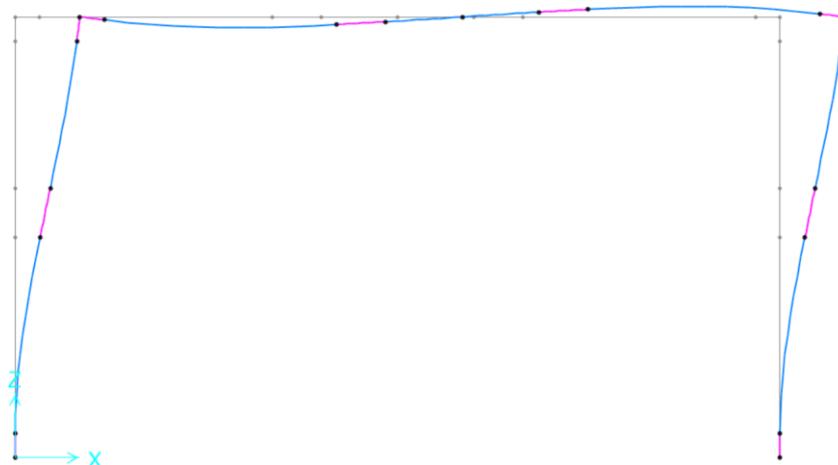


Figura 152. Deformación experimentada por el pórtico en el ensayo de fuerza horizontal

Haciendo “click” derecho sobre el nudo en el que está aplicada la fuerza horizontal, obtenemos que el programa calcula que este sufrirá un desplazamiento de valor  $\delta=5,89$  mm en la dirección positiva del eje x para una fuerza horizontal aplicada  $F=1$  N, tal como se observa en la **Figura 153**.

Joint Object 17		Joint Element 17	
Trans	1 0,00589	2 0, 0,01405	3 0, 0,
Rotn	0,		

Figura 153. Desplazamiento experimentado por el nudo de aplicación de la fuerza

Con los valores de desplazamiento obtenidos experimentalmente que se expusieron anteriormente en la tabla, calcularemos utilizando una regla de tres, qué desplazamiento sufriría ese nudo para una fuerza aplicada de 1 N, obteniendo un valor de desplazamiento de  $\delta=3,03$  mm.

Se puede observar que, aunque los valores de desplazamiento calculados por ambas vías no coinciden, tienen valores relativamente próximos y que, como en el caso anterior, la diferencia en valor se puede deber a imperfecciones en las uniones o en las pajitas y comportamientos no ideales de los mismos.

A continuación, se muestran las deformadas obtenidas por ambos métodos con el objetivo de apreciar la semejanza de los resultados obtenidos por ambas vías, indicadas en la **Figura 154**.



Figura 154. Comparación de las deformadas

Al igual que en el caso anterior, generaremos las reacciones y los diagramas de esfuerzos, obteniendo:



Figura 155. Reacciones en el ensayo de fuerza horizontal

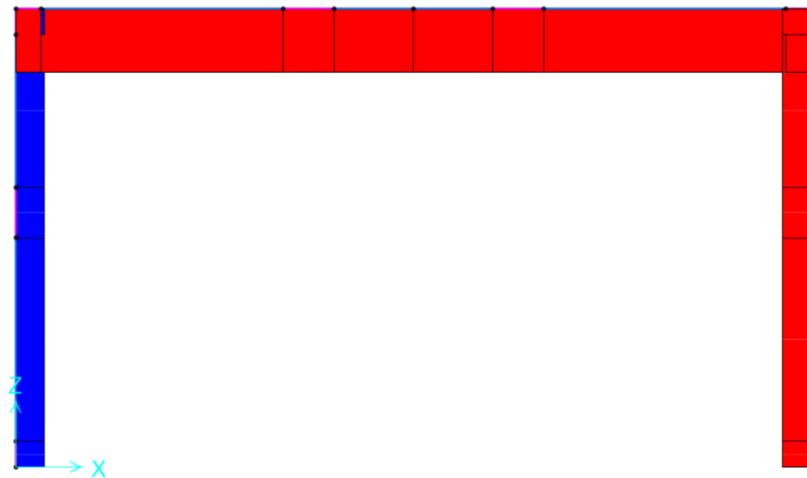


Figura 156. Diagrama de axiles del pórtico en el ensayo de fuerza horizontal

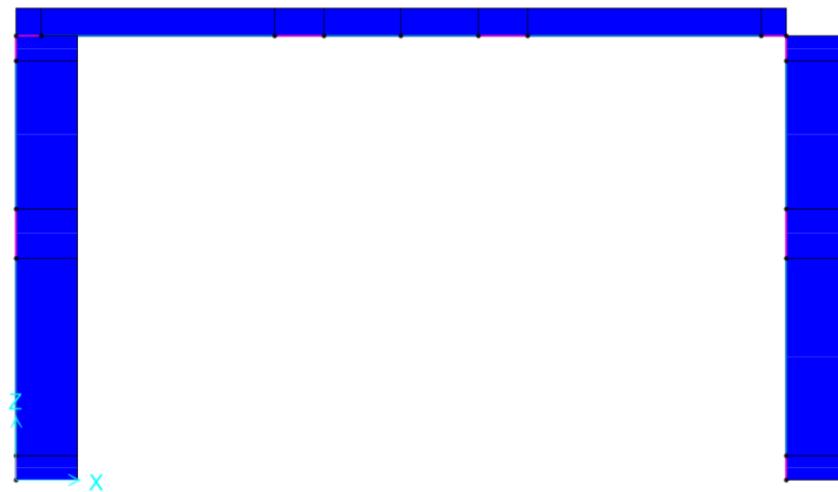


Figura 157. Diagrama de cortantes del pórtico en el ensayo de fuerza horizontal

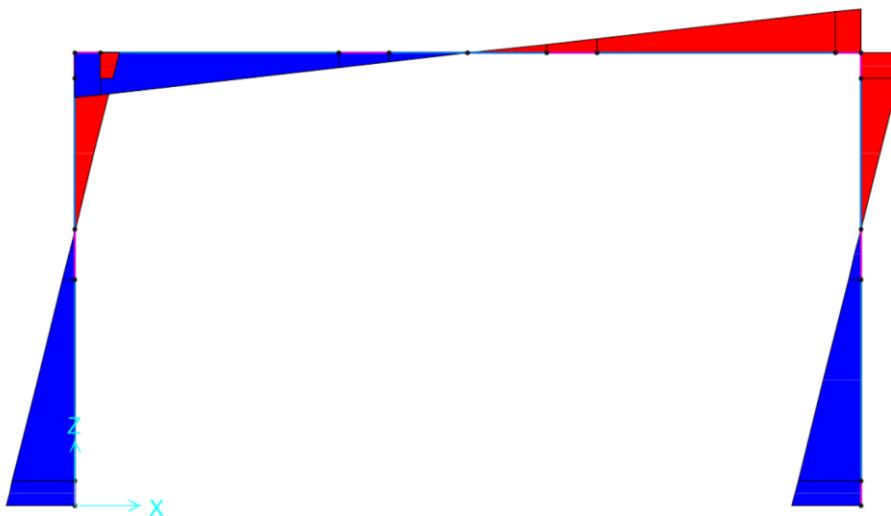


Figura 158. Diagrama de flectores del pórtico en el ensayo de fuerza horizontal

Al igual que hicimos en el ensayo anterior, fijándonos en los diagramas de esfuerzos, en concreto en el diagrama de momentos flectores, podremos hacernos una idea de cuál es el punto o los puntos más peligrosos de nuestro pórtico en esta ocasión. Se observa que los puntos de mayor flector serán los empotramientos, con un valor de aproximadamente 0,109 Nm, como se observa en la **Figura 159**, por lo que estos serían los puntos que primero fallarían en caso de alcanzar la fuerza límite.

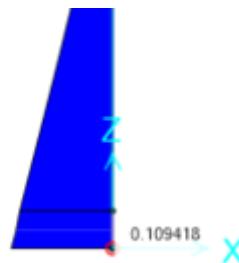


Figura 159. Valor del punto con mayor momento flector en el ensayo de fuerza horizontal

#### **4.2.4 Sección crítica y fuerza máxima soportada por el pórtico.**

En este apartado se buscó determinar cuál será el punto en el que primero aparezca deformación al alcanzar la fuerza máxima que logrará resistir el pórtico en los dos ensayos anteriores.

La forma de proceder fue exactamente la misma que en los **ensayos 4.2.2 y 4.2.3**, por lo que me remitiré a mostrar los resultados obtenidos tras la realización del ensayo.

Como ya sabemos de asignaturas cursadas al largo de la carrera, la solicitud más perjudicial para estructuras planas es el momento flector, por lo que como ya dijimos anteriormente, observando el diagrama de momentos flectores del ensayo

podríamos hacernos una idea de cuál es el punto más crítico de la estructura y donde primero aparecerá un fallo al alcanzar el valor de fuerza máxima.

### Caso de carga vertical

Al realizar este nuevo ensayo y alcanzar la fuerza de fallo, se comprobó que efectivamente y como bien se había supuesto, la deformación ocurrió en el punto de máximo flector, es decir, en el punto medio de la barra horizontal del pórtico en donde justamente estaba aplicada la fuerza puntual que causa dicha deformación, tal como se aprecia en las **Figuras 160 y 161**.

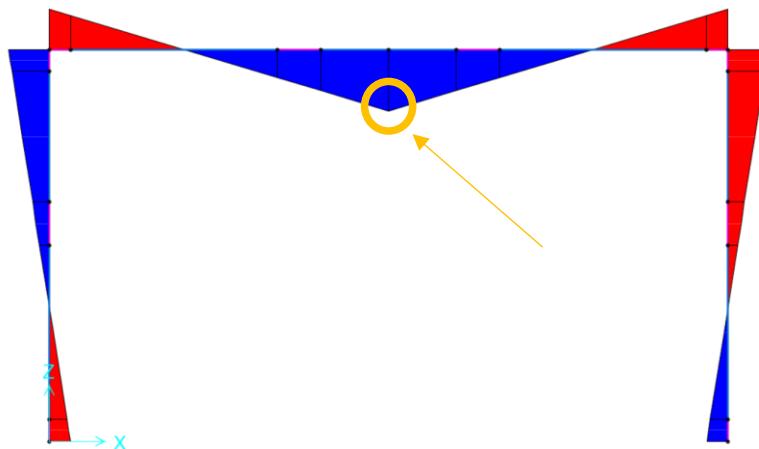


Figura 160. Punto de flector máximo en el ensayo de fuerza vertical



Figura 161. Deformación experimentada en el punto de flector máximo

También se observó que el valor de la fuerza máxima alcanzada justo antes de producirse la deformación fue de valor de 10,687 N.

### Caso de carga horizontal

Como en el caso anterior, se repitió el ensayo del pórtico de carga horizontal hasta alcanzar la fuerza de fallo y se pudo comprobar que la deformación se manifestó en el punto de flector máximo, que en este caso son los dos empotramientos presentes en el pórtico, como bien habíamos supuesto anteriormente, tal como se observa en las **Figuras 162, 163 y 164**.

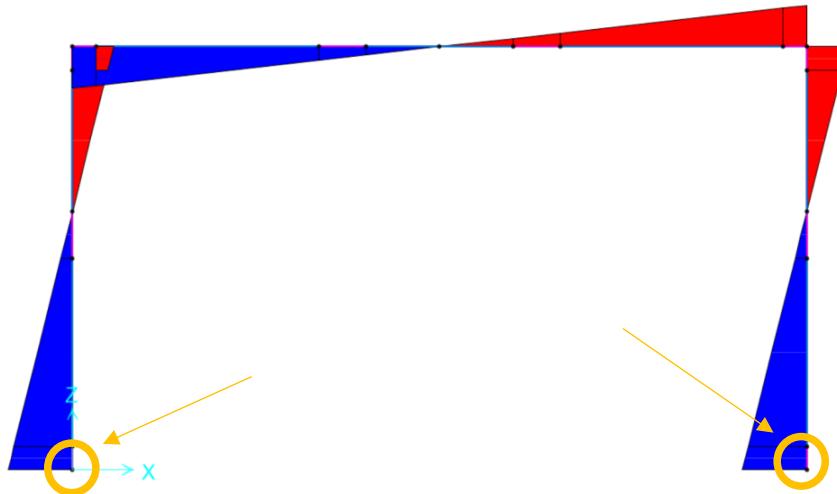
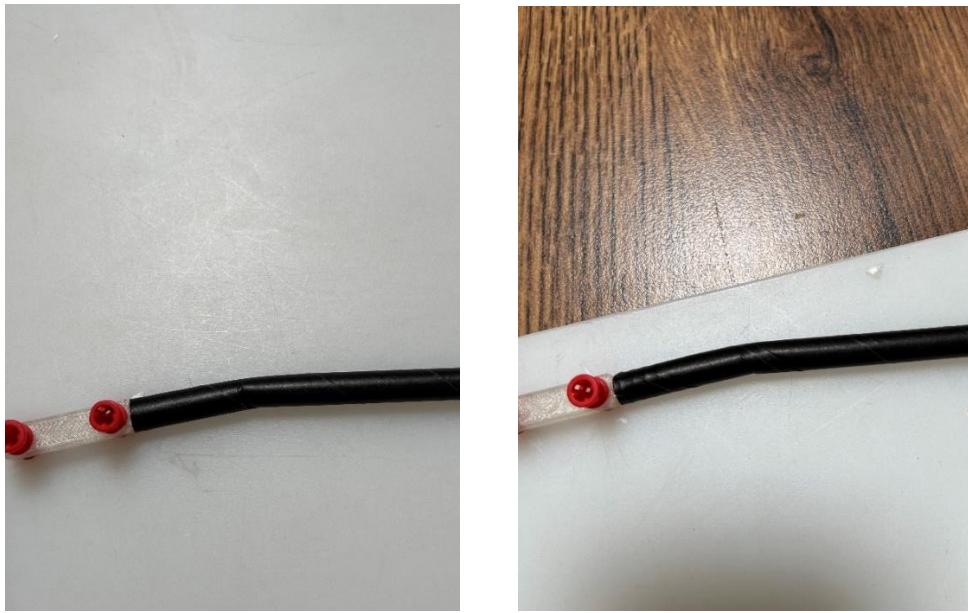


Figura 162. Punto de flector máximo en el ensayo de fuerza horizontal



Figuras 163 y 164. Deformación experimentada en el punto de flector máximo

## Capítulo 5. Conclusiones

Una vez concluidos los ensayos y disponiendo de una cantidad relevante de información, se va a proceder a realizar un análisis en conjunto con el objetivo de dar un enfoque global al TFG y obtener conclusiones que puedan resultar de interés.

### 5.1 Objetivos alcanzados

Durante la realización de este TFG, se plantearon una serie de objetivos principales a abordar buscando lograr la construcción y el estudio de un pórtico, habiendo conseguido previamente caracterizar los componentes que formarán el mismo. Los objetivos iniciales eran los mostrados en el Capítulo 1 apartado **1.4 Objetivos**. En este apartado, se pretende evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos que se plantearon al inicio del estudio.

- Se ha logrado caracterizar los materiales que conforman las pajitas y las uniones, elementos que fueron indispensables en la construcción del pórtico, indicado de forma ordenada en la **Tabla 8**.

Elemento estructural	Módulo de elasticidad (Pa)
Pajita de papel	$3,377 \times 10^9$
Uniones	$7,675 \times 10^{10}$

Tabla 8. Módulos de elasticidad de los elementos estructurales

Conocer estas propiedades nos ha permitido hacernos una idea de la viabilidad de estos materiales alternativos frente a los más típicos utilizados en ingeniería estructural, pudiendo concluir que estos materiales alternativos, pese a la positividad de su bajo coste y ser biodegradables, presentan propiedades considerablemente inferiores a otros materiales empleados en construcción.

- Se ha podido entender y comprender el comportamiento de las estructuras elaboradas con materiales alternativos bajo la acción de diferentes cargas. Su estudio nos ha permitido determinar cuáles son los puntos más débiles en este tipo de estructuras y las cargas máximas que podrían soportar.
- Los múltiples ensayos llevados a cabo con las pajitas han posibilitado entender qué esfuerzos son los más perjudiciales para las mismas, comprobando que las pajitas soportan bien esfuerzos de compresión y tracción, pero cuando son sometidas a esfuerzos de flexión, rápidamente aparecen deformaciones en su superficie. Los ensayos también han ayudado a poder prever de forma aproximada los puntos en los que se manifiesta la deformación, tiendiendo a aparecer en los puntos centrales de la pajita y donde se aplica la carga.
- El último objetivo de este TFG era analizar la precisión de los resultados obtenidos de manera experimental y mediante computación. En los ensayos realizados con las pajitas se observó que los resultados obtenidos por ambas

vías eran muy próximos y la precisión alcanzada era aceptable. Sin embargo, en los ensayos realizados al pórtico, donde el número de elementos utilizados para la construcción del mismo aumentó mucho con respecto a los ensayos simples de las pajitas, los resultados obtenidos mediante ambos métodos ya no eran tan similares y la precisión alcanzada no era tan buena. Esta diferencia en los resultados puede deberse a diferencias inapreciables entre las propiedades de las pajitas utilizadas, a posibles errores de montaje imperceptibles o a posibles defectos durante la realización de los ensayos, como pueden ser rozamientos y errores de los equipos de medida.

## 5.2 Conclusiones generales

La elaboración de este TFG ha hecho posible conocer otro punto de vista del campo de las estructuras, mucho más práctico y experimental, el cual complementa de manera óptima los conocimientos teóricos en esta materia alcanzados durante el Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales.

En concreto, se ha logrado una mejor comprensión de la dinámica de estructuras, un área que no se abordó en la titulación de grado y que resultó ser muy interesante y útil, pudiendo estudiar de manera profunda el comportamiento de estructuras frente a cargas variables en el tiempo, empezando por las pajitas para luego estudiar de manera conjunta las pajitas y las uniones en la construcción del pórtico.

También, ha facilitado un mejor conocimiento del significado de propiedades muy comunes en las asignaturas de la titulación, como el módulo de elasticidad, habiendo logrado entender qué implicaciones tienen en las estructuras y ganando una visión más allá de la teoría estudiada.

Otra habilidad adquirida fue el conocimiento sobre el software SAP2000, que fue ampliamente utilizado durante este trabajo y que, aunque cuenta con múltiples funcionalidades que no se han llegado a emplear, se han logrado dominar las que se han utilizado. Esto ha permitido conseguir una comparación con los resultados hallados por vías experimentales.

En conclusión, la realización del TFG ha ampliado los conocimientos previamente adquiridos en el ámbito de las estructuras y me ha mostrado la importancia de realizar ensayos tanto por vías más tradicionales, como son las desarrolladas en el laboratorio, como por vías más innovadoras como pueden ser la simulación y la computación. Además, se ha logrado adquirir conocimientos en el procesado de datos mediante el programa Microsoft Excel, se han ampliado conocimientos en programas ya utilizados durante la titulación como es el programa Catia V5 y se han desarrollado nuevas habilidades en simulación estructural con el software SAP2000.

### 5.3 Líneas de mejora

A continuación, se pasan a detallar algunas posibles áreas de mejora para futuros estudios en el laboratorio de estructuras.

#### 5.3.1 Realización de ensayos

Una primera línea de mejora del TFG podría consistir en que, en vez de realizar estructuras en dos dimensiones como es el caso del pórtico objeto de este trabajo, se lleven a cabo estructuras en tres dimensiones, como podría ser un techo espacial. Para este caso, sería preciso diseñar uniones múltiples con cambios de dirección en los tres planos del espacio y podría resultar bastante interesante analizar el comportamiento de las pajitas en estas estructuras más complejas.

#### 5.3.2 Mejora de los equipos

Una mejora de los equipos de medida y de impresión 3D es importante por varios motivos:

- Precisión de medida: equipos de medida más modernos y avanzados permitirían alcanzar resultados mucho más precisos de los desplazamientos y fuerzas experimentados por los elementos estructurales en los diferentes ensayos. Esto podría hacer que los resultados obtenidos mediante simulación y de forma experimental en el laboratorio fueran más similares y se pudieran descartar otros posibles errores de medida.
- Precisión de montaje: impresoras 3D más modernas garantizarían que piezas pequeñas y complejas como son las requeridas en este trabajo tuvieran una mejor precisión en las medidas diseñadas y además se conseguiría un mejor acabado en las piezas, sin que aparecieran imperfecciones. Esto haría que el montaje del pórtico y de otras estructuras de futuros Trabajos Fin de Grado fuera mucho más preciso y sencillo, pudiendo descartar que posibles imperfecciones en la impresión puedan afectar a los resultados.

#### 5.3.3 No suposición de material isotrópico

En la realización de este TFG se supuso que las pajitas presentaban iguales propiedades en todas las direcciones, es decir, se supusieron como un material isotrópico, lo que ha proporcionado una base sólida para la investigación. Podría resultar de interés estudiar las pajitas como un material anisótropo, en el que sus propiedades varian en función de la dirección. Este enfoque podría permitir una comprensión más completa de su comportamiento bajo diversas cargas y condiciones, pudiendo conducir esto a un análisis más exhaustivo y preciso de la respuesta estructural de las pajitas, permitiendo observar si realmente existe variación en los resultados dependiendo de qué ejemplar de pajita se utilice, lo cual contribuiría significativamente al avance del conocimiento en el estudio de la

viabilidad de estos materiales respetuosos con el medio ambiente en ámbitos de la construcción.

#### 5.4 Otros aspectos a tener en cuenta

Se va a realizar una estimación de los recursos empleados para la realización de este TFG, desde el punto de vista de las horas de trabajo empleadas, así como del coste que estas horas habrían implicado.

##### Coste del trabajo en horas

Se va a tratar de estimar las horas empleadas para la realización de todas las fases que han sido necesarias para completar este TFG. Con este apartado se pretende reflejar el esfuerzo que ha conllevado la realización del mismo, así como la organización y fases diferentes que se han atravesado hasta alcanzar este resultado final. A continuación, se muestra una tabla en la que se exponen las diferentes fases, así como el tiempo que ha requerido cada una de ellas, indicados de manera ordenada mediante la **Tabla 9**.

Tarea	Tiempo (horas)
Planificación y propuestas de ideas	10
Trabajo presencial en el laboratorio	60
Procesado de datos	30
Desarrollo de los modelos virtuales	20
Redacción del documento	160
Elaboración de la presentación	30
Horas totales	310

Tabla 9. Tabla resumen de las tareas realizadas y las horas que ha conllevado cada una

##### Coste del trabajo en términos económicos

Tras haber estimado las horas que conllevó cada fase del TFG, se va a proceder a realizar un cálculo del coste económico que habría supuesto la realización de las mismas. Para ello, se va tomar como referencia el salario que supuestamente percibe un ingeniero en formación.

Juntando todas las horas que han sido necesarias para realizar este TFG obtendríamos 310 horas, como queda reflejado en la **Tabla 9**, sabiendo que el salario de un ingeniero en formación asciende, aproximadamente, a 25.000 € anualmente, según el boletín oficial del estado la jornada ordinaria máxima de trabajo efectivo, en cómputo anual, es de 1.752 horas [8]. Se calcularán las horas efectivas de trabajo con el sueldo anual propuesto y el resultado es de 14,26 € por hora de trabajo.

Si multiplicamos las horas dedicadas a la realización de este TFG por lo que percibe, por hora de trabajo efectivo, un ingeniero en formación, se obtiene que el coste de trabajo realizado asciende a 4.420,6 €.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gere, J. M., y Timoshenko, S. P.: *Resistencia de materiales*, Thomson, 2009.
- [2] Ortiz Berrocal, L.: *Elasticidad* (3<sup>a</sup> ed), McGraw-Hill, 2002.
- [3] Coca Rebolledo, P., y Rosique Jiménez, J.: *Ciencia de Materiales. Teoría-Ensayos-Tratamientos* (14<sup>a</sup> ed), Ed. Pirámide, 2000.
- [4] *Prontuario básico de estructuras simples*.
- [5] Gordon, J. E.: *Estructuras o por qué las cosas no se caen*, Calamar ediciones, 2004.
- [6] Electric bricks (<https://www.electricbricks.com/lego-piezas-lego-technic.-pin-gris-claro-azulado-pin-largo-technic-con-friccion-tope-p-122.html>). [Último acceso: 25 junio 2025].
- [7] Quiroz Torres, L.: *Análisis y Diseño de Estructuras con SAP2000*, Marcombo, 2016.
- [8] BOE: “Capítulo II, Régimen de Trabajo”, *Otras Disposiciones*, Boletín Oficial del Estado, 2025.