



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE PALITOS DE MADERA COMO ELEMENTO
ESTRUCTURAL Y DISEÑO DE UNIONES PARA CONSTRUIR PÓRTICOS A ESCALA.**

Autor:

Arias Vaquero, Alberto

Tutor(es):

MAGDALENO GONZÁLEZ, ALVARO

ANTOLÍN LORENZANA, IBÁN

**DPTO Construcciones A, I. T, M. M.
C. y T. Estructuras**

Valladolid, junio y 2025.



A mis padres y a mi hermana.

Por su amor y apoyo
incondicional, por ser un pilar
fundamental para mí.

A mis amigos



RESUMEN

En este Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado, construido y caracterizado una estructura experimental de bajo coste, empleando como material base palitos de madera de abedul, comúnmente utilizados como removedores de café, junto con uniones diseñadas mediante software CAD e impresas en 3D con filamento PLA. El objetivo principal ha sido analizar el comportamiento estructural del sistema mediante ensayos mecánicos (tracción, compresión y flexión), estimar las propiedades elásticas del material —en concreto, su módulo de Young—, y validar dichos resultados mediante simulaciones numéricas en el entorno SAP2000.

Tras caracterizar el material de forma individual, se procedió a construir un pórtico plano en 2D, que fueron sometidos a cargas en distintas posiciones para observar su comportamiento estructural global.

Palabras clave

Materiales de bajo coste, Ensayos mecánicos, Simulación estructural, SAP2000, Módulo de Young

ABSTRACT

In this Final Degree Project, a low-cost experimental structure has been developed, built, and characterized using birchwood coffee stirrers as the base material, combined with joints designed in CAD software and fabricated via 3D printing using PLA filament. The main objective was to analyze the structural behavior of the system through mechanical testing (tensile, compression, and bending), estimate the elastic properties of the material—specifically, its Young's modulus—and validate the experimental results through numerical simulations using the SAP2000 software environment.

After individually characterizing the material, a planar frame were built and subjected to loads at different positions to evaluate their global structural response.

Keywords

Low-cost materials, Mechanical testing, Structural simulation, SAP2000, Young's modulus.



Índice

Capítulo 1: Introducción y objetivos	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Antecedentes	2
Capítulo 2: Marco teórico	3
2.1 Comportamiento mecánico	3
2.2 Análisis teórico estático	5
2.3 Tensiones y deformaciones	9
Capítulo 3: Caracterización experimental	11
3.1 Tipología de uniones fabricadas	11
3.2 Material utilizado	15
3.3 Instrumentación y adquisición de datos	17
3.4 Realización banco de ensayos:	20
3.5 Procedimiento experimental	22
3.6 Realización de los ensayos	25
Capítulo 4: Simulación con SAP2000	43
4.1 Introducción al software	43
4.2 Creación del modelo	43
4.3 Ensayo flexión con unión	60
Capítulo 5: Estudio estructural del Pórtico	67
5.1 Introducción	67
5.2 Descripción del montaje experimental	68
5.3 Ensayo experimental: carga en el centro	68
5.4 Ensayo experimental: carga en esquina	71
5.5 Realización PORTICO SAP	74
Capítulo 6: Conclusiones del trabajo	83
6.1 Conclusiones finales	83
6.2 Líneas de mejora y trabajos futuros	83
6.3 Factores a considerar	84
Bibliografía	86
Anexo:	88

Capítulo 1: Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Desde hace mucho tiempo, la humanidad ha utilizado distintos materiales para construir estructuras resistentes y funcionales. La elección del material adecuado es un factor clave en cualquier diseño ya que influye en la estabilidad, durabilidad y eficiencia de la construcción.

En el campo de la ingeniería estructural el análisis y diseño de estructuras requieren no solo de conocimientos teóricos sólidos sino también de la experimentación con diferentes materiales y configuraciones geométricas. Tradicionalmente los estudios estructurales se han centrado en materiales como el acero, el hormigón y la madera en sus formas originales. Sin embargo, la exploración de materiales alternativos y de bajo costo para la modelización y ensayo de estructuras permite desarrollar enfoques innovadores en la enseñanza y la investigación.

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el diseño, construcción y análisis estructural de una estructura realizada con palitos de madera de abedul. A pesar de ser bastante simple, este material posee características mecánicas que permiten evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga.

El estudio abordará la caracterización mecánica de los palitos, el diseño estructural mediante principios de resistencia de materiales y estabilidad, así como la validación experimental mediante ensayos de carga. Se emplearán herramientas de simulación y métodos analíticos para contrastar los resultados obtenidos con los valores teóricos esperados.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado es analizar el comportamiento estructural de una estructura a escala, fabricada con palitos de madera de abedul, a través de ensayos experimentales y modelado numérico. Para ello, se emplearán técnicas de ensayo mecánico y herramientas de simulación con el fin de obtener propiedades mecánicas fundamentales del material y validar su comportamiento frente a diferentes tipos de carga.

Objetivos específicos:

- Caracterizar experimentalmente el comportamiento mecánico de los palitos de madera mediante ensayos a tracción, compresión y flexión, identificando propiedades clave como el módulo de Young, la carga de pandeo y la rigidez estructural.
- Analizar la influencia de la sección central modificada en la rigidez de la estructura, mediante el uso de uniones en los palitos de madera, y cuantificar su efecto sobre el desplazamiento vertical.
- Simular los ensayos realizados en el software SAP2000, empleando modelos de elementos finitos que permitan comparar los resultados experimentales con predicciones numéricas, y validar el comportamiento global del sistema estructural.
- Estudiar la viabilidad de emplear materiales alternativos y tecnologías accesibles como herramientas didácticas eficaces para el análisis estructural y la validación de modelos computacionales.

1.3 Antecedentes

Este capítulo tiene como finalidad exponer las asignaturas cursadas durante el Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales que han resultado fundamentales para adquirir los conocimientos necesarios en el ámbito del análisis estructural, y que han servido de base para la elaboración del presente Trabajo Fin de Grado (TFG).

A lo largo del plan de estudios se han abordado diversas materias relacionadas con la mecánica de materiales y el comportamiento de estructuras, cabe destacar:

- Resistencia de Materiales
- Elasticidad, Resistencia y Estructuras

En la asignatura de *Resistencia de Materiales*, se han adquirido competencias como el conocimiento y aplicación de magnitudes asociadas a la caracterización mecánica de los materiales, el análisis de propiedades geométricas de secciones y la aplicación de distintos tipos de cargas y condiciones de contorno para estudiar fenómenos como la flexión o el pandeo [1].

Por otro lado, *Elasticidad, Resistencia y Estructuras* ha permitido profundizar en el estudio del sólido deformable sometido a tensiones y deformaciones, con el objetivo de comprender su respuesta frente a diferentes sollicitaciones externas [2].

Ambas asignaturas presentan objetivos formativos amplios centrados en el análisis estático de estructuras, sin abordar en profundidad la componente dinámica

Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Comportamiento mecánico

En buena parte del TFG se va a ir estudiando el comportamiento mecánico de los palitos de madera, por lo que primero hay que entender las fases por las que un material pasa si se le está aplicando tensión.

Hay tres zonas:

2.1.1 Zona elástica:

En la fase inicial, el material presenta un comportamiento elástico, esto significa que el material al deformarse vuelve a su estado inicial. Esta fase se rige por la ley de Hooke, que establece una relación entre la tensión y la deformación.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

En la ecuación (1), E es el módulo de Young, es un parámetro que indica la rigidez de un material y se define como la pendiente de la recta en la zona elástica de la curva tensión-deformación. En esta zona existen dos límites:

- Límite de proporcionalidad: Pasado este límite, el comportamiento ya no es lineal.
- Límite elástico: Es la máxima tensión que puede soportar el material sin deformarse permanentemente.

2.1.2 Zona plástica:

Cuando se supera el límite elástico, el material pasa a entrar en la zona plástica, donde el material deformado no vuelve a su estado original, en esta zona ocurre un fenómeno conocido como estricción, a medida que se deforma el material, aumenta su resistencia, endurecimiento por deformación.

La tensión a la cual se inicia la deformación plástica se llama límite de fluencia. La curva plástica sigue subiendo hasta alcanzar un valor máximo llamado tensión máxima, que representa la máxima carga que el material puede soportar antes de que el material falle estructuralmente.

2.1.3 Zona de rotura:

Después de la tensión máxima, ocurre una concentración de esfuerzos en una sección determinada, lo que conlleva una disminución del área resistente, finalmente el material se fractura.

La forma en la que se produce esta fractura (frágil o dúctil) depende del tipo de material y de su estructura interna.

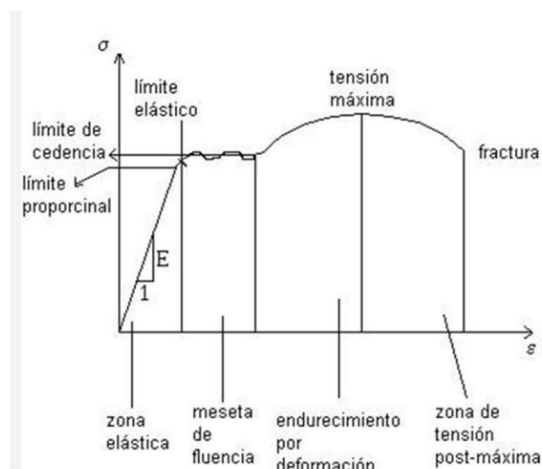


Figura 1, fases comportamiento mecánico [5]

Dependiendo de si el material es dúctil o frágil, la curva de tensión-deformación será diferente:

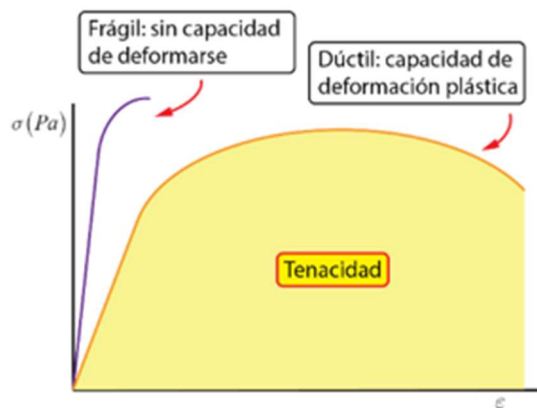


Figura 2, curva tensión-deformación para frágil y dúctil [5]

2.2 Análisis teórico estático

Para el análisis estático, se dispone de un prontuario elemental de estructuras que simplifica el estudio de vigas sometidas a determinadas cargas. Este prontuario incluye un conjunto de fórmulas analíticas, diagramas y tablas que facilitan la comprensión y el análisis de las estructuras más comunes. Gracias a ello, es posible determinar de forma ágil las reacciones y deformaciones que experimenta la viga.

- Ensayo de flexión:

Se van a realizar dos tipos de ensayo, uno en el cual es con el palito de madera, y otro es con un refuerzo en el centro que será la unión para dos palitos. Constará de dos apoyos y una carga que será puntual en el centro de la probeta, palito de madera.

- Ensayo sin unión:

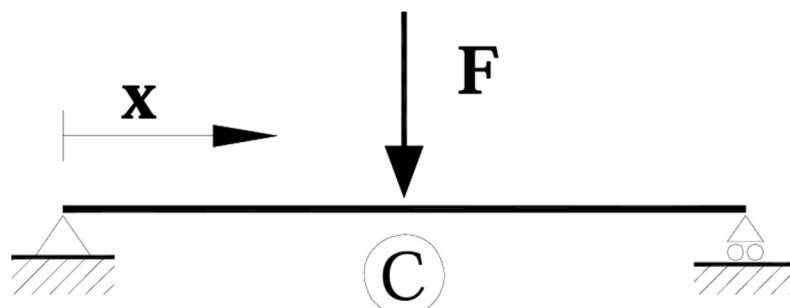


Figura 3, viga biapoyada con una carga en el centro [3]

➤ Ensayo con unión:

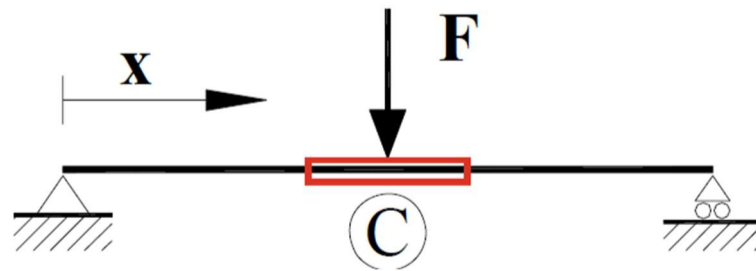


Figura 4, viga con distinta sección biapoyada con una carga en el centro

La sección central de color rojo simula la sección de la unión.

VIGA SIMPLE APOYADA: carga puntual F centrada.	
	Reacciones y solicitaciones
	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 $x = \frac{L}{2}$
	Deformaciones
	Giros: $\phi_A = -\frac{FL^2}{16EI}$ $\phi_B = \frac{FL^2}{16EI}$ $\phi_C = 0$
	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 5, prontuario para una viga biapoyada [3]

Se va a semejar a una viga simple biapoyada isostática, donde interesa el desplazamiento y la carga aplicada

- Ensayo de tracción:

El ensayo de tracción determina cómo responde un material cuando se le aplica una fuerza axial de tracción creciente hasta su rotura. Se utiliza para evaluar propiedades mecánicas como la resistencia, ductilidad y elasticidad del material.

Como probeta se va a emplear un palito de madera que se somete a una carga axial creciente en un banco de ensayos. Durante el ensayo, se registra la relación entre la tensión aplicada.

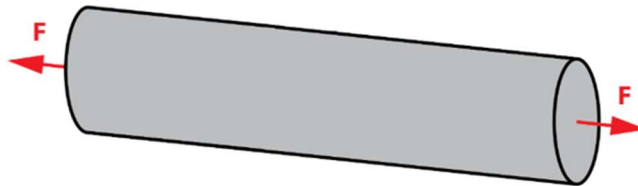


Figura 6, esfuerzo de tracción [4]

- Ensayo de compresión:

El ensayo de compresión evalúa la capacidad de un material para resistir fuerzas que tienden a reducir su tamaño.

Como probeta se utilizará medio palito de madera, ya que si se utiliza uno entero pandeará mucho más rápido, causando una inestabilidad que genera una deformación exagerada de la barra para cargas bajas, muy inferiores a aquellas que superan el límite de resistencia.

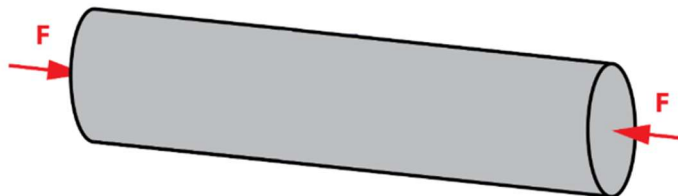


Figura 7, esfuerzo de compresión [4]

Cuando un elemento estructural, como una columna, se somete a una carga de compresión, puede llegar a un punto crítico en el que pierde su

estabilidad y se deforma lateralmente. Este punto se denomina carga crítica de pandeo.

La carga crítica a la que una columna delgada pandea, conocida como carga crítica de Euler, se expresa así:

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

- P_{CR} : carga crítica de pandeo
- E : módulo de Young del material
- I : momento de inercia de la sección transversal
- L : longitud de la columna
- K : factor que depende de las condiciones de apoyo finales

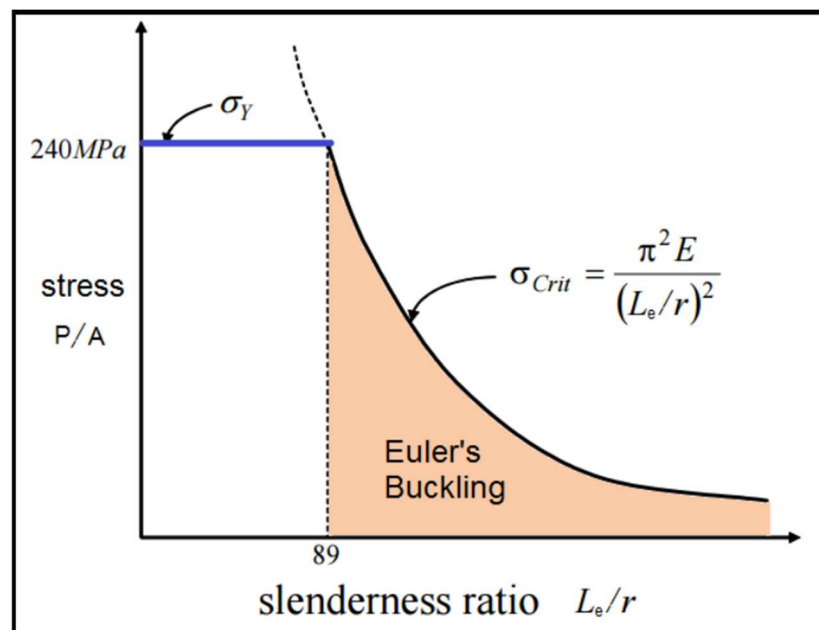


Figura 8, Representación del modo de fallo a pandeo [4]

Factores que influyen en el pandeo:

- **Esbeltez:** Relación entre la longitud y la sección transversal; elementos más esbeltos son más propensos al pandeo.

- **Condiciones de apoyo:** Los extremos del elemento (fijos, articulados, empotrados) influyen en su capacidad para resistir el pandeo.
- **Imperfecciones iniciales:** Desviaciones geométricas o cargas excéntricas pueden reducir la carga crítica.
- **Propiedades del material:** El módulo de elasticidad y la resistencia del material afectan la carga crítica.

2.3 Tensiones y deformaciones

Como resultado de la aplicación de cargas, los sólidos sufren tensiones internas y deformaciones. Estos son dos conceptos básicos en mecánica de materiales que describen como los sólidos responden ante la aplicación de las cargas y que son necesarios entender previamente.

- La Tensión (o esfuerzo interno) es una magnitud física que mide la reacción que se produce en el interior de una pieza debido a las cargas que están aplicadas sobre él. Tiene unidades de fuerza partido de superficie, siendo un concepto físico necesario para relacionar fuerzas aplicadas en una pieza, con las propiedades resistentes del material y su geometría. Existen dos tipos de tensiones: normales, si son perpendiculares a la superficie y tensiones tangenciales, paralelas a la superficie.



Figura 9, Representación tensión normal a tracción y compresión [4]

Donde la tensión es:

$$\sum \vec{F} = 0$$

$$F = \sigma \cdot A$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

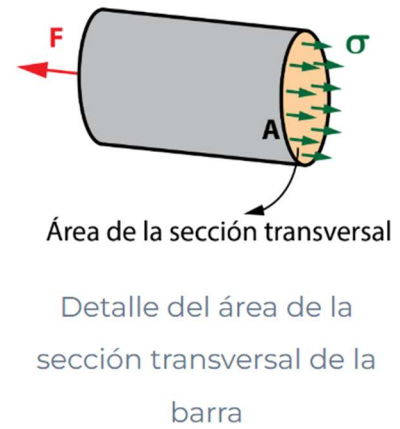


Figura 10, representación de la fórmula de tensión y croquis [4]

- La Deformación es una medida de los desplazamientos que ocurren en el interior del sólido como resultado de las cargas aplicadas. Existen deformaciones normales y deformaciones tangenciales.

Definición de deformación

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

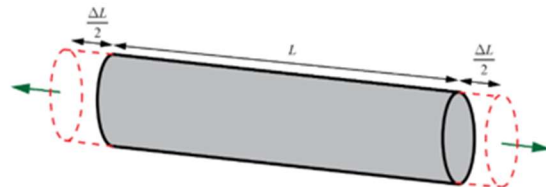


Figura 11, representación de deformación de una barra sometida a tracción

Capítulo 3: Caracterización experimental

3.1 Tipología de uniones fabricadas

Se utilizarán tres tipos de uniones: la unión inicial, que debe fijarse a la placa base que se caracterizará más adelante; la unión longitudinal, encargada de conectar dos palitos en línea; y la unión en las esquinas, que permite unir dos palitos con un ángulo determinado. Todas ellas tienen en las paredes estrías verticales alternadas con el fin de atrapar mejor el palito de madera, más adelante se hablará del efecto que hace al palito de madera.

3.1.1 Unión inicial

Es la pieza inicial a la hora de construir el pórtico, será el que una la placa base con los palitos de madera, con ayuda de los tetones.

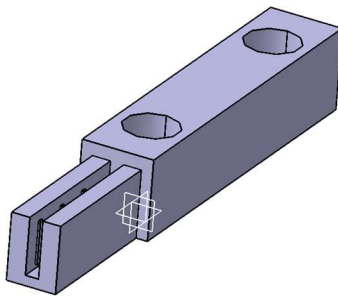


Figura 12, unión inicial Catia



Figura 13, unión inicial impresa

Una pieza rectangular alargada con dos agujeros circulares alineados horizontalmente. Ambos agujeros tienen un diámetro de 0,0055 m y están centrados en la altura de la pieza. Hay una separación entre centros de 0,0245 m. En la parte izquierda se extiende una zona hueca, en la cual el palito de madera quedará fijo. Se han añadido unas estrías para atrapar mejor el palito de madera.

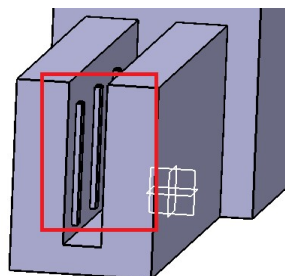


Figura 14, estrías en las paredes

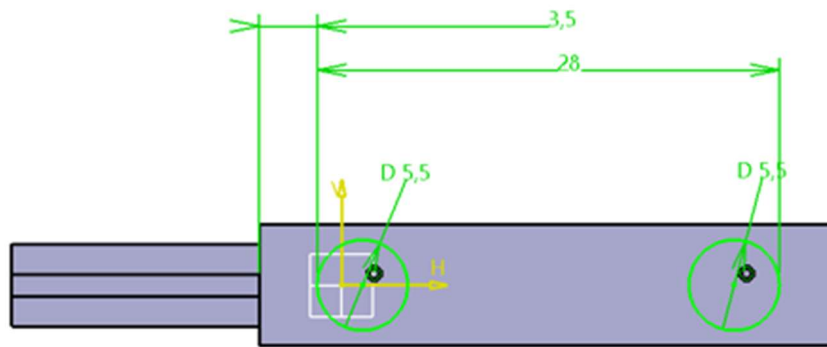


Figura 15, cotas relevantes de unión inicial, en mm.

3.1.2 Unión longitudinal

Unión que une dos palitos de madera de manera longitudinal, no va a estar unida a la placa base.

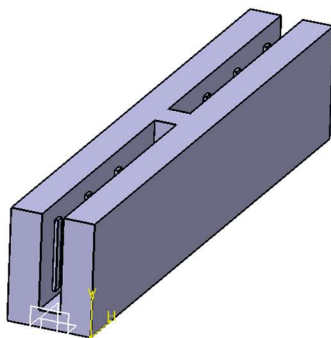


Figura 16, unión longitudinal Catia



Figura 17, unión longitudinal impresa

Para esta unión se ha modelado un rectángulo de 0,0067 m de altura, 0,005 m de ancho y de largo 0,0318 m, en el centro de la unión hay un tope de 0,0018 m para asegurarse de que se fijan a la misma altura los dos palitos de madera. Se añadirán las estrías para mejorar el agarre al palito de madera. El hueco donde estará atrapado el palito de madera tiene unas dimensiones de 0,0013 m de ancho y 0,0057 m de altura.

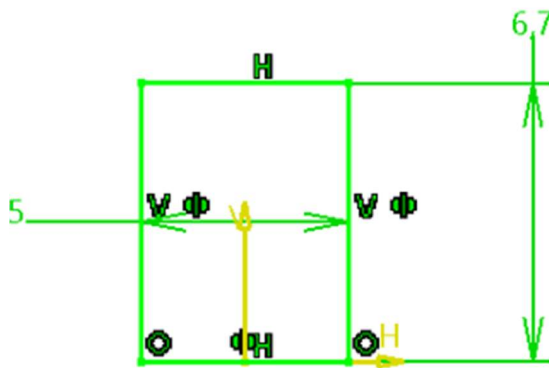


Figura 18, dimensiones pieza rectangular, en mm.

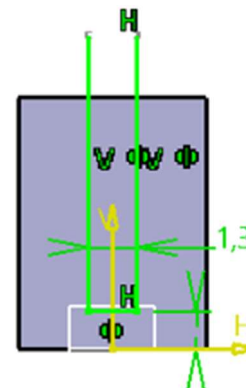


Figura 19, dimensiones hueco, en mm.

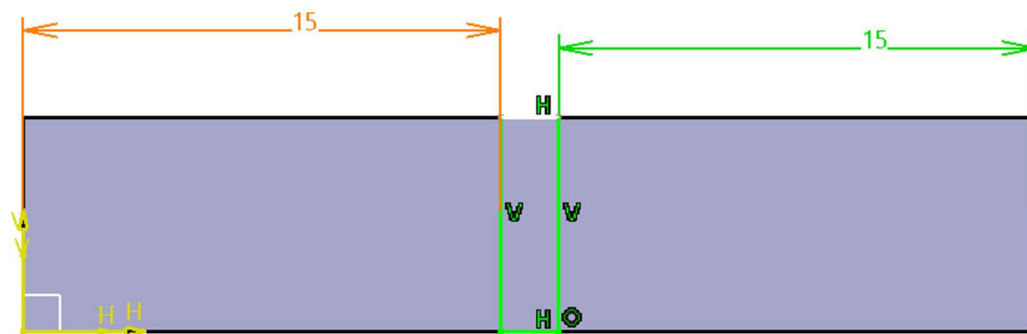


Figura 20, dimensiones unión longitudinal, en mm

La longitud del tope central solo sirve de referencia para ensamblar el palito de madera, se ha dimensionado de tal forma que se gaste el menor material posible, a la vez de que se quería que la unión fuera lo más simple posible.

Se va a utilizar la unión longitudinal para los ensayos de flexión, para comparar los resultados y sacar conclusiones, al principio se optó por un diseño más pequeño, pero era más complicado trabajar con esa primera unión, y se corría el riesgo de que el palito no ensamblara correctamente, y las estrías no harían suficiente efecto.

3.1.3 Unión en esquina

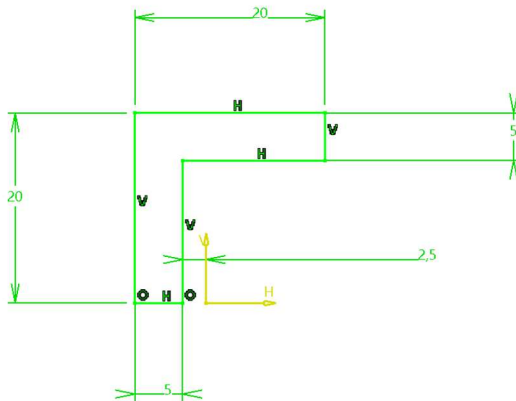


Figura 21, dimensiones unión esquina

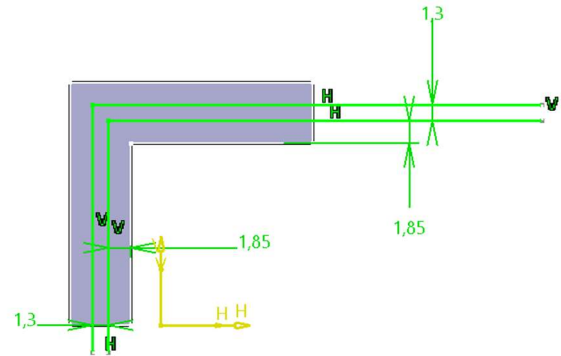


Figura 22, dimensión hueco esquina

Unión en forma de L diseñada para unir dos palitos de madera de manera perpendicular, las características de esta unión son muy parecidas a las de la unión longitudinal, 0,0067 x 0,005 m (altura x ancho), el palito de madera estará anclado 0,015 m, y el hueco tendrá 0,0013 m de ancho y sus paredes también estarán formadas por estrías verticales, con el objetivo de que el palito de madera quede firmemente encajado.

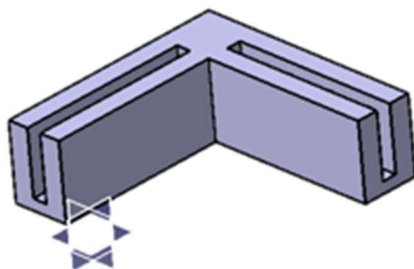


Figura 23, unión esquina en Catia



Figura 24, unión esquina impresa

3.2 Material utilizado

3.2.1 Palitos de madera

El objeto de estudio es un palito de madera de abedul. Su geometría es rectangular con esquinas curvadas, y presenta unas dimensiones exactas de 0,189 m de longitud, 0,0013 m de espesor y 0,0057 mm de altura. En sus extremos, cuenta con un radio de curvatura específico. La superficie del palito es plana y lisa, sin irregularidades ni defectos visibles.

Este elemento no tiene una aplicación estructural en ingeniería, resulta útil como modelo experimental para analizar el comportamiento de estructuras sometidas a diferentes esfuerzos mecánicos.

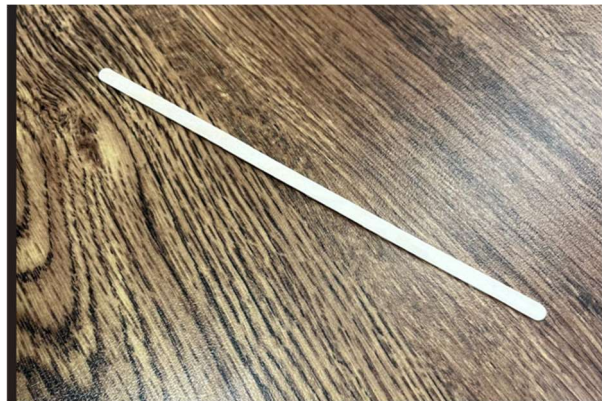


Figura 25, palito de madera

3.2.2 Placa base

En la placa base será donde se ensamble las uniones iniciales junto con las demás uniones para formar un pórtico, que será otro apartado del TFG, la estructura que se va a formar tiene que estar dentro del plano de la placa base. Las medidas que van a ser útiles de la placa base son: 0,625 m entre apoyos iniciales, eje x, y de altura, 0,400 m aproximadamente.

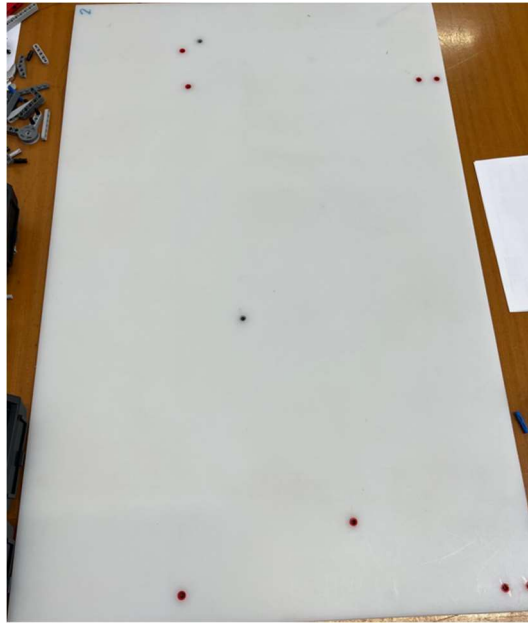


Figura 26, placa base [7]

3.2.3 Tetones

Se van a emplear 4 tetones, dos por cada unión inicial. Son los responsables de que el pórtico no se salga del plano de la placa base, van ensamblados a la placa base y a las uniones iniciales mediante dos taladros pasantes.



Figura 27, tetón



Figura 28, tetones ensamblados

3.2.4 Tablón de madera

En el tablón de madera se realizarán los distintos ensayos. Como apoyos fijos se han utilizado dos tornillos que irán taladrados, a una distancia entre ellos de 0,150 m, sobre el tablón de madera se apoyará la célula de carga y el dispositivo láser.

Al tablón de madera se le pegarán unos palitos de madera para que al realizar los ensayos sean lo más preciso posible.



Figura 29, tablón de madera

3.3 Instrumentación y adquisición de datos

Para obtener resultados coherentes y precisos a la hora de realizar los ensayos, se han utilizado diferentes instrumentos de medida, para la toma de datos, junto con un programa para la visualización de los resultados.

3.3.1 Dispositivo Láser

Dispositivo empleado para la medida de la flecha (desplazamiento) del palito al realizar una fuerza “P” en el centro del palito de madera. Estará fijo al tablón de madera mediante dos tornillos.



Figura 30, dispositivo láser

Características del láser:

- Resolución: $8 \mu\text{m}$
- Tiempo de reacción: $< 660 \mu\text{s}$
- Alcance: $12 \pm 6 \text{ cm}$ en eje "z" del dispositivo láser
- Capacidad de medición con reflejos, brillo o colores muy saturados.

3.3.2 Célula de carga

Instrumento para medir la fuerza en N. Formada por galgas extensiométricas que forman un circuito llamado puente de Wheatstone. Cuando la célula se deforma, la resistencia de las galgas cambia, provocando un desequilibrio en el puente y genera una señal eléctrica. Esta señal se amplifica y digitaliza para ser leída y procesada por un microcontrolador o sistema de control, la célula de carga que se utilizará tendrá como máximo una capacidad de 10 kg, es decir, 98 N, irá conectado a la tarjeta de adquisición de datos, se medirán ensayos a tracción, compresión, flexión.



Figura 31, célula de carga

3.3.3 Tarjeta de adquisición de datos

Instrumento electrónico para recoger la información aportada por el dispositivo láser y la célula de carga, y enviarla al ordenador, que posteriormente con un programa se observarán los resultados. Utiliza una tarjeta SIRIUS HD-SGT.



Figura 32, tarjeta de adquisición de datos

Características de la tarjeta de adquisición:

- Salida tipo USB para conexión en ordenador.
- Entrada de alimentación de corriente eléctrica.
- Salida de alimentación para conectar el láser.
- Salida de alimentación para conectar la célula de carga.
- 16 entradas tipo D-USB para conectar sensores.

3.3.4 Software para procesar los datos

Para la correcta visualización de los datos se ha utilizado el programa “DEWESoftX2”, le llegaran los resultados a tiempo real de la célula de carga y el dispositivo láser a través de la tarjeta de adquisición, este programa tiene la opción de guardar y grabar los resultados, por lo que más adelante con ayuda de herramientas como Excel, se obtendrán las gráficas correspondientes.

3.4 Realización banco de ensayos:

3.4.1 Descripción banco de ensayos

Para la elaboración del banco de ensayos se ha necesitado un tablón de madera liso, en el cual se colocarán dos instrumentos de medida, por un lado, el dispositivo láser para medir el desplazamiento de los ensayos, y por otro lado la célula de carga para medir la carga ejercida durante los distintos tipos de ensayo.

Por una parte, el dispositivo láser irá fijo al tablón de madera a través de dos tornillos que irán taladrados al tablón de madera, este irá fijo a una distancia de 0,120 m del palito en reposo, porque como ya he explicado anteriormente, el dispositivo láser mide el desplazamiento a una distancia de $0,120 \pm 0,060$ m.



Figura 33, ensamblado del dispositivo láser con el tablón de madera

Por otra parte, la célula de carga lleva acoplada una varilla doblada en su extremo para atrapar la pieza de lego en la que estará el palito de madera, y a

través de unos carriles, que son 4 palitos de madera que se han pegado al tablón de madera, se podrá mover la célula de carga sin tener problemas de rectitud, para que los ensayos sean lo más precisos posibles.



Figura 34, foto de los carriles



Figura 35, varilla y célula

El montaje para el palito de madera, estará constituido por dos tornillos taladrados en el tablón de madera, no completamente, que actuarán como apoyos fijos. Estarán a una distancia de 0,150 m uno del otro, entre medias irá un montaje lego con la finalidad de atrapar el palito y poder realizar los ensayos de la manera más eficiente, el montaje lego irá sobre un carril formado por dos palitos de madera pegados al tablón de madera, para que su desplazamiento sea lo más lineal posible.

El banco de ensayos queda de la siguiente forma:

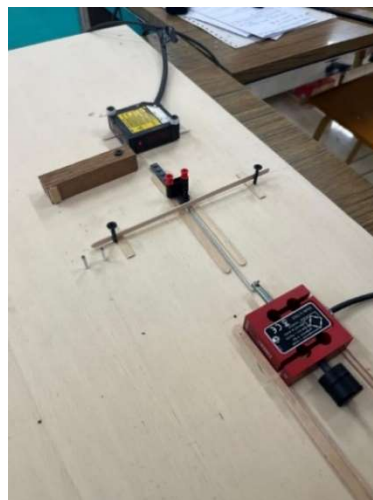


Figura 36, banco de ensayos

3.5 Procedimiento experimental

3.5.1 Ensayo a flexión

Se realizará dos ensayos a flexión, uno del palito de madera, y el otro con la unión en el medio.

Este ensayo será realizado a tres puntos, se aplicará una carga manualmente, se tirará de la parte inferior de la célula de carga, el láser que estará incidiendo en la parte plana del montaje lego medirá la flecha del palito de madera, y la célula de carga medirá la fuerza con la que se está tirando de ella, por lo que no será todo lo constante que se quiere que fuese, se harán procesos de carga y descarga reiteradamente, sin llegar a deformar el palito de madera. Se utilizará el programa “Dewesoft” para recopilar los resultados de la célula de carga y el dispositivo láser. Para comprobar si los palitos de madera tienen propiedades parecidas, se utilizarán varios de palito de madera, en todos ellos se hará un estudio sobre su rigidez y el desplazamiento obtenido, que van relacionados a través de la fuerza, como se verá más adelante.

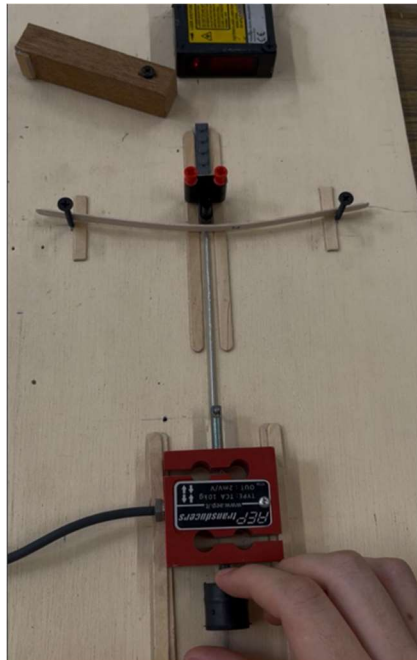


Figura 37, ensayo a flexión

3.5.2 Ensayo a compresión

En este ensayo no será necesario el dispositivo láser, se ensamblará un bloque de madera mediante un tornillo para hacer tope con el palito de madera, se utilizará la mitad del palito de madera, ya que, si se utiliza todo el palito, se generará pandeo prematuramente. Se dará la vuelta a la célula de carga ya que tendrá una superficie plana con la que hacer compresión, la célula de carga irá entre dos carriles para que la fuerza sea de manera vertical, se utilizará el programa “Dewesoft” para recopilar los resultados de la célula de carga.

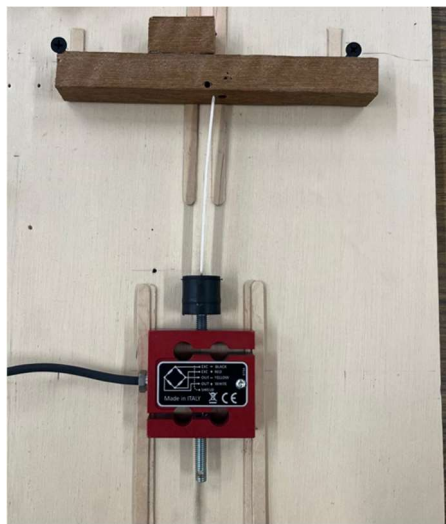


Figura 38, ensayo a compresión

3.5.3 Ensayo tracción

Para el ensayo de tracción se empleará exclusivamente una célula de carga como sistema de medida de fuerza. El montaje experimental se compone de un bloque de madera fijado al tablón de madera mediante tornillos. En este bloque se atornilla una de las uniones longitudinales para sujetar el extremo superior del palito de ensayo.

El otro extremo del palito se conecta a una segunda unión fabricada específicamente para este experimento, la cual está acoplada a la célula de carga.

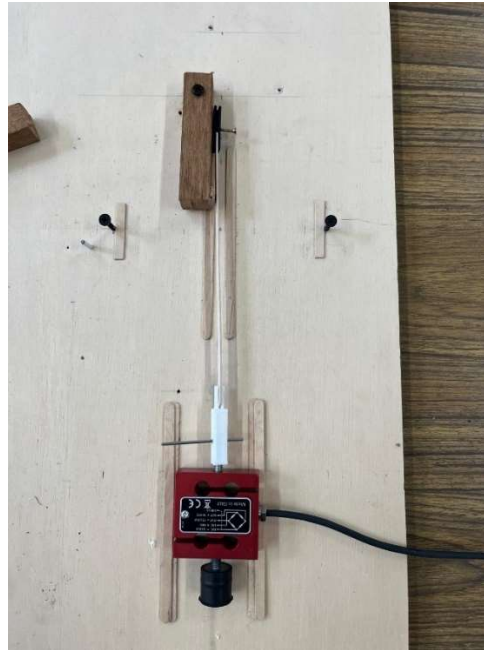


Figura 38, ensayo a tracción

La unión que se acopla a la célula de carga, es muy similar a la unión inicial, esta unión no se va a emplear a la hora de hacer el pórtico en la placa base, consta de un agujero en el eje axial de la unión, en el cual se introducirá la varilla de la célula de carga, y la sujetaremos mediante otra varilla auxiliar, la cual atravesará la unión de forma perpendicular.

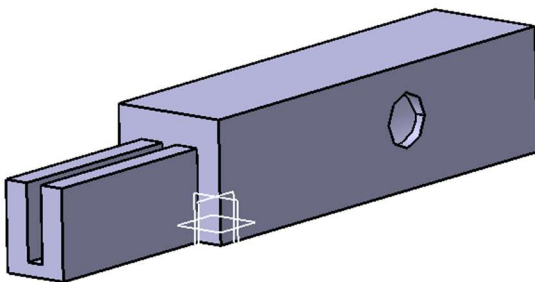


Figura 39, unión para tracción

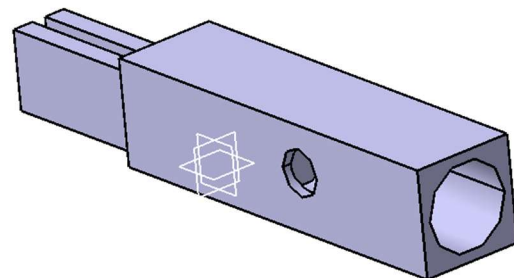


Figura 40, unión para tracción

El diámetro mayor tiene unas dimensiones de 0,008 m, ya que la varilla de la célula de carga es algo más pequeña, se ha tenido que sobredimensionar el bloque central para poder realizar el taladro, el taladro pasante más pequeño tiene unas dimensiones de 0,004 m de diámetro.

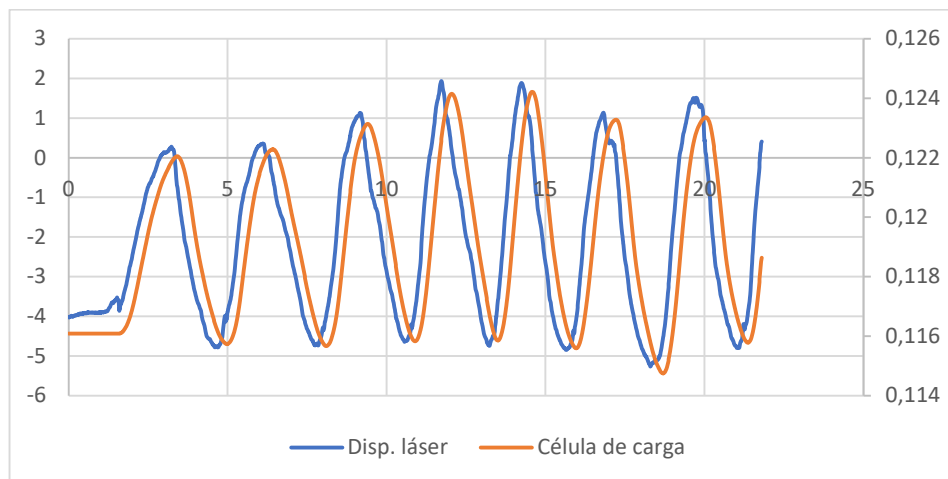
3.6 Realización de los ensayos

3.6.1 Ensayo de flexión

Con una misma probeta, palito de madera, se van a hacer varios ensayos, una vez se termine de realizar los ensayos, se recopilarán los resultados y se cogerán otras dos probetas más a ensayar, para comparar los resultados.

Se realiza el ensayo y la tarjeta de adquisición de datos recoge los resultados de la célula de carga y el dispositivo láser, estos resultados los toma a lo largo del tiempo de muestreo, en el cual hemos establecido un tiempo de muestreo de 100 segundos.

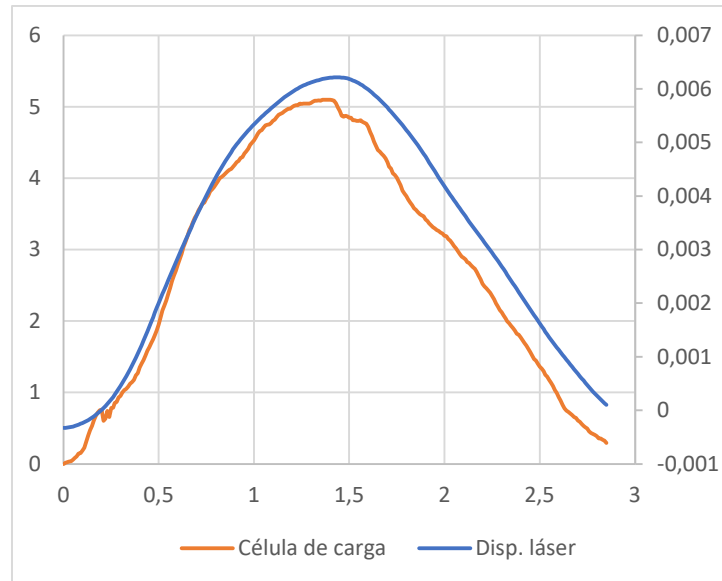
Se ha observado que el dispositivo láser va desfasado respecto a la célula de carga aproximadamente unos 0,25 segundos, atribuible a problemas en la sincronización de señales. En la siguiente gráfica se puede observar el desfase:



Gráfica 1, fuerza y desplazamiento a lo largo del tiempo

Se puede ver que la gráfica naranja, datos del dispositivo láser va adelantada.

La forma más rápida de solucionar este desfase es recortando 0,25 segundos del tramo inicial del dispositivo láser, en la siguiente figura se puede observar como el desfase ya no es tan grande, y los dos picos prácticamente coinciden.



Gráfica 2, grafica de un solo tramo del ensayo, ya curado

Si cogemos uno de los tramos y eliminamos 0,25 segundos de los datos se puede observar que el desfase casi desaparece, por lo que se va a realizar esta metodología para los ensayos.

Para estudiarlos con detenimiento se ha utilizado la herramienta de Excel, con la cual se han dividido los ensayos y se han creado sus correspondientes gráficas. Se insertarán gráficas de dispersión entre el desplazamiento medido por el dispositivo láser, ya curado, y la fuerza medida por la célula de carga.

Las medidas del dispositivo láser tendrán que estar curadas, ya que el dispositivo láser desde un principio estará midiendo la distancia a la probeta en reposo, y se quiere saber el desplazamiento originado por la carga que se está aplicando.

3.6.1.1 Ensayo sin unión

Se han realizado 16 ensayos de los cuales los 5 últimos se estaba aplicando una carga demasiado elevada, para saber la curva elástica del palito de madera.

Hay que tener en cuenta que a medida que se incrementa la carga, la pendiente de la carga y descarga va disminuyendo, por una sencilla razón:

$$F = K \cdot u \quad (3)$$

Siendo:

F: la fuerza aplicada en el ensayo (N).

K: la rigidez del sistema de estudio (N/m).

u: el desplazamiento o deformación resultante (m).

Si se aumenta la fuerza aplicada a la probeta, palito de madera, el desplazamiento será mayor, por lo que la pendiente disminuirá, aparecerán dos zonas elástico-lineal de distintas pendientes.

Se muestra la gráfica del ensayo 14, donde se puede observar con claridad las dos zonas con distinta pendiente, las dos zonas pertenecen a la zona elástica.

- Ensayo 14:

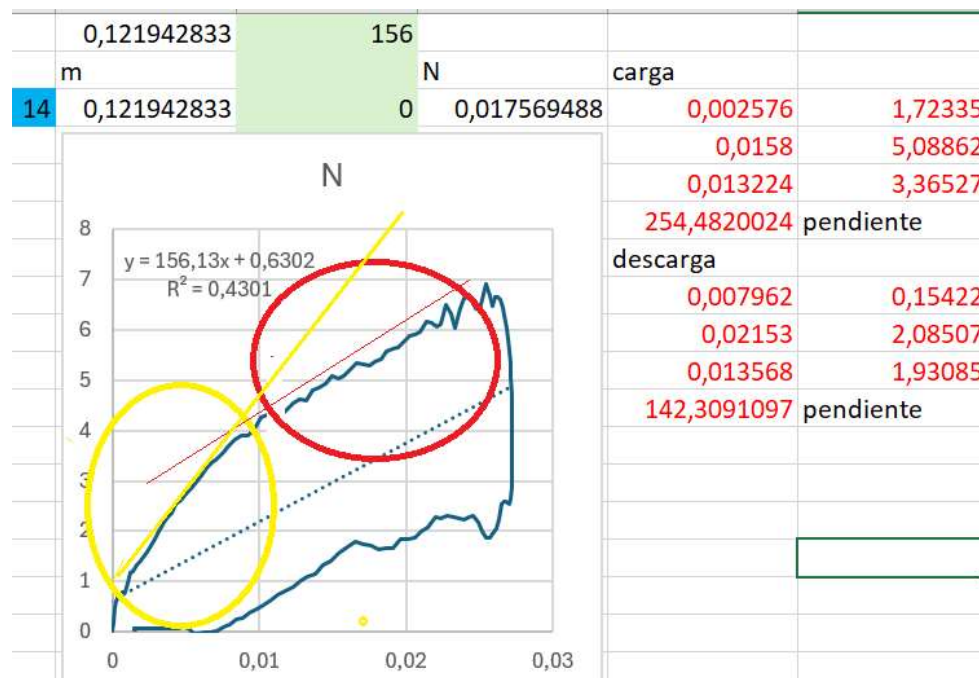


Figura 41, gráfica del ensayo 14, pendientes distintas

Escogiendo dos puntos cualesquiera de la zona de carga y de la zona de descarga, obtenemos la pendiente de las dos zonas, la de carga y descarga.

Se puede observar que, al incrementar la carga aplicada, existen dos zonas de distinta pendiente en la zona de carga, esto es debido a que, al incrementar la carga, el desplazamiento es mayor y se comporta de

distinta forma, puede ser debido a deformaciones internas, pero siempre en régimen elástico, en definitiva, la pendiente total disminuye.

Se puede ver en los valores en rojo de la **figura 52**, que en la zona de carga se ha alcanzado el valor de 6,6 Newtons, mientras que los ensayos donde se ve una linealidad más uniforme no supera los 2,5 Newtons, se puede apreciar en la **Tabla 1**.

Se insertará una tabla con los ensayos más útiles y con los ensayos que se han ido incrementando la carga:

Ensayo flexión	carga (pendiente) (N/m)	descarga (pendiente) (N/m)	pendiente media (N/m)	Fuerza máxima (N)	Despl. max.(m)
1	309,88	511,55	410,71	1,86	0,000449
2	339,48	494,17	416,82	1,87	0,000452
3	332,56	498,09	415,33	2,05	0,000558
4	304,60	477,15	390,87	1,96	0,000509
5	309,35	546,20	427,77	1,95	0,000491
6	335,80	499,29	417,55	2,15	0,000533
Incrementando					
7	325,25	424,93	375,09	2,37	0,00643
10	334,94	376,08	355,51	4,41	0,00225
13	300,38	159,45	229,91	6,11	0,00312
14	254,48	142,30	198,39	6,65	0,00362

Tabla 1, medidas pendientes, cargas, desplazamientos

La pendiente representa la rigidez del palito de madera, y a medida que se va aumentando la carga aplicada, el material va perdiendo rigidez debido a deformaciones causadas por la carga.

Es por eso que la pendiente media pasa de 400 a 200, esto puede llegar a afectar al desplazamiento, pero al estar aplicando cargas muy pequeñas la deformación va a ser mínima por lo que el desplazamiento no se va a ver afectado.

Para comprobar que estos resultados son fiables, se harán otros dos ensayos con dos palitos de madera distintos.

Dado que la carga se aplica manualmente, pueden producirse pequeñas variaciones en la intensidad y duración del esfuerzo, al igual que el tiempo de carga y descarga, pero va a ser muy parecida.

En las dos imágenes siguientes se aprecia que el segundo palito de madera se comporta de manera muy similar al primero.

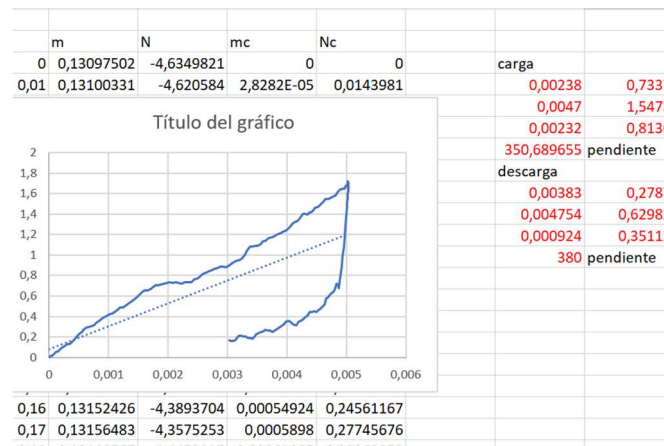


Figura 42, gráfica de dispersión desplazamiento-carga, palito 2



Figura 43, gráfica de dispersión desplazamiento-carga, palito 2

Se puede observar como las pendientes son muy parecidas, tanto en la de carga como en la de descarga. Se han realizado 16 ensayos, siguiendo el mismo procedimiento que el anterior palito, son resultados muy parecidos a los del primer palito de madera.

Se realizará un último ensayo a flexión de otro palito de madera distinto, que simplemente con cogerlo y doblarlo con la mano se puede ver que es más elástico que los dos anteriores, pero lo vamos a someter al ensayo de flexión para ver cómo se comporta.

Se han obtenido sus correspondientes gráficas y se han obtenido los siguientes resultados.

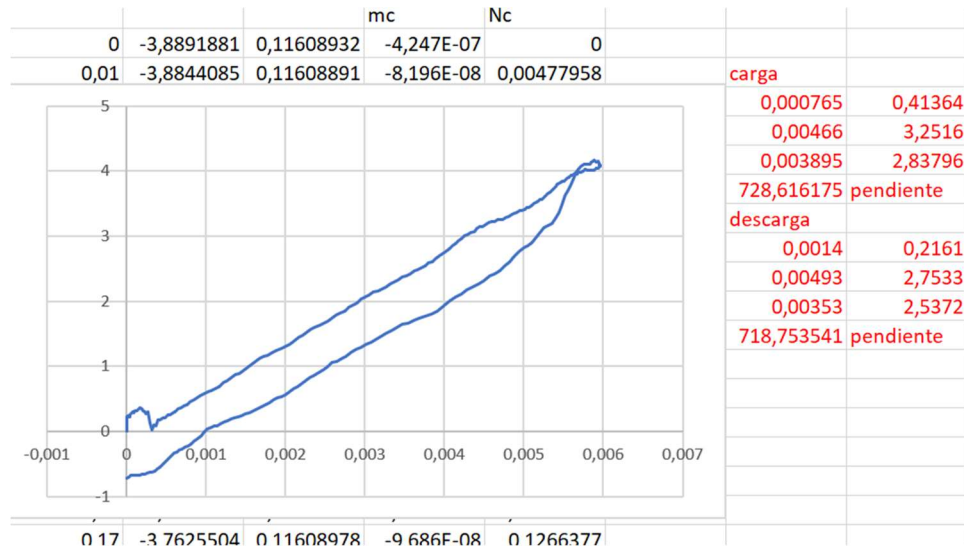


Figura 44, gráfica de dispersión desplazamiento-carga, palito 3

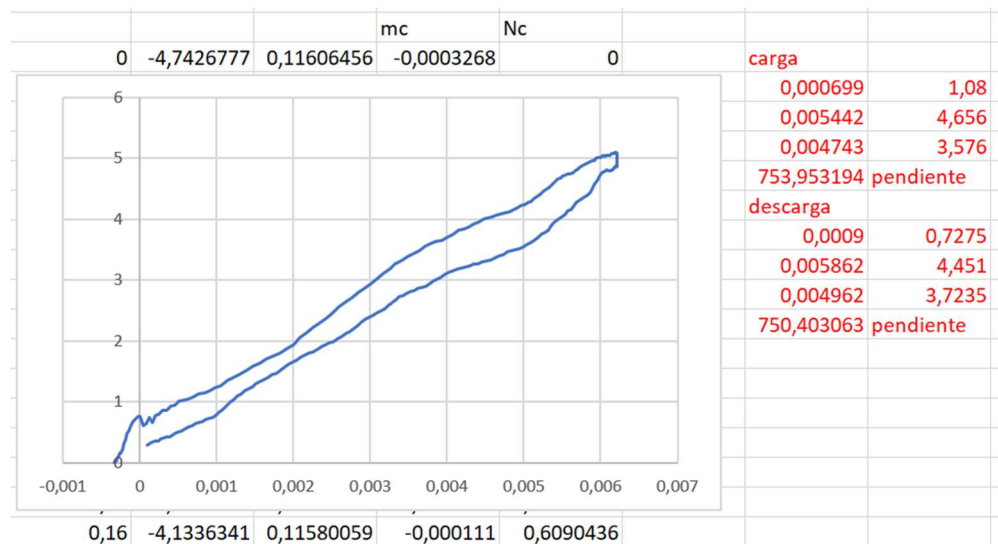


Figura 45, gráfica de dispersión desplazamiento-carga, palito 3

Se puede observar en las Figuras 53 y 54, como las pendientes de este palito de madera son mucho más grandes que la de los anteriores.

Al utilizar material de bajo costo, las propiedades de los palitos de madera van a ser distintas.

Los resultados de este palito de madera serán los utilizados a la hora de realizar el estudio a flexión en el SAP 2000.

A continuación, se mostrarán los resultados del ensayo de flexión del tercer palito de madera:

ensayo	desplazamiento para carga a 4 N (m)
1	0,00586
2	0,00544
3	0,00590
4	0,00564
media	0,00571

Tabla 2, desplazamiento aplicando una carga de 4N

- Obtención Módulo de Young

Una vez realizado el estudio del desplazamiento a 4 N, se va a proceder a calcular el módulo de Young del palito de madera sin unión a partir del desplazamiento medio obtenido por el ensayo.

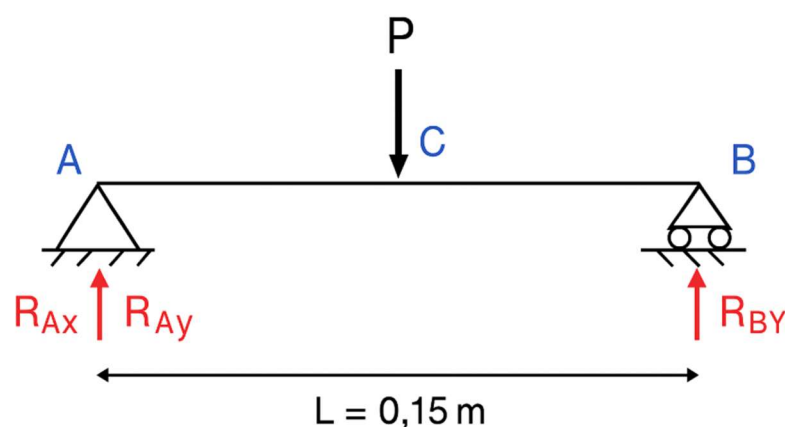


Figura 46, representación de viga biapoyada

- Viga simplemente apoyada, apoyo A es fijo, y el apoyo B es móvil, carga puntual en el centro.
- Longitud de la viga:

$$L=0,15 \text{ m}$$

- Reacciones en los apoyos:

$$R_{Ax}, R_{Ay}, R_{By}$$

Cálculo de reacciones:

$$\sum F_x = 0; R_{Ax} = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_y = 0; R_{Ay} + R_{By} - P = 0 \quad (5)$$

$$\sum M_A = 0; -P * \frac{L}{2} + R_{By} * L - P = 0 \quad (6)$$

$$R_{Ax} = R_{By} = \frac{P}{2}$$

Se analiza la simetría y se toma un tramo AC, siendo C el centro, desde $x=0$ hasta $x=L/2$.

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

$$M_u(x) = \frac{1}{2}x$$

$$\delta_{VC} = 2 * \int_0^{\frac{L}{2}} \left(\frac{P}{2}x\right) \cdot \left(\frac{1}{2}x\right) \cdot \frac{dx}{EI} = \frac{2P}{4EI} \cdot \frac{(L/2)^3}{3}$$

Donde

- $\delta_{VC} = 0,005715139$ metros
- $P = 4N$

- $I = 1,225 \times 10^{-12} \text{ m}^4$
- $L = 0,15 \text{ m}$

El módulo de Young obtenido es: $E = 4,033 \times 10^{10} \text{ Pa}$.

3.6.1.2 Ensayo con unión

Se va a realizar un ensayo más a flexión, esta vez utilizando la unión longitudinal con dos palitos de madera ya ensamblados, el procedimiento va a ser muy parecido, lo que va a cambiar es que se va a realizar la carga al centro de la unión:

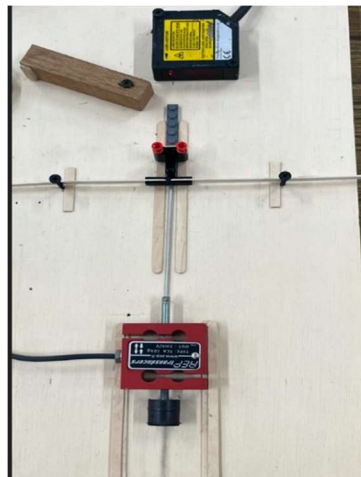


Figura 47, ensayo a flexión con unión

Se muestra tabla del ensayo a flexión con unión longitudinal.

Ensayo flexión	carga (pendiente)	descarga (pendiente)	pendiente media	Fuerza máxima (N)	Despl. max.(m)
1	929,350	946,751	938,050	3,95	0,003999
2	870,940	902,461	886,701	4,26	0,004203
3	995,537	1013,987	1004,762	3,88	0,003722
4	876,855	897,624	887,240	3,68	0,00361
5	984,046	849,194	916,620	4,19	0,004108
6	980,704	887,959	934,332	3,14	0,00283
Incrementando					
10	944,500	856,421	900,461	5,82	0,00566
11	1055,358	870,271	962,815	7,01	0,00685
12	999,606	775,299	887,453	7,7	0,00736
13	998,535	758,345	878,440	9,18	0,00892

Tabla 3, medidas pendientes, cargas y desplazamientos con unión

Se puede ver que las pendientes son bastante similares incluso aumentando la carga aplicada, una de las razones es la rigidez de la unión, al ser más rígido que el palito de madera va a necesitar mayor carga para deformarse y disminuir la pendiente. Se ha aplicado una fuerza máxima de casi 9 N y no se ha visto variación debido a la mayor rigidez de la unión impresa, la curva carga-desplazamiento mantiene una pendiente constante incluso ante incrementos de carga, a diferencia del palito de madera, que al aplicarle una fuerza de casi 6 N la pendiente iba disminuyendo, al ser un material low-cost se deforma con mayor facilidad.

Para asegurarse de que este ensayo es fiable, se va a realizar el mismo ensayo, con la misma unión, pero con distintos palitos de madera.

El resultado es el siguiente:

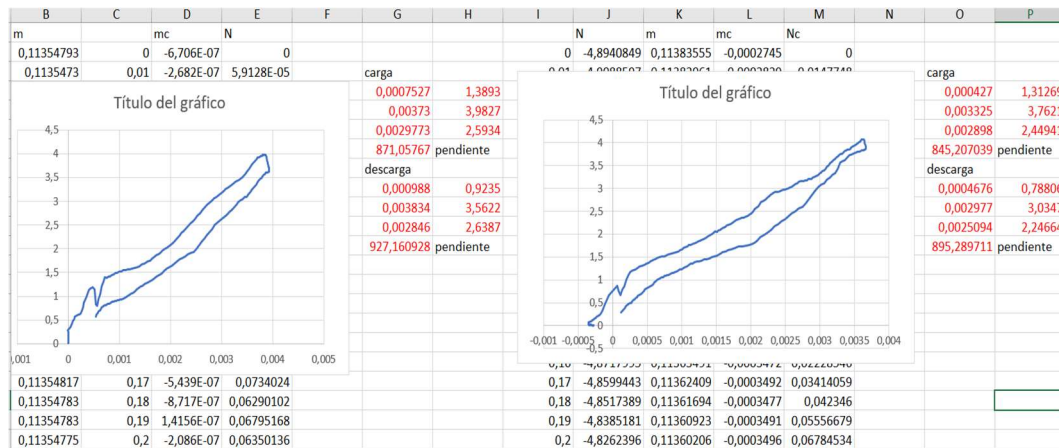


Figura 48, gráficas de dispersión desplazamiento-carga

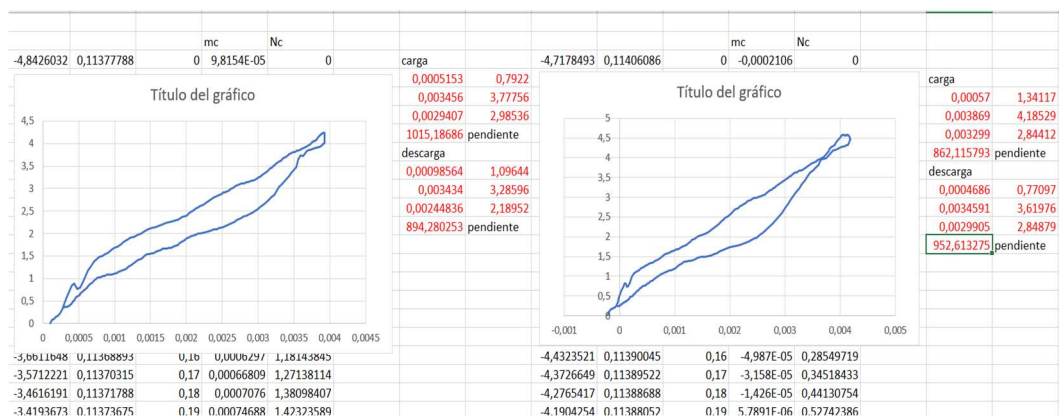


Figura 49, gráficas de dispersión desplazamiento-carga

Se puede observar claramente que las pendientes son del mismo orden de magnitud, por lo que se puede concluir que el ensayo se ha realizado correctamente.

Este ensayo va a ser útil cuando se pase al plano 2D, en el cual se va a construir un pórtico en la placa base, y se someterá a esfuerzos, más adelante se hablará de ello.

- **Obtención Módulo de Young**

Se va a seguir el mismo procedimiento que en el ensayo sin unión

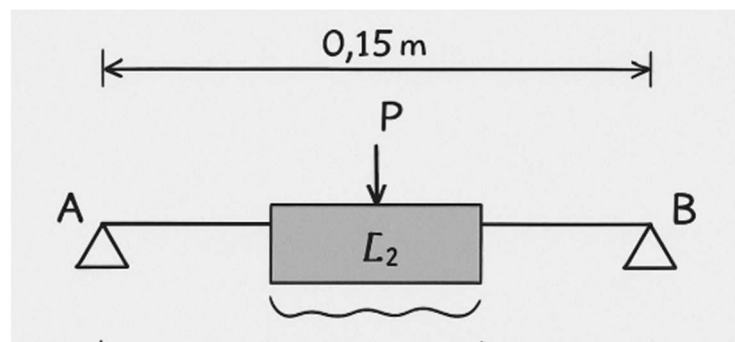


Figura 50, representación ensayo flexión con unión

Se resuelve el equilibrio de fuerzas:

$$\sum F_x = 0; R_{Ax} = 0 \quad (7)$$

$$\sum F_y = 0; R_{Ay} + R_{By} - P = 0 \quad (8)$$

$$\sum M_A = 0; -P \cdot \frac{L}{2} + R_{By} \cdot L - P = 0 \quad (9)$$

$$R_{Ax} = R_{By} = \frac{P}{2}$$

El momento en los dos tramos serán los mismos, lo único que cambiará será la sección.

$$\delta_{VC} = 2 \left(\int_0^{L_1} \left(\frac{P}{2} \cdot x \right) \cdot \left(\frac{1}{2}x \right) \cdot \frac{dx}{E_1 I_1} + \int_{L_1}^{L_2} \left(\frac{P}{2} \cdot x \right) \cdot \left(\frac{1}{2}x \right) \cdot \frac{dx}{E_2 I_2} \right)$$

$$\delta_{VC} = \frac{P}{4} \left[\frac{L_1^3}{3E_1I_1} + \frac{L_2^3 - L_1^3}{3E_2I_2} \right]$$

- $L_2 = L_1 + (0,0318/2) = 0,075 \text{ m.}$
- $E_1 = 4,033 \times 10^{10} \text{ Pa.}$
- $L_1 = 0,0591 \text{ m.}$
- $I_2 = 5,6081 \times 10^{-11} \text{ m}^4.$
- $\delta c = 0,0382 \text{ m.}$

El módulo de Young obtenido es: $E_2 = 1,56 \times 10^{11} \text{ Pa.}$

3.6.2 Ensayo de compresión

En un primer instante se realizó el ensayo con el palito de madera completo, pero al ver los resultados en el programa, se podía apreciar que ocurría pandeo muy prematuro, desde cargas muy pequeñas. Al ser muy prematuro los resultados pueden variar, ya que es más fácil cometer errores en al realizar el ensayo, una de las razones es que es más complicado de manejar un palito de madera más largo.

Se muestra una figura donde se ha realizado el ensayo de compresión para un palito de madera completo:

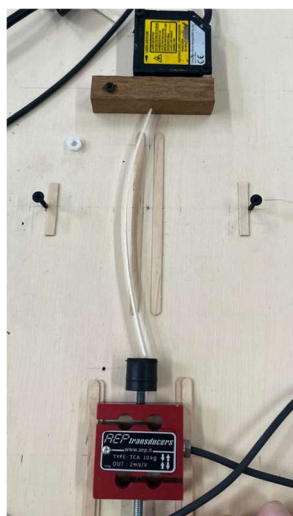


Figura 51, ensayo a tracción

Los resultados del ensayo a compresión del palito entero son los siguientes:

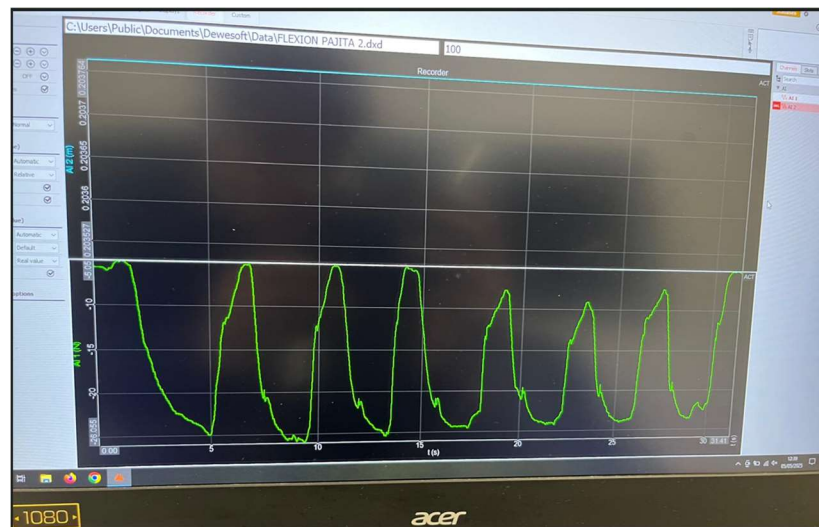


Figura 52, resultados de carga a compresión obtenidos por Dewesoft

Se puede observar en la **Figura 61**, que con un palito de madera completo el límite de pandeo está en torno a 19 N dependiendo desde donde empieza, se va a coger de referencia a -5 N, al hacerse manualmente no se va a poder ir a la referencia anterior, por eso se puede apreciar que en varios ensayos se empieza aplicando algo de fuerza en la célula.

Ensayo Compresión					
Carga de pandeo (N)	1	2	3	4	5
	-20,194	-19,189	-19,263	-18,806	-18,488

Tabla 4, carga crítica de pandeo

Se va a realizar el ensayo con medio palito de madera, de 0,0945 m.

Se va a cargar a compresión reiteradamente, intentando cargar de la misma manera. Cómo con medio palito de madera no llegaba al bloque de madera, se ha puesto otro bloque de madera fijado por los apoyos fijos, tornillos, y así se ha podido realizar correctamente el ensayo.

La realización del ensayo queda de la siguiente manera:



Figura 53, ensayo a compresión

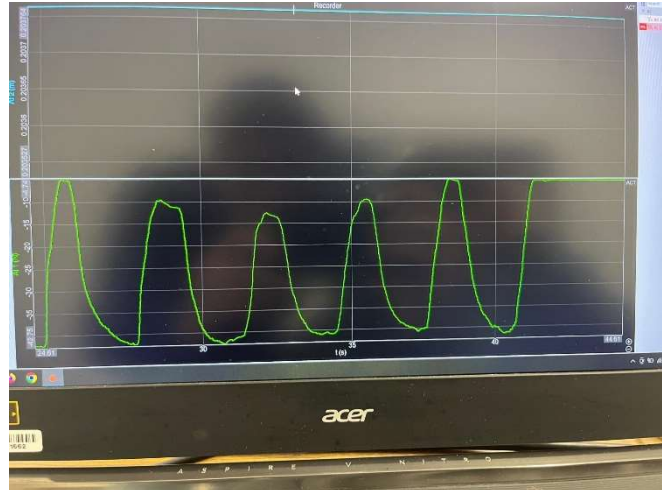


Figura 54, resultados ensayo a compresión medio palito

En el programa se puede observar los ensayos que se han realizado, se cargaba hasta el límite de pandeo, esto se sabe porque no se podía conseguir una mayor carga y esta disminuía, la curva bajaba con una pendiente distinta a la de descarga, en este ensayo no interesa el desplazamiento, solo el límite de pandeo, es por eso que no hay curva de desplazamiento del dispositivo laser.

Este ensayo se ha realizado con la misma probeta ya que cuando pandeaba no partía, por lo que podemos varios ensayos con la misma probeta.

Se ve en el programa que los picos son negativos, esto es porque a compresión significa negativo en el sistema de referencia, cuando se realice el ensayo de tracción los picos serán positivos.

Se va a realizar el estudio desde el segundo 3 y se mostrará una tabla con los 5 primeros resultados.

Ensayo Compresión					
Carga de pandeo (N)	1	2	3	4	5
	-40,271	-39,831	-39,206	-38,471	-38,659

Tabla 5, carga crítica de pandeo con medio palito

Media de carga crítica de pandeo: 39,287 N

Mediante la carga crítica de pandeo se puede obtener como de rígido es un material, es decir, Módulo de Young.

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

- $P_{cr} = 39,287 \text{ N}$
- E: Incógnita
- $I = 1,225 \times 10^{-1} \text{ m}^4$
- $L = 94,5 \times 10^{-3} \text{ m}$, longitud de medio palito
- $K = 1$, ya que esta fijo, pero no empotrado

El valor del Módulo de Young es: $3,62 \times 10^{10} \text{ Pa}$

Se puede observar que los primeros ensayos son bastante parecidos, pero se ve que se está deformando la probeta, la mitad del palito de madera, por lo que los siguientes ensayos ya no soporta tanta carga como los primeros y va disminuyendo.

Realizaremos un segundo ensayo con otra probeta, palito de madera cortado por la mitad, para ver las semejanzas de los palitos de madera ensayados a compresión.

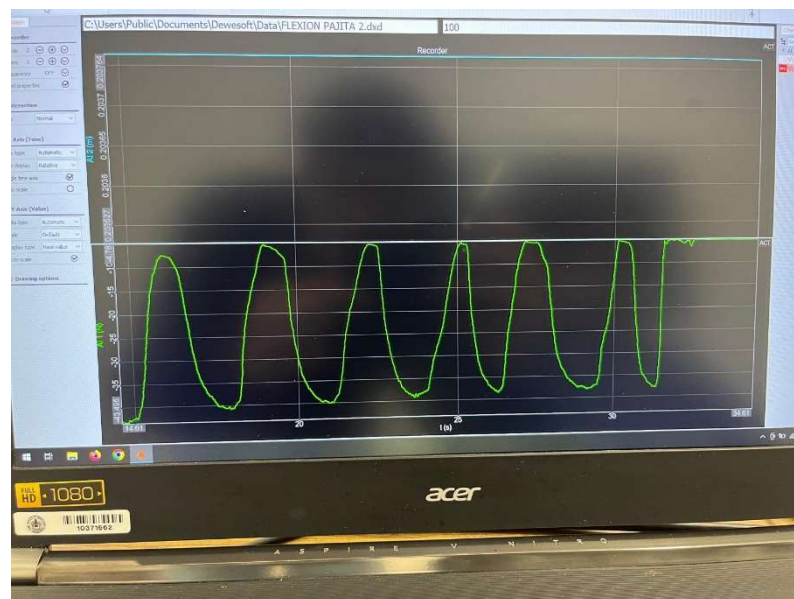


Figura 55, resultados ensayo a compresión medio palito de madera

Ensayo Compresión					
Carga de pandeo (N)	1	2	3	4	5
	-42,110	-42,750	-41,206	-40,989	-40,688

Tabla 6, carga crítica de pandeo con medio palito

Media: 41,548N

Aplicando la misma fórmula del ensayo anterior, el Módulo de Young es:
 $E = 3,836 \times 10^{10}$ Pa.

Se puede apreciar las semejanzas en cuanto a la carga de pandeo de una probeta y otra, medio palito de madera, hay diferencias ya que el corte del palito de madera no es todo lo limpio que debería de ser, diferencias de medidas que no son muy exactas, y que al ser un material low-cost puede que tenga imperfecciones y por eso tiene esa diferencia mínima de pandeo.

Se ha comprobado que el módulo de elasticidad del palito de madera es de aproximadamente 4×10^{10} Pa, según el ensayo de flexión y compresión.

Hay que tener en cuenta que no todos los palitos tienen las mismas propiedades al ser un material de bajo costo.

3.6.3 Ensayo de tracción:

El objetivo de este ensayo es, analizar cómo se comporta la unión ante cargas axiales a tracción, para ello se aplicará una fuerza a tracción hasta que se suelte de la unión. Se han realizado varios ensayos con distintos palitos de madera, cada ensayo con un palito de madera distinto.

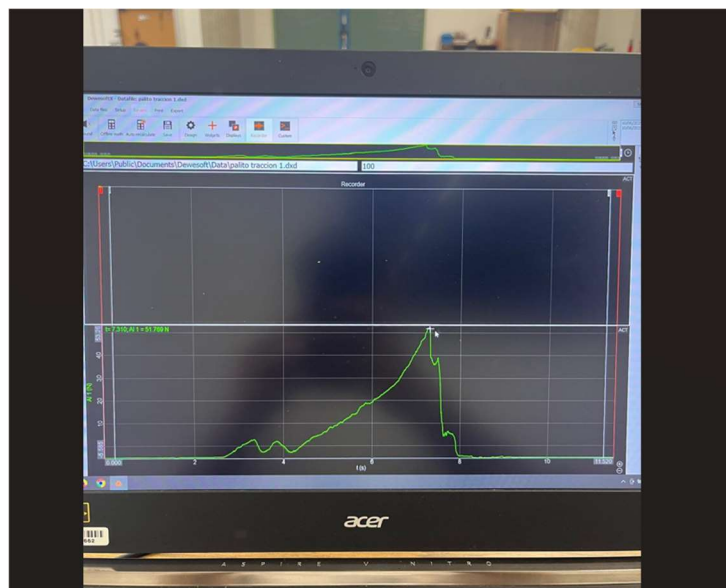


Figura 56, ensayo a tracción

Se puede observar en la gráfica como se va incrementando la fuerza hasta llegar a un pico, después cae verticalmente, esto ocurre porque se está tirando del palito de madera hasta llegar al punto donde se suelta de la unión y ya no se aplica más carga.

Se va a realizar el mismo procedimiento con palitos distintos para no dañar el mismo palito una y otra vez, y así sacar conclusiones más fiables.

Se adjunta una tabla con los resultados de los distintos palitos de madera:

Palitos	1	2	3	4	5
carga máx. (N)	51,76	53,98	50,69	47,42	48,74

Tabla 7, medidas ensayo tracción

Se puede observar en la **Tabla 7** cómo los primeros palitos de madera aguantan más, ya que la unión no ha sufrido ninguna carga anteriormente, los últimos palitos son más fáciles de soltar de la unión porque la unión se ha ido deformando, las estrías internas pierden efectividad tras varios ciclos de carga, debido a desgaste por fricción con el palito. Pero en general en todos los ensayos aguantan muy parecido

Las estrías ayudan a atrapar mejor el palito de madera cuando hay cargas axiales a tracción, pero aún no se ha realizado ningún ensayo en el cual se compare la unión con estrías y sin estrías.

Ahora para la segunda parte del ensayo a tracción, se realizará con una unión sin estrías. El procedimiento será el mismo, al igual que los materiales que se han empleado para realizar este ensayo.

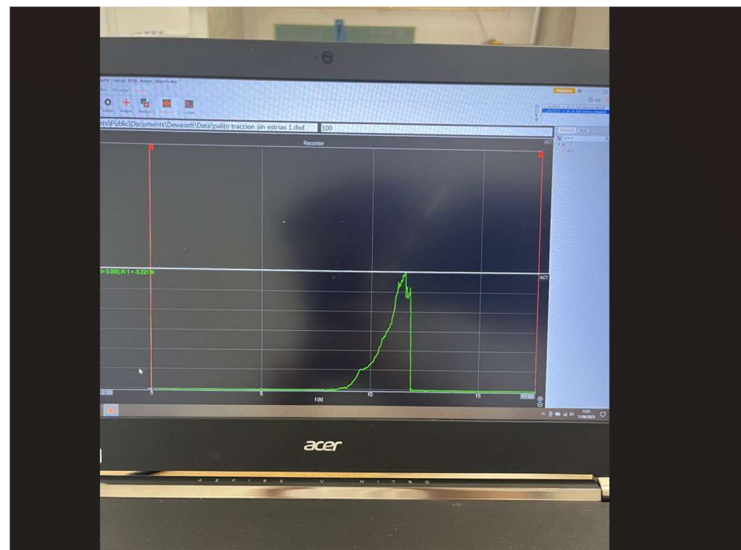


Figura 57, ensayo a tracción sin estrías

La gráfica tiene la misma curva, lo que cambia es la fuerza a la que el palito se suelta de la unión, como era de esperar se necesita menor carga a tracción para que el palito se suelte de la unión.

Se adjunta una tabla con los valores obtenidos por la unión sin estrías:

Palitos sin estrías	1	2	3	4	5
carga máx. (N)	25,77	24,92	25,57	24,34	22,624

Tabla 8, medida ensayo a tracción sin estrías

Se puede observar en la **Tabla 8** como el valor de la carga a tracción disminuye hasta la mitad en algunos casos. Cuando se utilizan estrías en perpendicular al movimiento de tracción, se necesitará mucha más carga para mover en este caso el palito de madera.

Si las estrías fuesen horizontales, es decir en dirección del movimiento, la carga necesaria para desplazar el palito de madera será mucho menor al de estrías verticales.

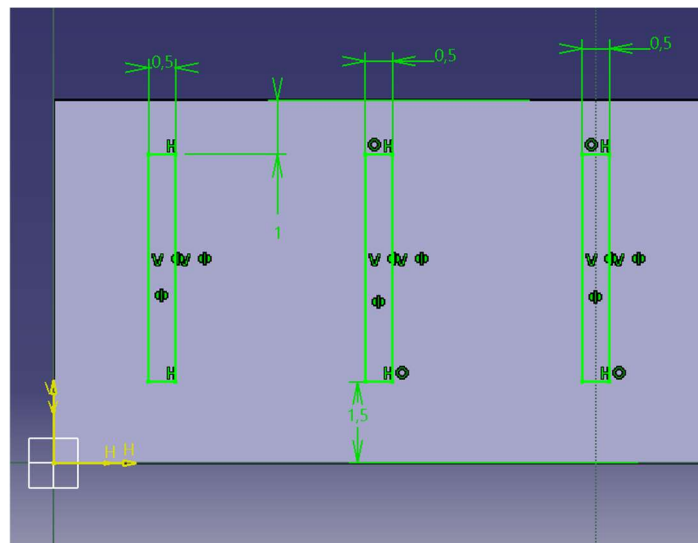


Figura 58, dimensiones estrías, en mm

Las estrías están alternadas una distancia de 0,0035 m unas de otras, a ambos lados de las paredes de la unión, todas las estrías tienen una altura de 0,0042 m y de profundidad tienen 0,0002 m.

Capítulo 4: Simulación con SAP2000

4.1 Introducción al software

El presente proyecto ha sido desarrollado con el software SAP2000, una herramienta de referencia internacional en el ámbito del análisis y diseño estructural. SAP2000 es un programa de elementos finitos con una interfaz gráfica 3D orientada a objetos, que permite realizar de forma integrada la modelación, análisis y dimensionamiento de una amplia variedad de estructuras de ingeniería civil y arquitectura.

Este software destaca por su versatilidad y potencia de cálculo, siendo capaz de abordar desde estructuras simples hasta modelos complejos que requieren análisis avanzados no lineales. Entre sus funcionalidades se incluyen la generación automática de cargas sísmicas, de viento y de tráfico vehicular, así como el dimensionamiento y verificación automática de estructuras de hormigón armado, acero, aluminio y perfiles conformados en frío, conforme a diversas normativas internacionales.

SAP2000 permite realizar análisis estáticos y dinámicos, incluyendo análisis modales, de cargas móviles y en el dominio de la frecuencia. Además, ofrece herramientas avanzadas para la evaluación de grandes desplazamientos, análisis de pandeo, colapso progresivo y comportamiento no lineal de materiales y elementos estructurales. Su compatibilidad con la metodología BIM facilita la integración con otros programas y mejora la colaboración en proyectos multidisciplinarios.

Para resolver cualquier duda surgida durante la utilización del programa, se ha recurrido a la ayuda integrada de SAP2000 y a los manuales de usuario disponibles, lo que ha permitido aprovechar al máximo las capacidades de esta herramienta en el desarrollo del proyecto.

4.2 Creación del modelo

El primer paso en el desarrollo del modelo estructural consiste en definir la geometría del ensayo. Para facilitar esta tarea, el software SAP2000 ofrece una amplia biblioteca de plantillas prediseñadas que abarcan diversas configuraciones estructurales comunes, como vigas simples, pórticos 2D y 3D, celosías, silos, embalses y escaleras. Estas plantillas permiten generar automáticamente la geometría base del modelo, requiriendo únicamente la introducción de ciertos parámetros específicos, lo que simplifica y agiliza el proceso de creación del modelo estructural.

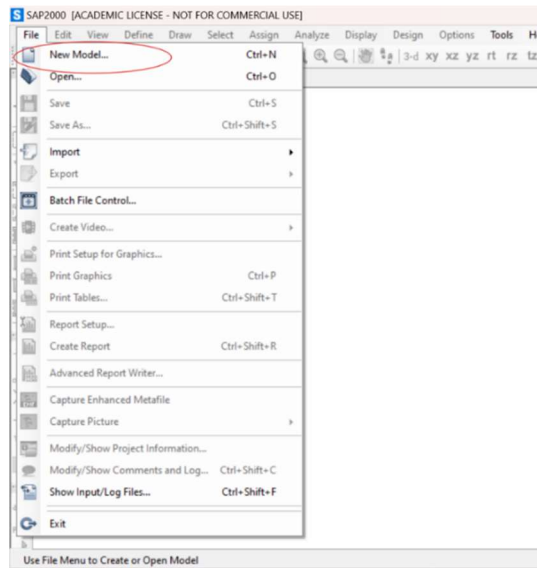


Figura 59, creación de modelo

Los pasos a seguir para la creación de la geometría en SAP2000 son los siguientes:

4.2.1 Selección de unidades:

Definir el sistema de unidades adecuado para el proyecto. En este caso se utilizarán como sistema de medida N, m y °C, ya que son sistemas internacionales, y por defecto del material se utilizará Europa, puesto es la región donde se está trabajando.

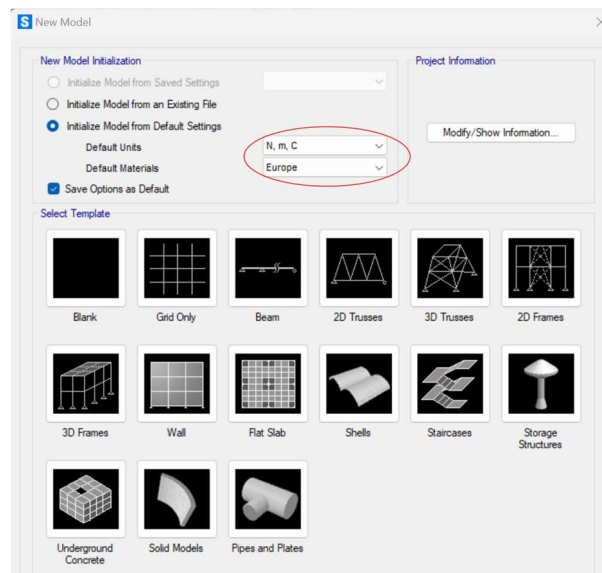


Figura 60, definición del modelo SAP

4.2.2 Creación de un nuevo modelo:

Iniciar un nuevo proyecto seleccionando una plantilla prediseñada que se aproxime a la estructura a modelar. Para ello se va a seleccionar la plantilla de "Grid Only".

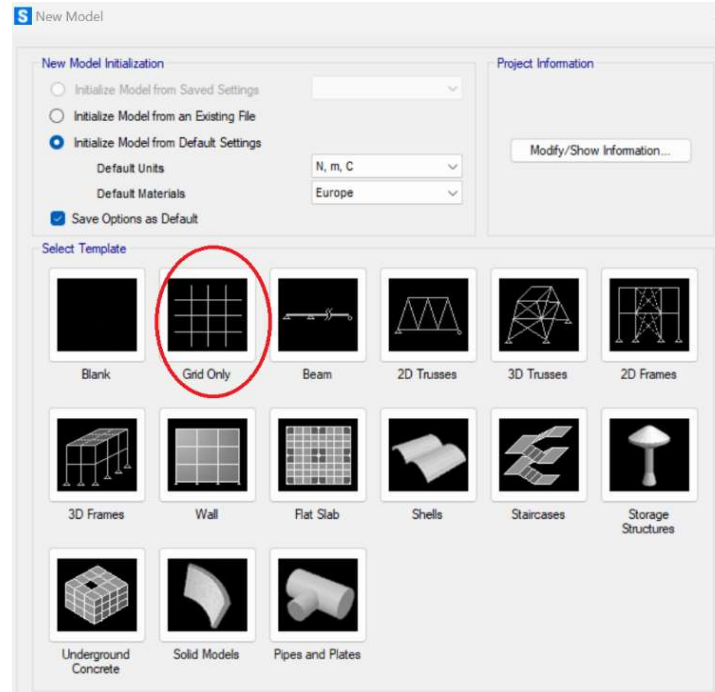


Figura 61, selección de plantilla

La plantilla "Grid Only" en SAP2000 sirve para crear un modelo nuevo donde únicamente se define la malla de referencia (*grid*) del sistema de coordenadas, sin elementos estructurales. Esta opción es especialmente útil cuando quieres empezar el modelado desde cero y necesitas personalizar completamente la geometría y disposición de los elementos estructurales según los requerimientos específicos de tu proyecto.

Al seleccionar "Grid Only", se abre una ventana donde puedes definir las líneas de la malla (*grid lines*) para un sistema de coordenadas cartesiano (X, Y, Z) o cilíndrico (radio, ángulo, Z).

En este caso se utilizará el modelo cartesiano (X, Y, Z)

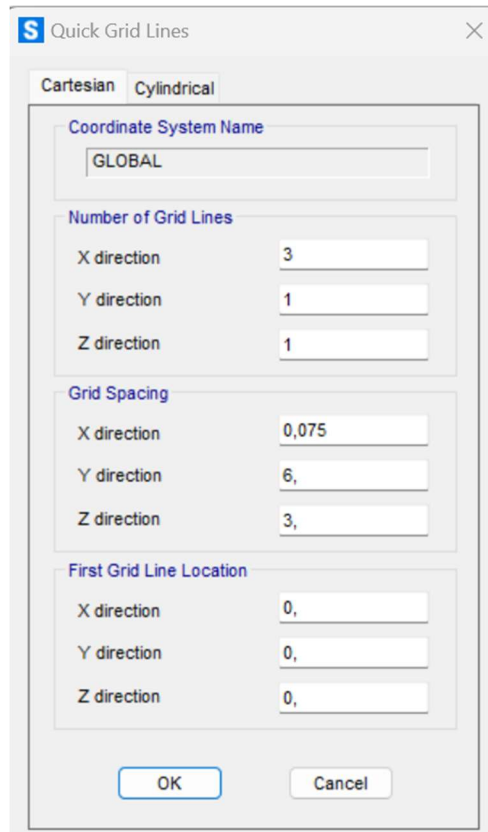


Figura 62, definición de las propiedades de la rejilla

Se va a trabajar en el plano XZ, en el cual hará falta tres mallados verticales, uno al principio de la viga, otro en el medio de la viga y al final de la viga. Estarán a una distancia de 0,075 m ya que la viga (palito de madera) mide 0,15 m.



Figura 63, tramos de la rejilla en el SAP

4.2.3 Definición de materiales y secciones:

Asignar los materiales y secciones transversales correspondientes a cada elemento estructural.

Se define el material, en “define” y dentro de define se selecciona “materials”.

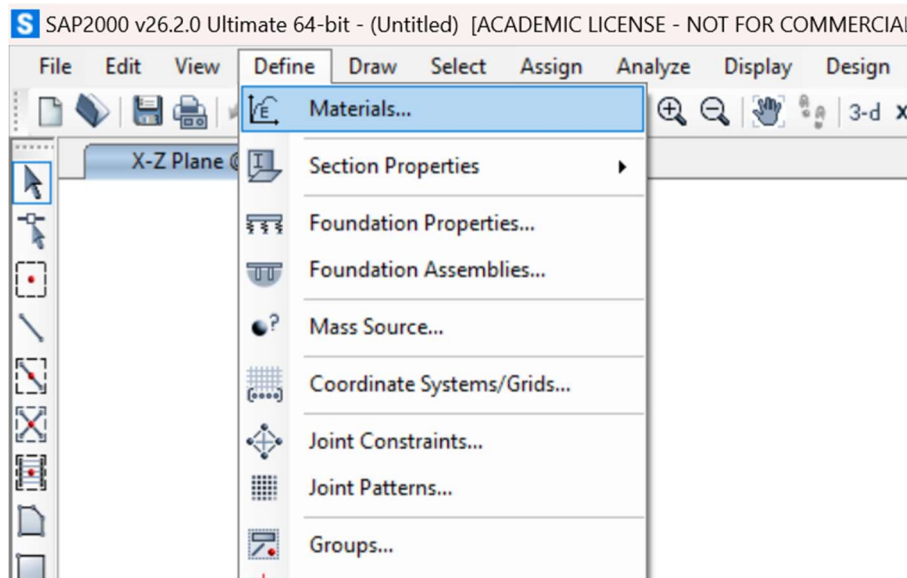


Figura 64, definición del material en el SAP

Añadimos un material nuevo, el S275, ya que es el que más se ha utilizado en clase, pero valdría cualquiera de los que vienen en el programa.

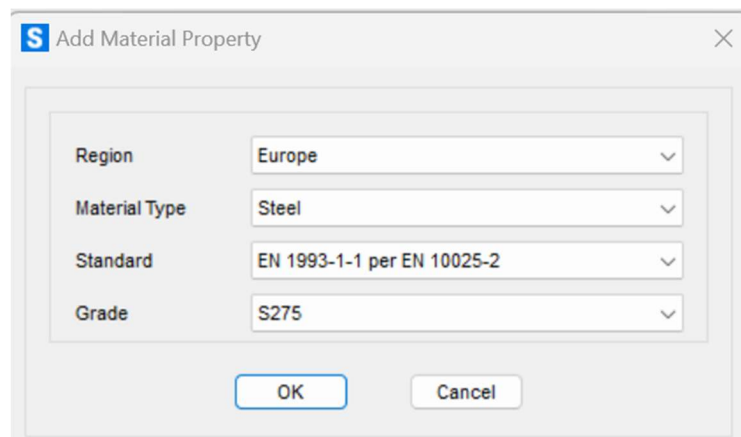


Figura 65, selección del tipo de material

Se puede seleccionar la opción de modificar el material por si fuera necesario.

Figura 66, propiedades del material elegido

En esta pestaña se muestran las distintas propiedades del S275, pero se va a prestar especial atención al módulo de Young, que es $2,1 \times 10^{11}$ Pa.

4.2.4 Sección de la viga:

Asignar las secciones transversales correspondientes a cada elemento estructural. Para ello se va a seleccionar la pestaña “Assign” y se seleccionará “Frame” que son barras.

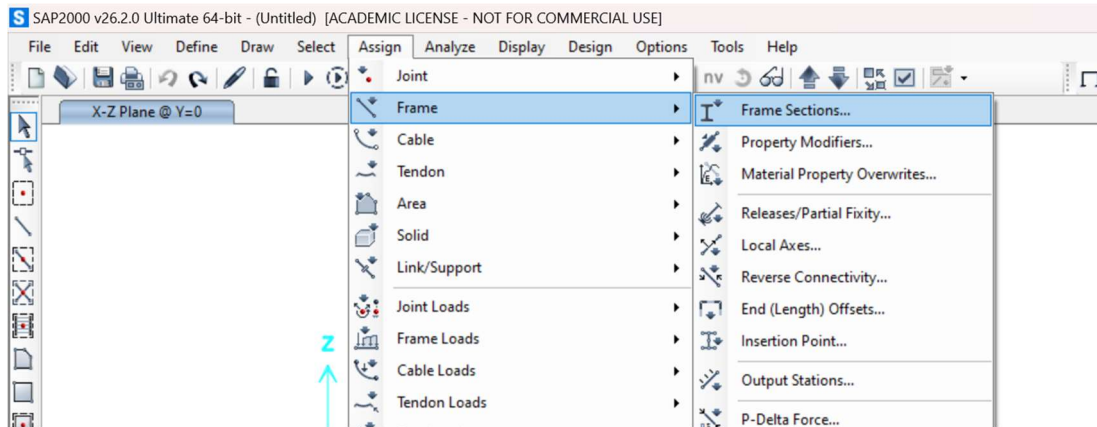


Figura 67, asignación del tipo de sección en SAP

Se seleccionará “Frame sections” ya que se quiere configurar la sección de la barra. La sección que se seleccionará y a la que se asemejará a nuestro palito de madera va a ser la sección rectangular.

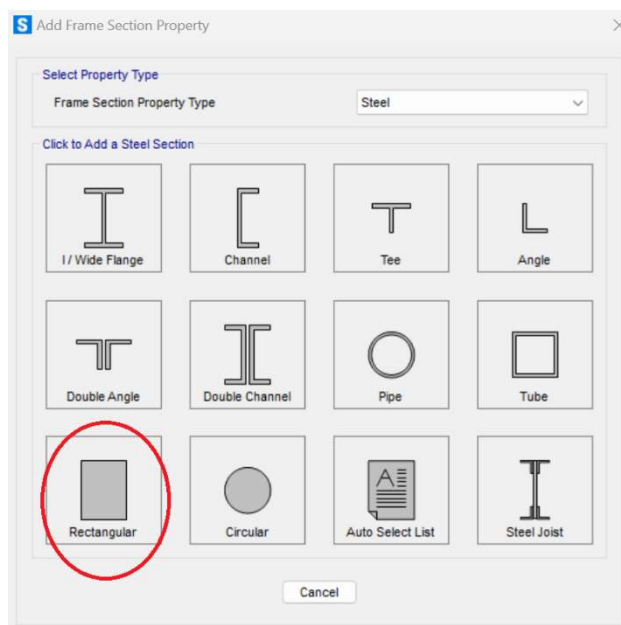


Figura 68, selección de la sección

Una vez se seleccione la geometría de la sección, se va a tener que dimensionar la sección, hay que tener en cuenta los ejes, y en qué dirección estará aplicada la fuerza.

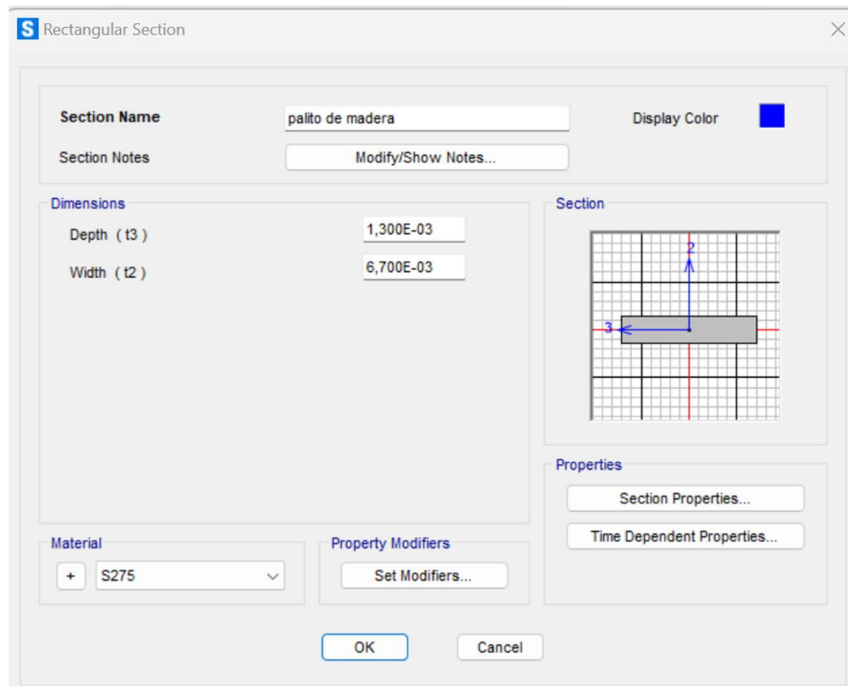


Figura 69, dimensionamiento de la sección en SAP

La profundidad de la sección se va a corresponder con el ancho del palito de madera, y el ancho de la sección se va a corresponder con la profundidad del palito de madera.

Una vez que se tienen las dimensiones, hay que seleccionar las barras que tengan esos parámetros, para ello se selecciona “Draw frame”, otra opción es seleccionando justo el icono de debajo “Quick draw frame”, es más cómodo.

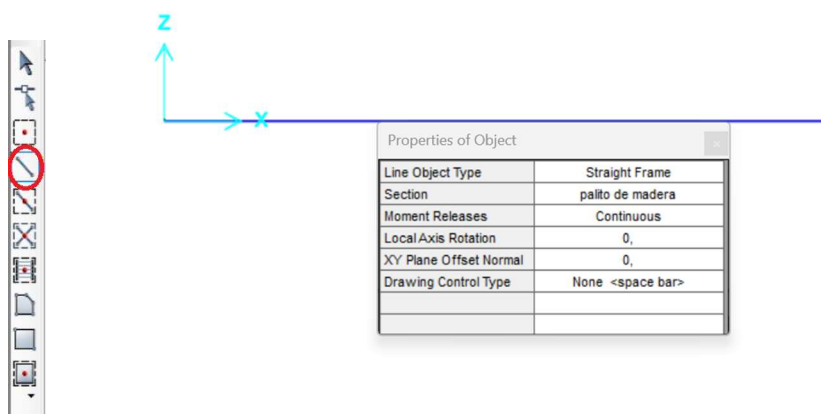


Figura 70, asignación de la sección en la rejilla

Hay que fijarse que se esté dibujando la sección correcta, en este caso se tiene que dibujar seleccionando la sección que se ha configurado.

4.2.5 Definición de cargas y condiciones de contorno:

Asignar la fuerza que deseamos cargar y los apoyos.

Para ello hay que definir un patrón, se seleccionará “Define” y dentro de define “Pattern Loads”.

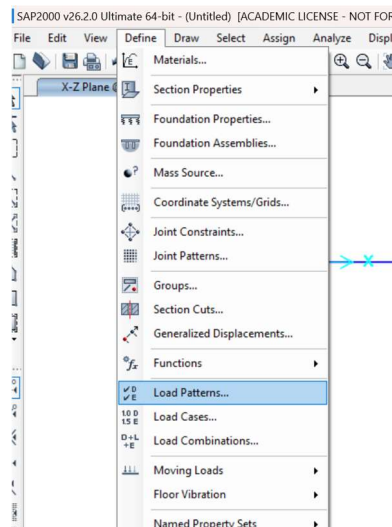


Figura 71, definición de una fuerza

Para pasar al 3D, primero hay que seleccionar el tick, y en “general options” se selecciona la casilla de “extrude”.



Figura 72, pasar al espacio 3D en SAP

El comando Extrude facilita la creación rápida de estructuras tridimensionales a partir de elementos simples, ahorrando tiempo en el modelado de geometrías complejas y permitiendo una mayor flexibilidad en el diseño estructural dentro de SAP2000.

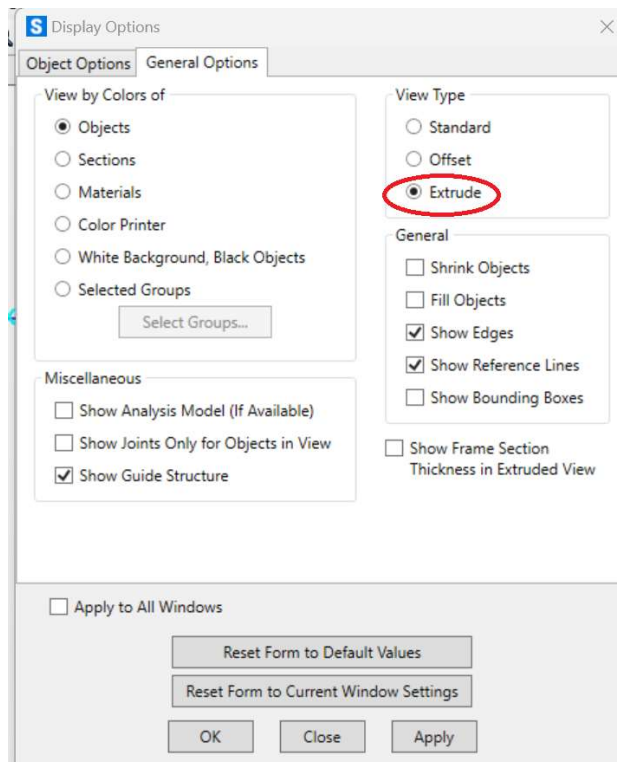


Figura 73, creación de estructuras tridimensionales

La barra en 3D quedaría de la siguiente manera:

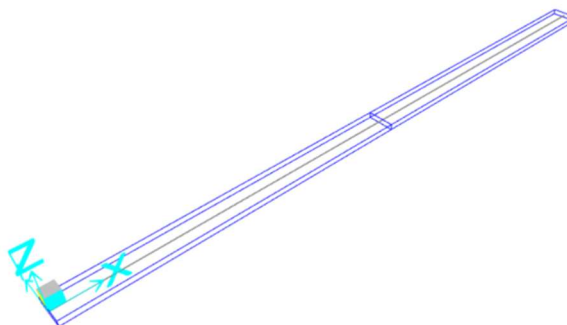


Figura 74, estructura 3D en SAP palito sin unión

Se puede observar que se ha configurado correctamente las dimensiones de la viga y su sección, el siguiente paso es insertar los apoyos, vamos a utilizar dos apoyos fijos.

4.2.6 Asignación de cargas y apoyos

Para ello se va a seleccionar los dos puntos donde se quieren definir los apoyos fijos, en este caso van a ser los extremos de la viga, en la sección “Assign” hay que seleccionar “Joint” y por último se seleccionarán los movimientos que serán restringidos, en “Restraints”.

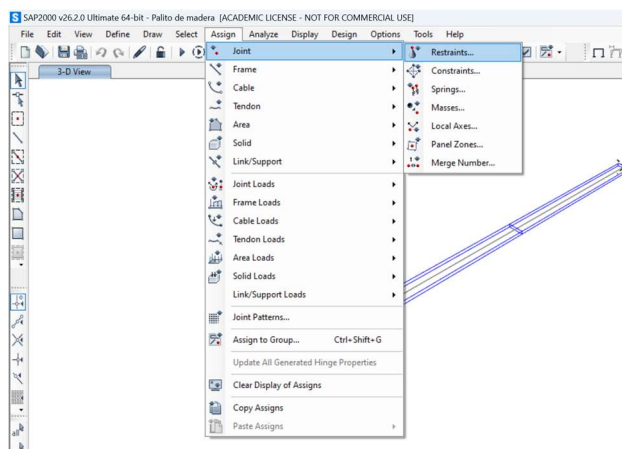


Figura 75, asignación de apoyos al palito sin unión

Aparecerá una nueva pestaña en la cual se debe elegir los apoyos, para esta práctica se escogerán dos apoyos fijos que impiden tanto el movimiento horizontal y vertical, pero permiten el giro.

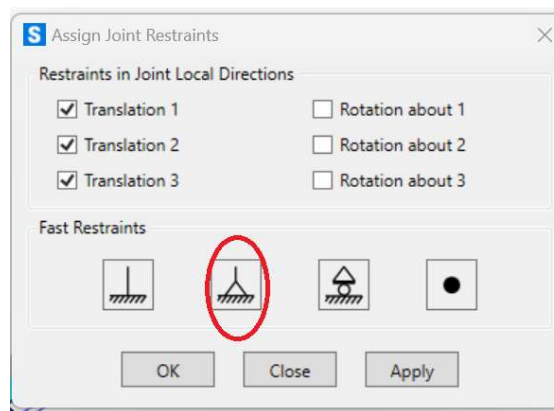


Figura 76, selección de los apoyos fijos

La viga quedaría de la siguiente forma:

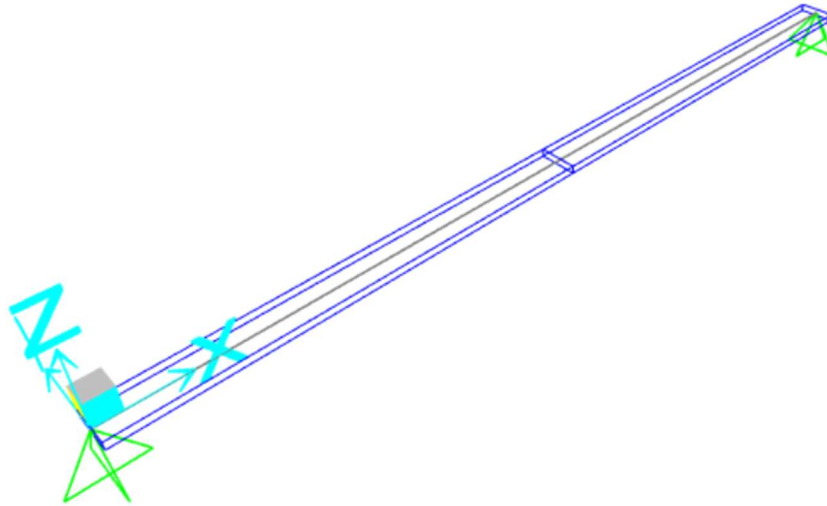


Figura 77, palito de madera en vista 3D en SAP



Figura 78, palito de madera ejes x-z en SAP

Para seguir, hay que cargar la fuerza “F” que se ha caracterizado anteriormente. Se asigna una fuerza en la pestaña “Assign”, se selecciona “Joint loads”, y por último “Force”. Para que se asemeje al ensayo de flexión que se ha realizado, la aplicación de la carga será en el centro de la viga, en dirección negativa del eje vertical, en este caso el eje “z”. Es importante haber seleccionado el punto de la viga donde va a ir asignada la fuerza, y no tener ninguna otra fuerza aplicada.

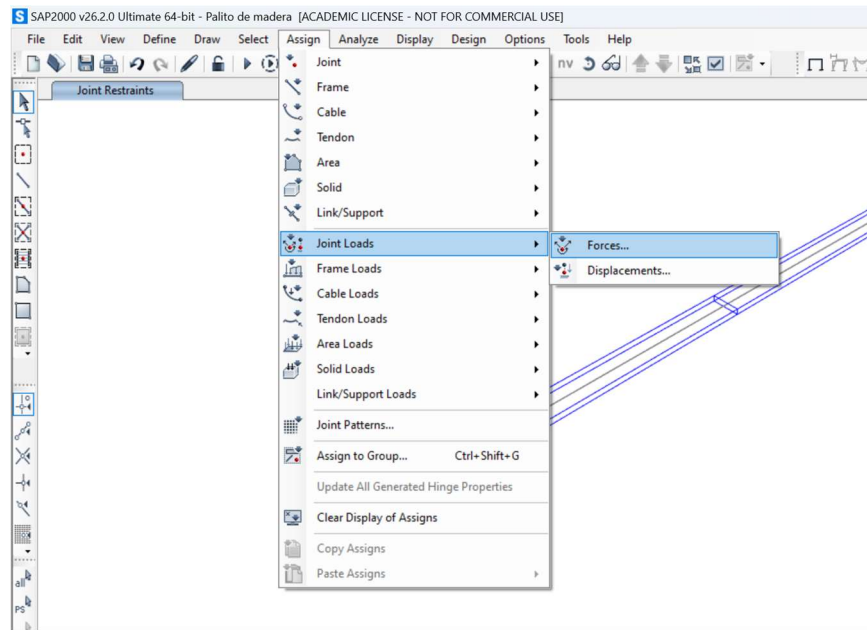


Figura 79, asignación de cargas en SAP

Hay que marcar la fuerza F que se ha caracterizado, junto con la dirección a la que se quiere cargar, se va a aplicar una fuerza estándar de 4 N hacia abajo, por lo que en el eje Z se va a poner un -4 N para que vaya en la dirección negativa del eje vertical, es decir, el eje Z.

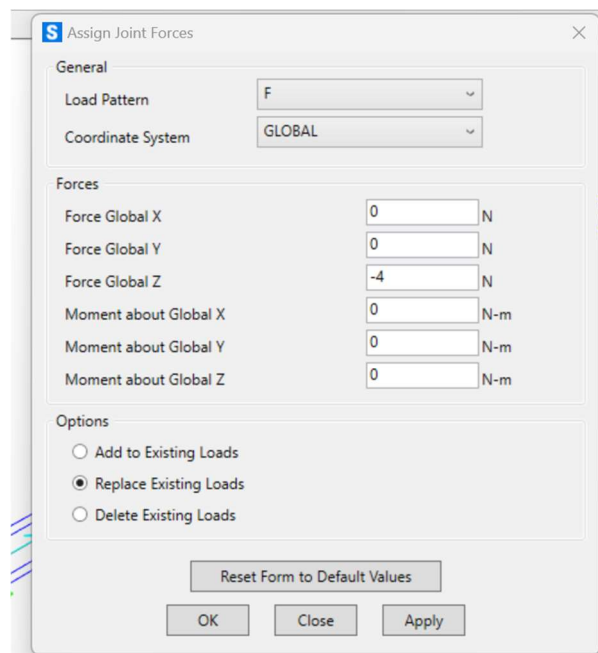


Figura 80, asignación de carga en el eje vertical

Una vez aplicada la carga en el centro de la viga lo siguiente que se debe hacer es mostrar el efecto de la carga en la viga y el desplazamiento obtenido, para ello se selecciona el botón de “Run Analysis”.

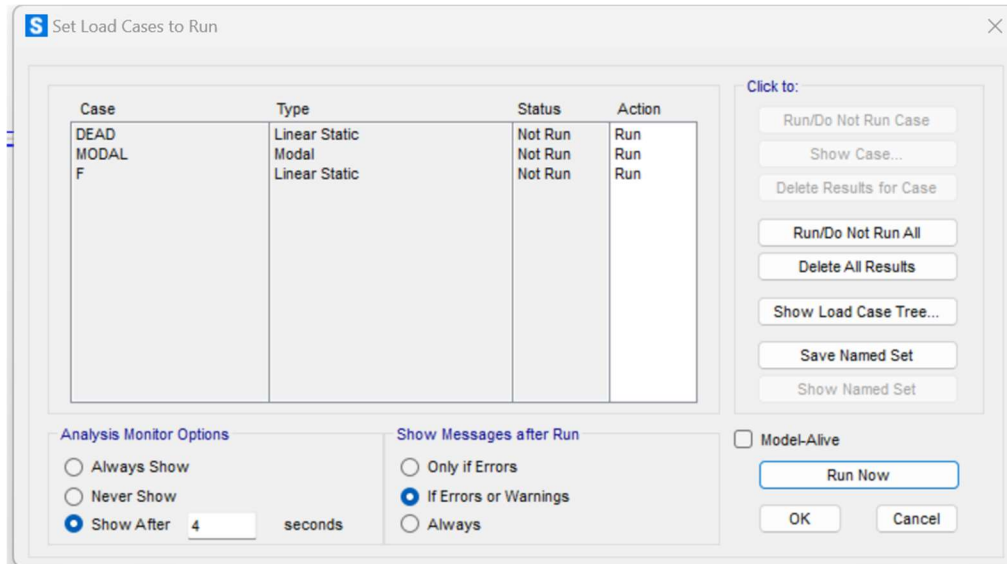


Figura 81, compilación del programa

La deformada de la viga es la siguiente:

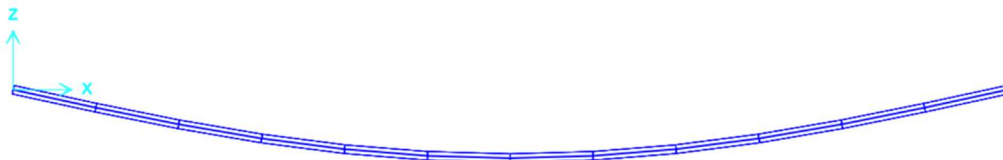


Figura 82, deformada del palito de madera en SAP

Se está mostrando la deformada bajo el caso de carga propio, que es un caso de carga de peso propio puesto por defecto, pero este caso no interesa.

Se quiere estudiar el caso de carga aplicada, para ello se seleccionará “Show deformed shape”

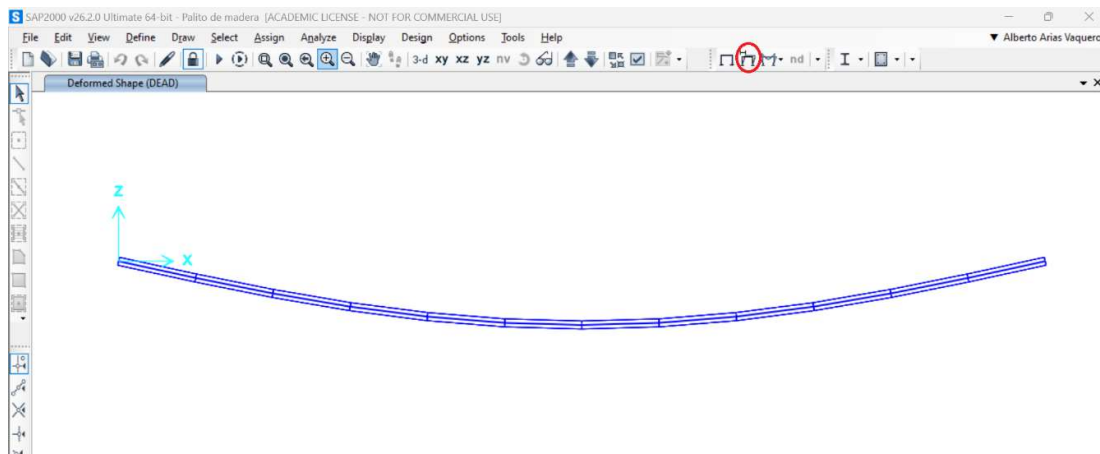


Figura 83, cambio de carga aplicada

Hay que seleccionar la fuerza F, que por defecto estaba seleccionada la del peso propio y también hay que seleccionar la opción de “wire shadow” para mostrar simultáneamente la forma original (no deformada) y la forma deformada de la estructura en la misma vista, esto facilita la identificación de desplazamientos y deformaciones.

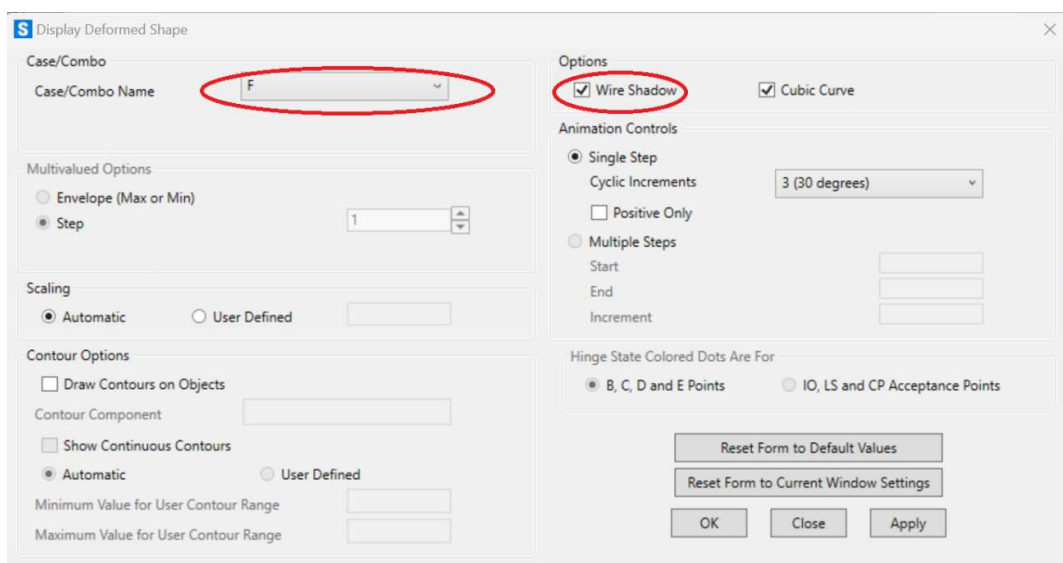


Figura 84, selección de parámetros

Si se acerca el cursor a la zona donde se ha aplicado la fuerza, se puede observar que se muestra el desplazamiento obtenido en metros, que en este caso si la viga fuese de acero se desplazaría 0,00109 m hacia abajo.

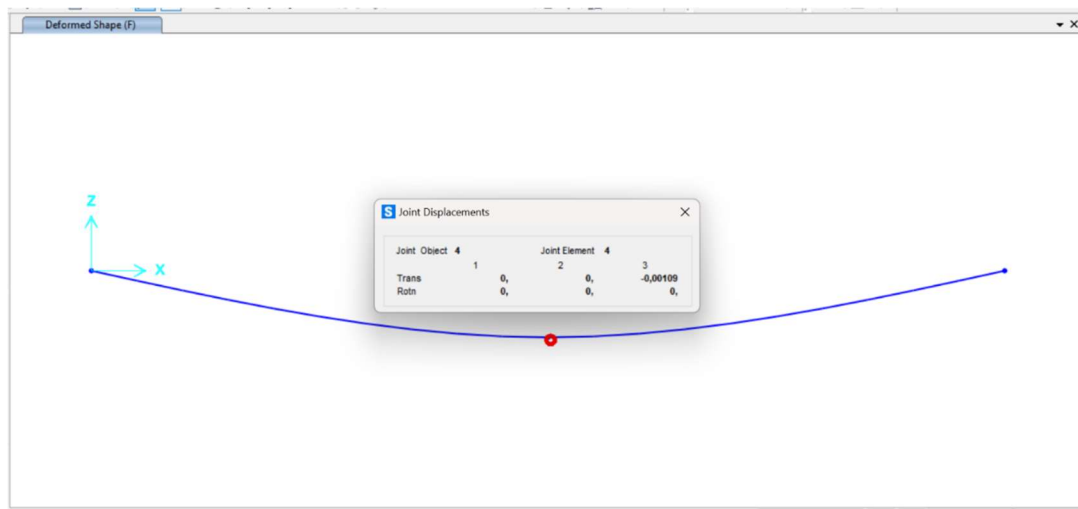


Figura 85, desplazamiento obtenido si la viga fuese de acero

Después de hacer varios ensayos con distintos palitos de madera, no se puede decir que las características sean iguales para todos los palitos, hay que tener en cuenta que es un material low-cost, por lo que es probable que existan imperfecciones en algunos palitos de madera.

Para la comprobación con el programa SAP 2000, se ha escogido un palito de madera con las siguientes características (palito de madera 3 sin unión, en el ensayo de flexión):

ensayo	desplazamiento para carga a 4 N (m)
1	0,005868
2	0,005447
3	0,005901
4	0,005642
media	0,005715

Tabla 9, desplazamiento obtenido para el caso de carga de 4 N, en el ensayo experimental.

Se puede observar en la **Tabla 9** que es bastante distinto a los resultados de los ensayos que se hicieron con los primeros palitos de madera.

4.2.7 Estimación del módulo de Young

La viga no es de acero, sino de madera, pero no se sabe cuál es su módulo de Young (E), se puede saber mediante en una sencilla regla de tres, si con un módulo de Young de $2,1 \times 10^{11}$ Pa tiene un desplazamiento de 0,00109 m, el módulo de Young que tendrá la madera aplicando la misma fuerza 4 N y con un desplazamiento de 0,005715 m será de $4,005 \times 10^{10}$ Pa.

Para el desplazamiento del palito de madera se ha utilizado el del modelo experimental, el ensayo que se ha realizado a flexión.

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

$$\delta_{acero} = 0,00109 \text{ m}$$

$$\delta_{madera} = 0,005715 \text{ m}$$

$$E_{madera} = \frac{\delta_{acero}}{\delta_{madera}} \times E_{acero} = 4,005 \times 10^{10} \text{ Pa.} \quad (10)$$

Para comprobar que la probeta, palito de madera, tiene un Módulo de Young de $4,005 \times 10^{10}$ Pa, se va a cambiar en el programa el Módulo de Young al calculado para comprobar que el desplazamiento calculado coincide con el desplazamiento obtenido al realizar el ensayo.

Para ello se va a ir a “Define”, se selecciona “materials” y se cambia el Módulo de Young.

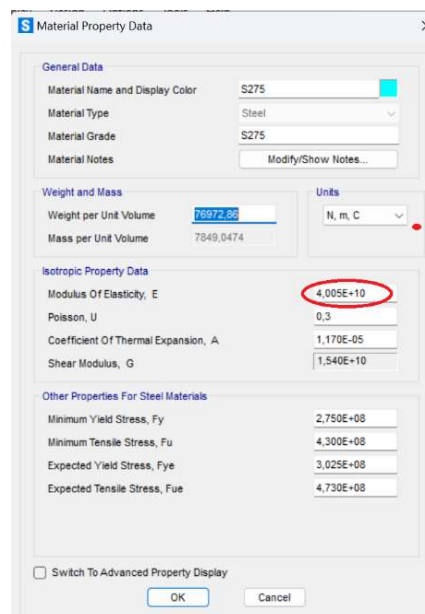


Figura 86, cambio del módulo de Young en SAP

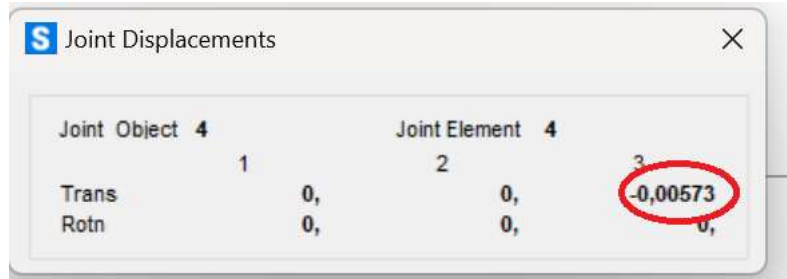


Figura 87, desplazamiento obtenido con las propiedades del palito de madera

El desplazamiento obtenido al realizar los ensayos es de 0,005715 m, el obtenido por el programa es de 0,00573 m.

Este resultado permite concluir que la metodología experimental utilizada es adecuada para caracterizar el módulo de elasticidad del palito de madera.

4.3 Ensayo flexión con unión

Ahora se va a realizar el mismo procedimiento, solo que el ensayo se va a realizar con la unión que se ha impreso con la impresora 3D.

Se crea un nuevo modelo con los mismos parámetros que en el anterior, y se seleccionará el modo "Grid Only". La distancia entre apoyos es de 0,15 m, y la unión mide 0,0318 m, utilizaremos 5 líneas para dividir el palito de madera con unión, y las mismas características que en el anterior ensayo.

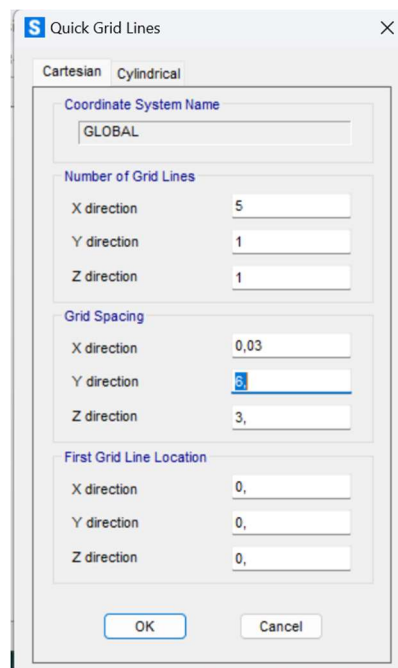


Figura 88, definición de las propiedades de la rejilla

Define Grid System Data

System Name: GLOBAL

Grid Data

Grid ID	Ordinate (m)	Line Type	Visible	Bubble Loc	Grid Color
A	0	Primary	Yes	End	
B	0,0591	Primary	Yes	End	
C	0,075	Primary	Yes	End	
D	0,0909	Primary	Yes	End	
E	0,15	Primary	Yes	End	

Y Grid Data

Grid ID	Ordinate (m)	Line Type	Visible	Bubble Loc	Grid Color
1	0	Primary	Yes	Start	

Z Grid Data

Grid ID	Ordinate (m)	Line Type	Visible	Bubble Loc	Grid Color
Z1	0	Primary	Yes	End	

Grid Lines

Quick Start...

Display Grids as:

☒ Ordinates ☐ Spacing

☐ Hide All Grid Lines

☐ Glue to Grid Lines

Bubble Size: 0,75

Reset to Default Color

Reorder Ordinates

OK Cancel

Figura 89, ajuste personalizado del mallado para la creación de la viga con distinta sección

Se selecciona “*edit grid data*” y se puede dividir los tramos de la probeta, palito de madera con unión, según la sección que se tiene, desde 0 m a 0,0591 m se tiene palito de madera, de 0,0591 m a 0,0909 m hay unión, y el resto es palito de madera.

Se define otro material, que va a ser la unión, pero con el módulo de elasticidad del acero, ya que no se sabe el módulo de elasticidad de la unión, y con una simple regla de tres se puede calcular el módulo de elasticidad de la unión, como se ha hecho en el ensayo de flexión sin unión, pero con la diferencia que en este caso ya se ha calculado el módulo de Young del palito de madera, por lo que se utilizará también el del palito de madera.

Figura 90, propiedades iniciales de la unión

Una vez se define el nuevo material que se va a utilizar, hay que definir sus dimensiones, teniendo en cuenta en todo momento los ejes. La unión tiene una profundidad de 0,005 m y un ancho de 0,0067 m.

Siempre hay que asegurarse de que el material al que se está seleccionando la sección es el correcto, en la parte inferior de la pestaña se puede seleccionar el material al que se quiere aplicar la sección.

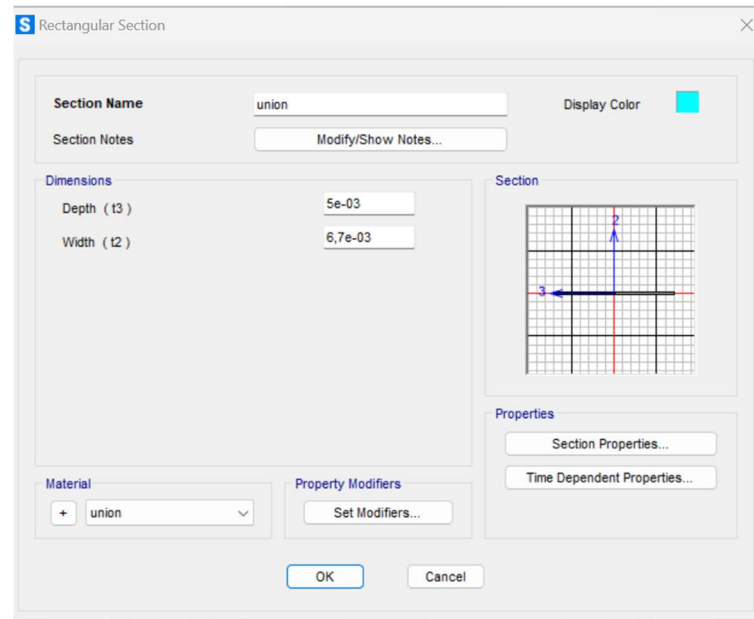


Figura 91, dimensiones de la unión

Siguiendo los mismos pasos que el anterior ensayo, se seleccionarán los tramos que son de palito de madera y los tramos que son de unión.

La probeta quedaría de la siguiente manera en el programa:

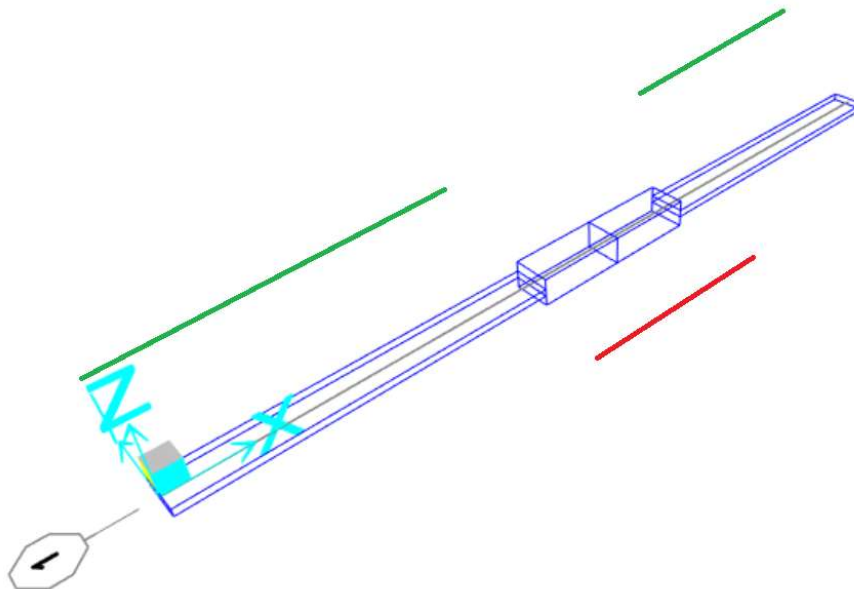


Figura 92, representación del palito de madera con unión en SAP

Donde la sección más fina es el palito de madera, marcado en verde, y sección más ancha es la unión.

Se seleccionarán los apoyos y se cargará en el medio de la probeta, dos medios de palitos de madera con unión.

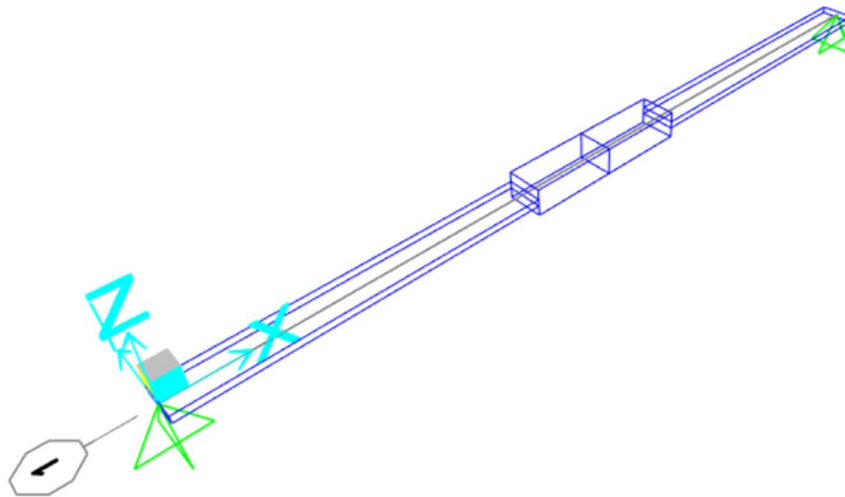


Figura 93, asignación de apoyos

El desplazamiento obtenido con la unión es de 0,00281 m, asemejando la unión al acero en cuanto al módulo de elasticidad, para luego realizar los cálculos pertinentes, realizados en el ensayo con unión.

S Joint Displacements					
Joint Object 8			Joint Element 8		
	1		2	3	
Trans	0,		0,	-0,00281	
Rotn	0,		0,	0,	

Figura 94, desplazamiento obtenido si la unión fuese de acero

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

$$\delta_{acero} = 0,00281 \text{ m.}$$

$$\delta_{union} = 0,00382 \text{ m}$$

$$E_{union} = \frac{\delta_{acero}}{\delta_{union}} \times E_{acero} = 1,544 \times 10^{11} \text{ Pa} \quad (11)$$

Para comprobar que la realización del ensayo en el programa es correcta, se va a sustituir el módulo de Young de la unión, que estaba con la del acero, y se pondrá el módulo de Young calculado.

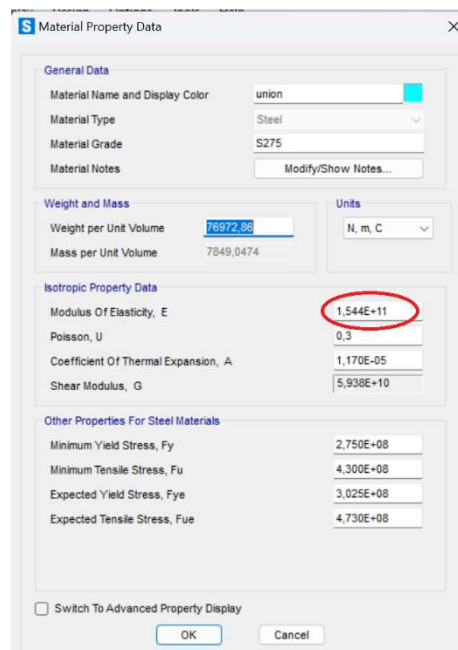


Figura 95, configuración del módulo de Young en SAP

El desplazamiento obtenido es:

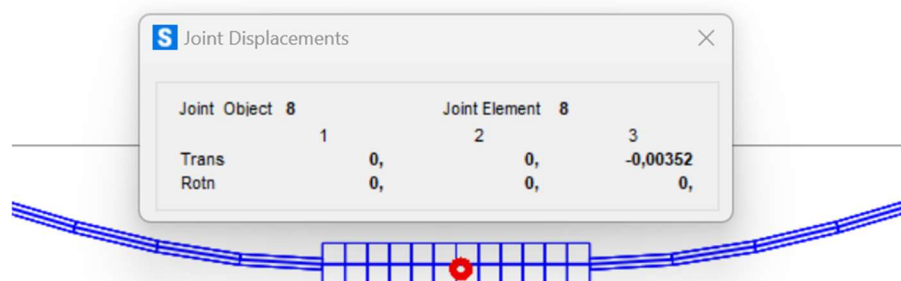


Figura 96, desplazamiento central obtenido del palito de madera con unión

Se puede observar que hay variación del desplazamiento entre la unión de módulo de elasticidad de acero y la calculada, pero hay diferencia entre el desplazamiento calculado mediante el programa y el desplazamiento obtenido por los ensayos, esto puede ser por el tipo de sección que se ha seleccionado, en vez de seleccionar una sección maciza como unión, se va a seleccionar una sección cuadrada hueca.

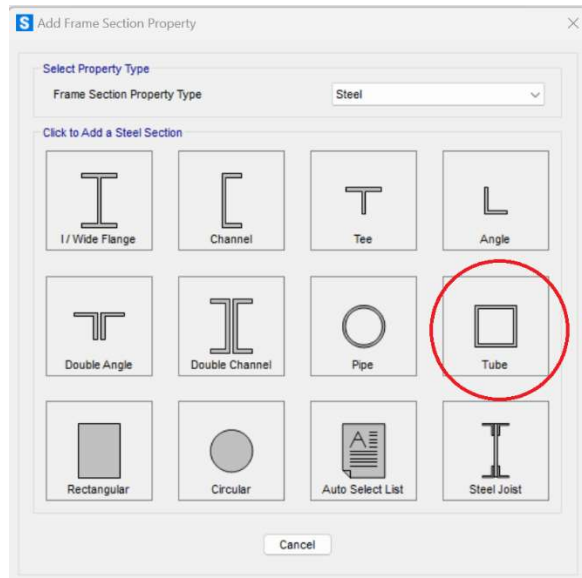


Figura 97, selección de una nueva sección para la unión

Estos van a ser los parámetros nuevos que se van a utilizar:

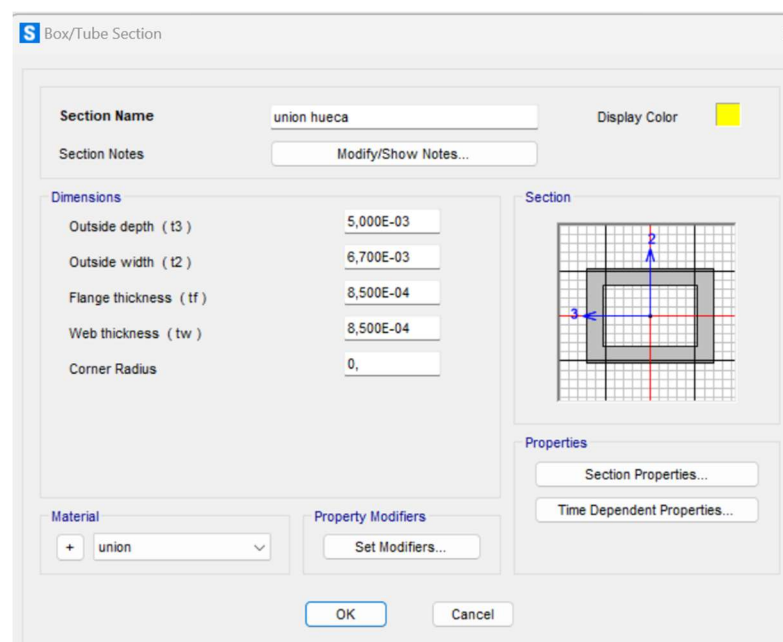


Figura 98, dimensiones de la nueva sección

Son los mismos parámetros que en maciza, pero va a haber un espesor de 0,00085 m, ya que será el que se asemeje a las paredes de la unión.

Una vez que se haya seleccionado el tipo de sección, el procedimiento será el mismo.

El desplazamiento obtenido:

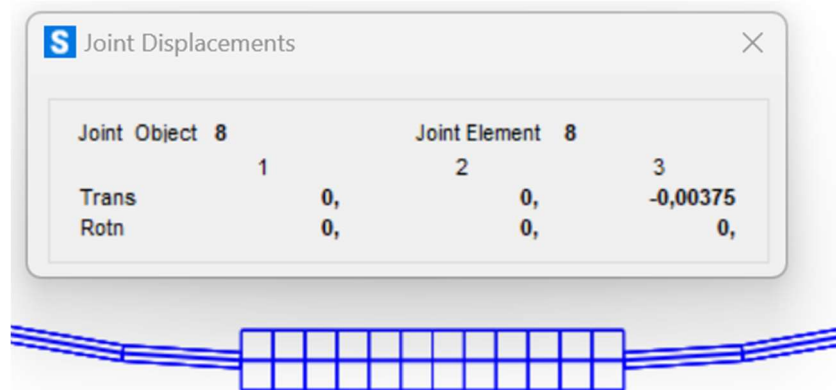


Figura 99, desplazamiento obtenido con la nueva sección

Se puede observar que el resultado es bastante parecido al resultado experimental, no es el mismo ya que la unión no es cuadrada rectangular, y que en la parte hueca de la unión está el palito de madera, por lo que no es entera de una sola sección, es una sección aproximada.

El resultado obtenido se aproxima al resultado experimental por lo que la sección que se ha aproximado es bastante precisa.

Capítulo 5: Estudio estructural del Pórtico

5.1 Introducción

En el presente apartado se estudia el comportamiento mecánico de un pórtico plano construido con materiales de bajo coste. La estructura ha sido fabricada utilizando palitos de madera como elementos resistentes y uniones diseñadas en CAD (CATIA) e impresas mediante tecnología de impresión 3D.

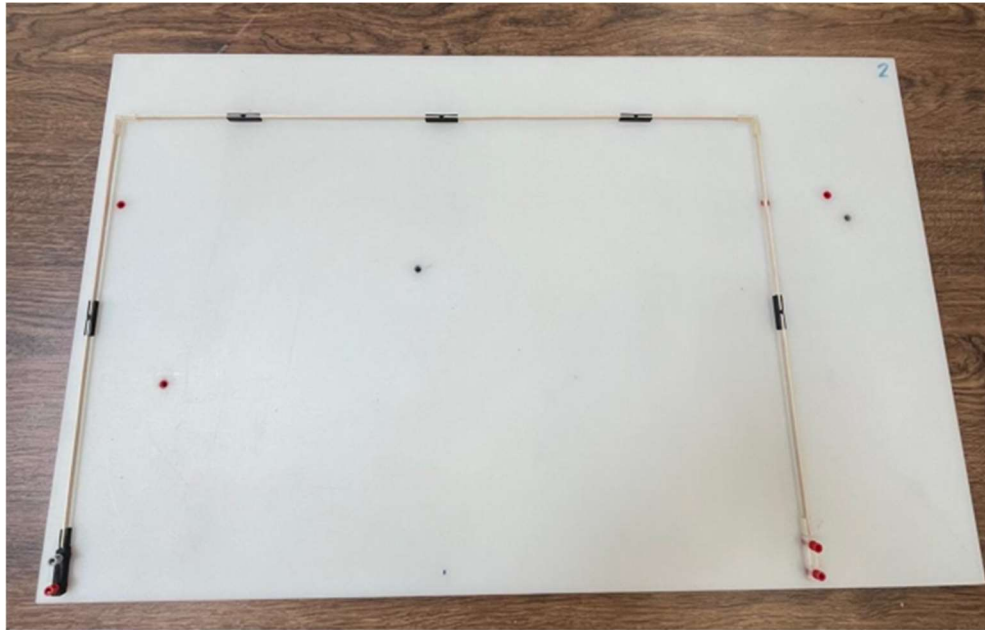


Figura 100, pórtico ensamblado en la placa base

Previamente, se llevó a cabo una caracterización mecánica del material (palito de madera) a través de ensayos de flexión en tres puntos, compresión y tracción, obteniendo parámetros elásticos relevantes como el módulo de elasticidad. Estos valores son fundamentales para la comparación entre los resultados experimentales y los modelos teóricos o numéricos.

5.2 Descripción del montaje experimental

5.2.1 Geometría y montaje

- El pórtico se ensambla en la placa base mediante tetones que impiden el giro, por tanto, se considera biempotrado.
- Se aplica una carga puntual vertical mediante célula de carga en el centro o en la esquina superior.
- El dispositivo láser registra desplazamientos.

5.3 Ensayo experimental: carga en el centro

5.3.1 Procedimiento

En este ensayo, el pórtico se someterá a una carga central justo en la unión, el procedimiento será el mismo que en el ensayo a flexión. Se realizarán varias muestras para estudiar su comportamiento.

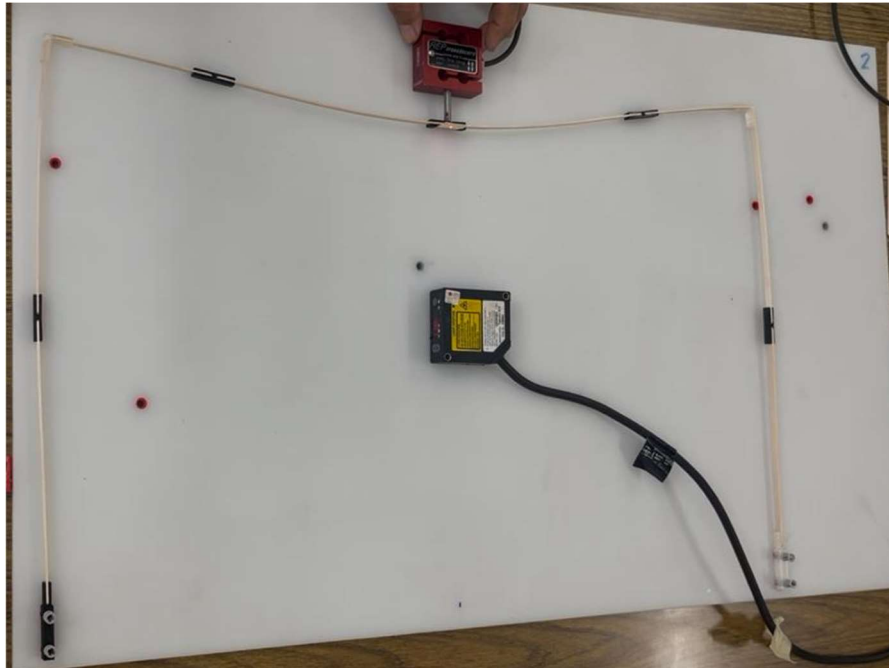


Figura 101, realización del ensayo de carga central en el pórtico

5.3.2 Resultados

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos por el programa dewesoft, sacados al momento de realizar el ensayo.

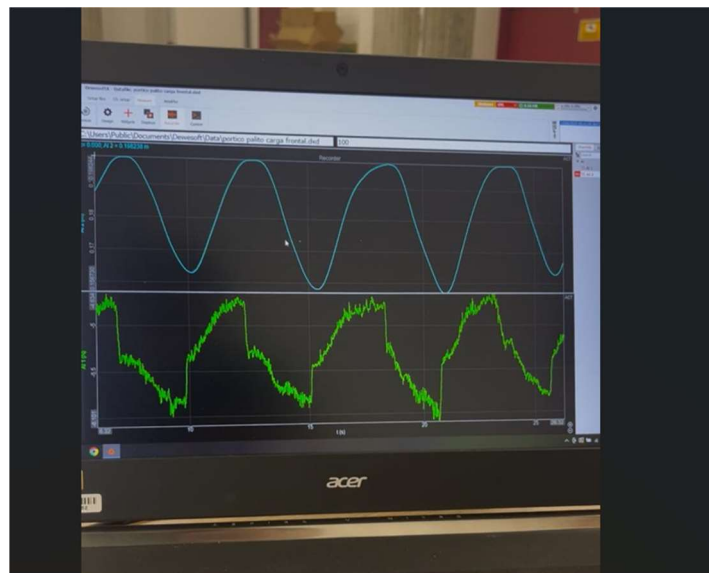
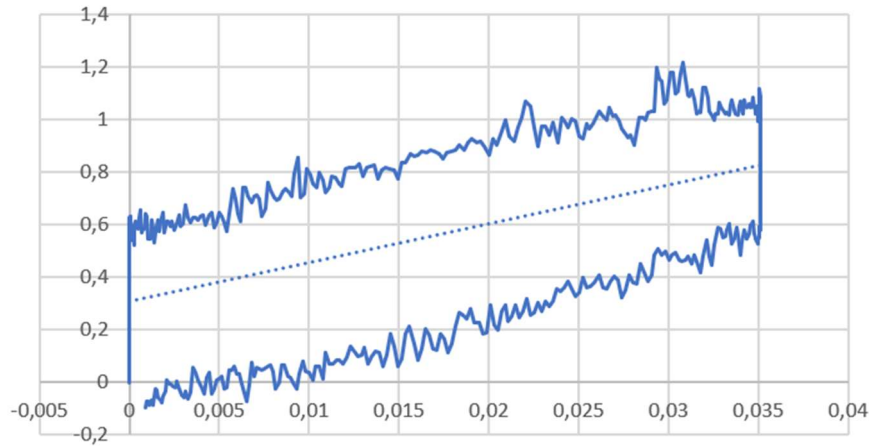


Figura 102, resultados en tiempo real del dispositivo láser y la célula de carga

En la gráfica de la **figura 110** de color azul se observa el desplazamiento obtenido por el punto central del pórtico, y en la gráfica inferior se observa la carga ejercida en el centro del pórtico para obtener el desplazamiento mostrado.

Se puede observar como en la gráfica de la célula de carga aparece ruido, esto es debido a que las uniones al estar en contacto con la placa base genera rozamiento, y eso se ve reflejado en el programa.

Si se aísla cada tramo como los ensayos a flexión y se obtienen sus gráficas correspondientes, se puede observar que tienen la misma forma, solo que la pendiente de carga y descarga cambiará debido a la rigidez global del pórtico.



Gráfica 4, gráfica de dispersión desplazamiento-carga del pórtico aplicando carga en el centro

Se muestra una gráfica de dispersión entre el desplazamiento y la carga aplicada, en ella se puede ver claramente el ruido debido al rozamiento de las uniones con la placa base.

A continuación, se muestra una tabla con los ensayos realizados ejerciendo una carga en el centro del pórtico.

Ensayo central	carga	pendiente media	desplazamiento a 1N (m)
1		31,79	0,0268
2		29,12	0,0325
3		33,47	0,0299
4		33,67	0,0323

Tabla 10, resultados obtenidos en el ensayo experimental, y estudiados a 1 N

El desplazamiento medio es de 0,0302 m.

Se puede observar en la **Tabla 10** que la pendiente es muy pequeña comparado con la tabla de flexión del palito de madera a flexión con y sin unión, debido a que el sistema completo (pórtico) presenta una menor rigidez global que sus elementos por separado.

Se ha realizado el estudio aplicando una carga de 1 N, ya que la fuerza que se aplica no es mucho mayor que 1 N, por lo que cuando se realice el pórtico en el SAP2000 se aplicará 1 N al pórtico.

Aplicando la ecuación (3), se obtiene la rigidez del sistema

$$F = K \cdot u$$

- $F = 1 \text{ N}$
- $U = 0,0302 \text{ m}$

La rigidez del sistema de forma experimental es $k = 33,12 \text{ N/m}$.

5.4 Ensayo experimental: carga en esquina

5.4.1 Procedimiento

En este ensayo la carga estará aplicada en la esquina del pórtico, se realizarán reiteradamente varias cargas y descargas, con el objetivo de ver su comportamiento, sin deformar el pórtico.

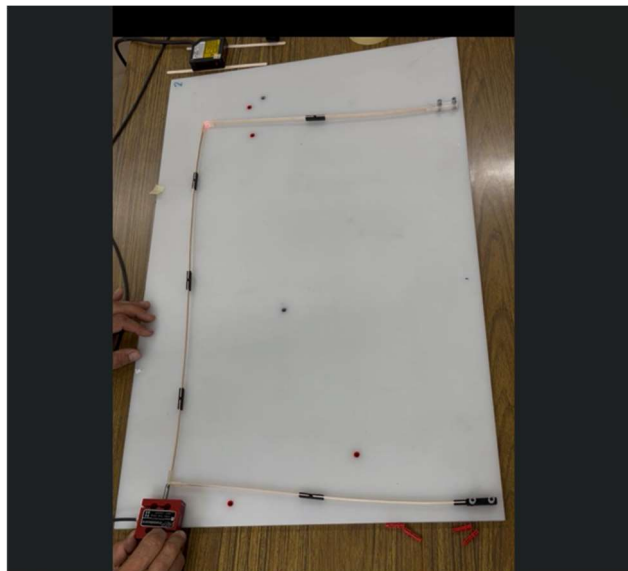


Figura 103, realización del ensayo de carga en la esquina del pórtico

La célula de carga aplicará la carga en un lado del pórtico, mientras que el dispositivo láser estará en el extremo opuesto midiendo el desplazamiento de este, no se puede suponer que son barras infinitamente rígidas, por lo que, lo que se desplace la esquina donde se está aplicando la carga no será igual que el desplazamiento de la esquina contraria, el error será mínimo.

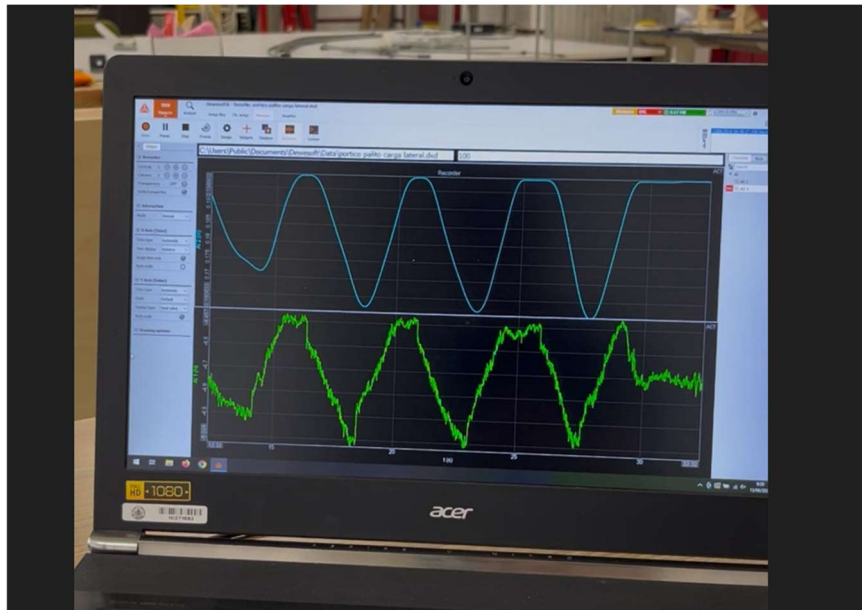
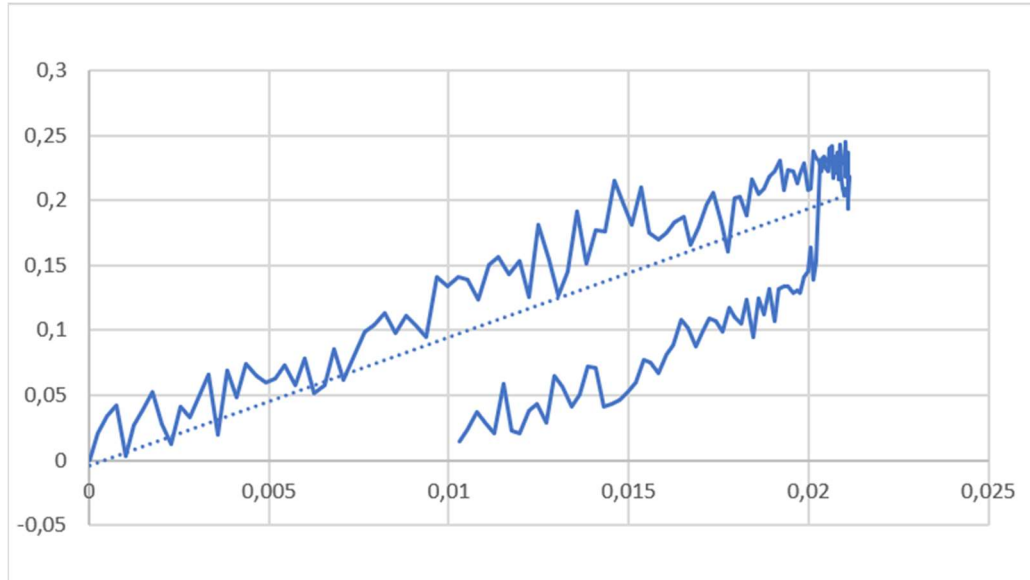


Figura 104, resultados en tiempo real del dispositivo láser y la célula de carga

Las gráficas de la **Figura 112** muestran el desplazamiento y la carga aplicada a lo largo del tiempo, sigue apareciendo ruido, debido al rozamiento de las uniones con la placa base.

El procedimiento será el mismo que el ensayo aplicando la carga en el centro del pórtico, se estudiará la pendiente media y la carga aplicada en las distintas muestras.

Se aísla cada tramo, y obtenemos la pendiente media de los tramos, junto con la carga aplicada, que será común a todas las muestras.



Gráfica 5, gráfica de dispersión desplazamiento-carga del pórtico aplicando carga en la esquina

Se muestra una gráfica de dispersión entre el desplazamiento y la carga ejercida, en ella se puede ver claramente el ruido debido al rozamiento de las uniones con la placa base, hay que tener en cuenta que la fuerza ejercida en este ensayo es mucho menor que la que se ejerció en la carga central, es por eso que el ruido se ve más disperso.

Se va a mostrar una tabla con los desplazamientos obtenidos cuando se ejerce una fuerza de 0,15 N, se ha escogido un valor que sea común en todas las muestras.

Ensayo carga lateral	pendiente carga media	desplazamiento a 0,15N (m)
1	25,73	0,0117
2	25,32	0,0127
3	24,89	0,0128
4	24,66	0,0123

Tabla 11, resultados obtenidos en el ensayo experimental, y estudiados a 0,15 N

El desplazamiento medio es de 0,0118 m.

A la hora de realizar el pórtico, se aplicará una carga de 0,15 N en el eje x, y se compararán resultados.

Aplicando la ecuación (3), se obtiene la rigidez del sistema

$$F = K \cdot u$$

- $F = 0,15 \text{ N}$
- $U = 0,0118 \text{ m}$

La rigidez del sistema de forma experimental es $k = 25,12 \text{ N/m}$.

5.5 Realización PORTICO SAP

Para la realización de los tramos del pórtico se seleccionará “Grid only”, en el eje “x” hay 10 tramos por lo que hay 11 líneas verticales de mallado, el espaciado se cambiará más adelante. En el eje z habrá 5 tramos por lo que se necesitarán 6 líneas.

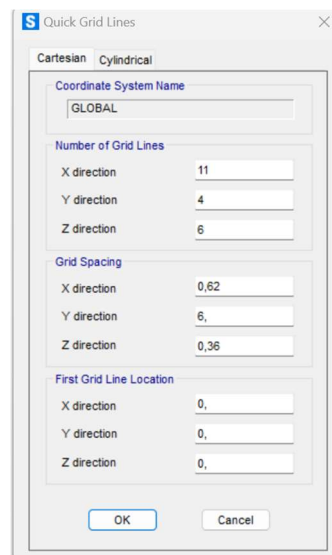


Figura 105, definición de las propiedades de la rejilla

Se modifica el mallado de la siguiente manera:

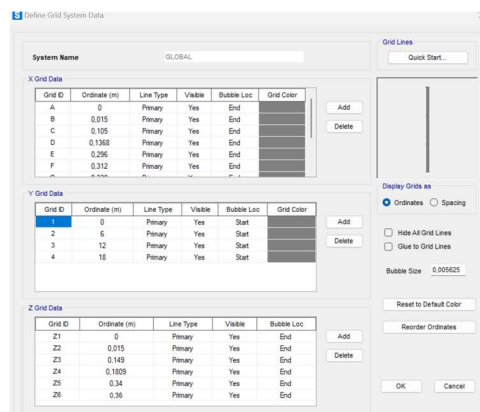


Figura 106, ajuste personalizado del mallado para la creación del pórtico con distinta sección

El mallado quedará de la siguiente manera:

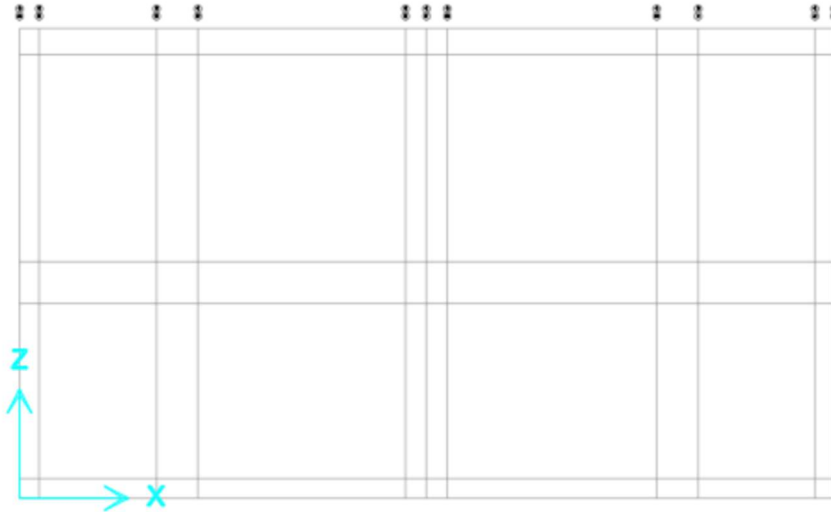


Figura 107, representación del mallado para la creación del pórtico

El siguiente paso será seleccionar el tramo con sección de unión hueca, y el tramo de sección de palito de madera, se puede observar que los tramos de color marrón serán tramos de palito de madera, y los tramos con distinta sección serán los de las uniones

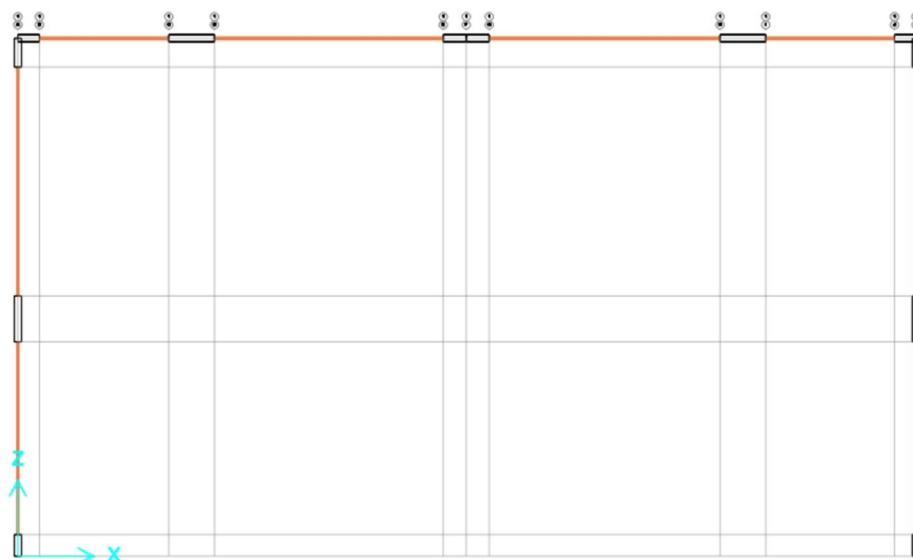


Figura 108, representación del pórtico en SAP

En cuanto a los apoyos, serán dos empotramientos en la base, ya que no permiten ni movimientos verticales, horizontales, ni giros, ya que los tetones restringen esos movimientos.

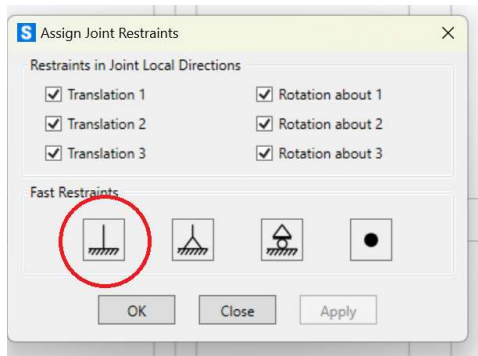


Figura 109, asignación de apoyos

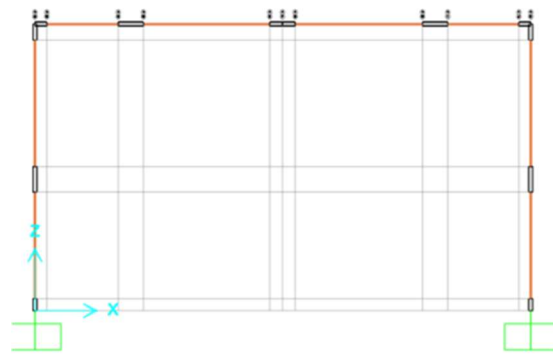


Figura 110, representación del pórtico con empotramientos

5.5.1 Aplicación de carga en el centro del pórtico

Se aplicará la carga de 1 N, ya que es la que se ha estudiado en el ensayo, y se aplicará en el punto medio de la unión central, que coincide con el eje de simetría, al ser simétrico el desplazamiento será vertical, esto no ocurre en este ensayo, debido a los decimales.

Cuando se aplica la carga se obtiene la deformada del pórtico.

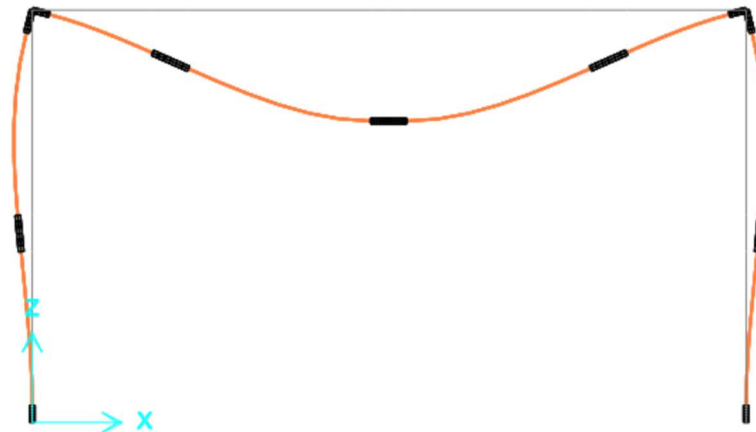


Figura 111, representación de la deformada obtenida por SAP

El desplazamiento obtenido al aplicar una carga de 1 N en el centro del pórtico es:

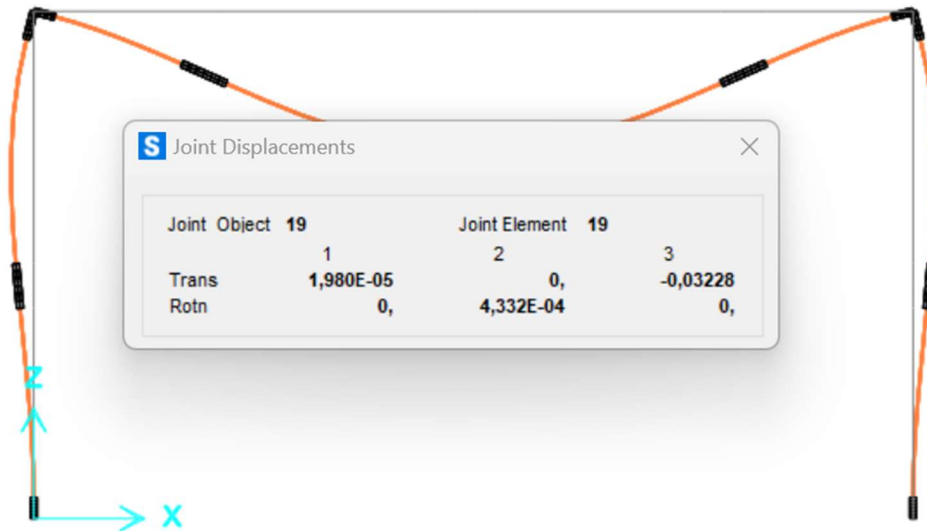


Figura 112, desplazamiento obtenido al aplicar una carga central al pórtico en SAP

El desplazamiento obtenido por el SAP2000 es 0,03228 m.

Ensayo	Desplazamiento (m)
REAL	0,0302
SAP	0,03228

Tabla 12, comparación de resultados

Se puede observar en la **Tabla 12**, que el resultado obtenido por el programa es muy similar al obtenido por los ensayos, esto significa que el modelo creado y sus parámetros configurados son muy precisos y correctos, sin tener en cuenta el rozamiento de las uniones con la placa base.

Para carga frontal, rigidez del pórtico en SAP2000: $k = \frac{1}{0,03228} = 30,97 \text{ N/m}$

El software SAP2000 da la opción de obtener los diagramas de axiles, cortantes, y momentos, esta herramienta es útil para estudiar la sección crítica de la estructura, para ello hay que fijarse en el diagrama de cortante.

Diagrama de cortante:

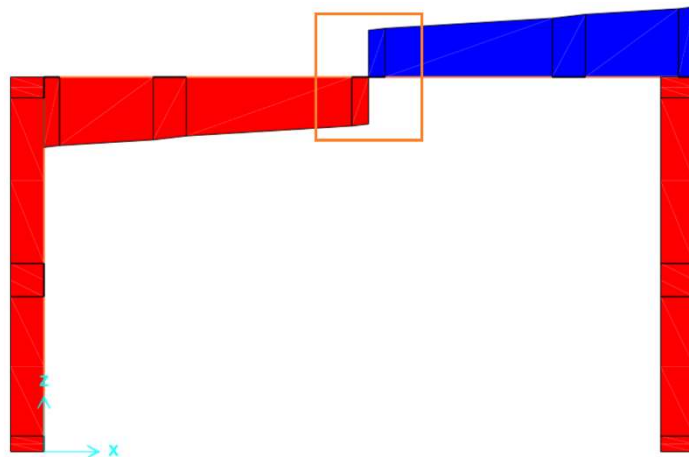


Figura 113, diagrama de esfuerzo cortante, carga aplicada en el centro

En diagrama de cortantes se puede observar que hay un punto de la estructura donde el cortante pasa por 0, y por lo tanto cambia de signo, esto significa que en ese punto va a haber un máximo en el diagrama de momentos, para comprobarlo se sacará el diagrama de momentos obtenido por SAP2000.

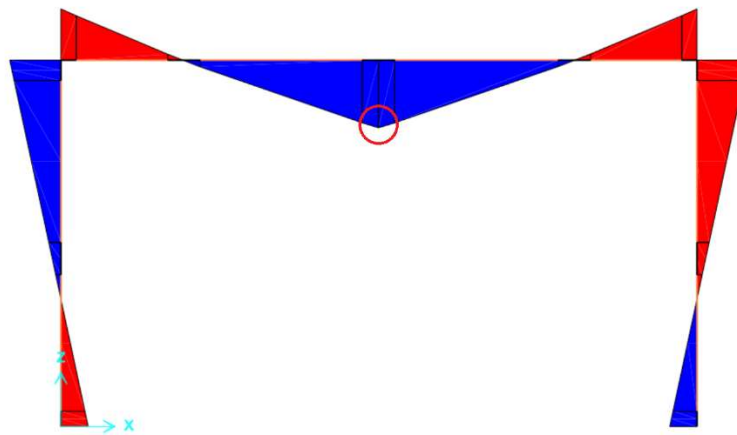


Figura 114, diagrama de flectores, carga aplicada en el centro

La sección crítica de la estructura está donde haya mayor flector, en este caso es en el punto donde se aplica la fuerza de 1 N, el momento obtenido es 0,1107 Nm

5.5.2 Carga lateral

Con el mismo pórtico que se ha utilizado para el ensayo de la carga central, se aplicará una carga de 0,15 N en la esquina del pórtico, en la dirección del eje “X”.

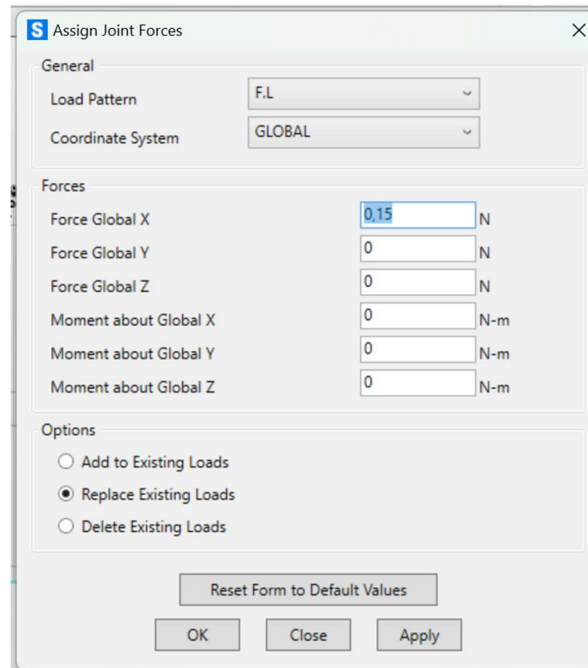


Figura 115, configuración de fuerza en eje “x”

La deformada queda de la siguiente manera:

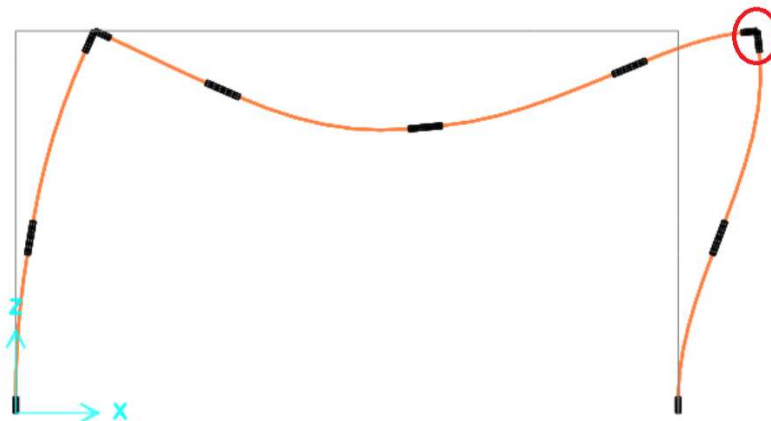


Figura 116, representación de deformada aplicando una carga en el lateral del pórtico en SAP

Se va a estudiar el desplazamiento de la esquina superior derecha, ya que es el que se ha medido en los ensayos con el dispositivo láser.

El desplazamiento obtenido es:

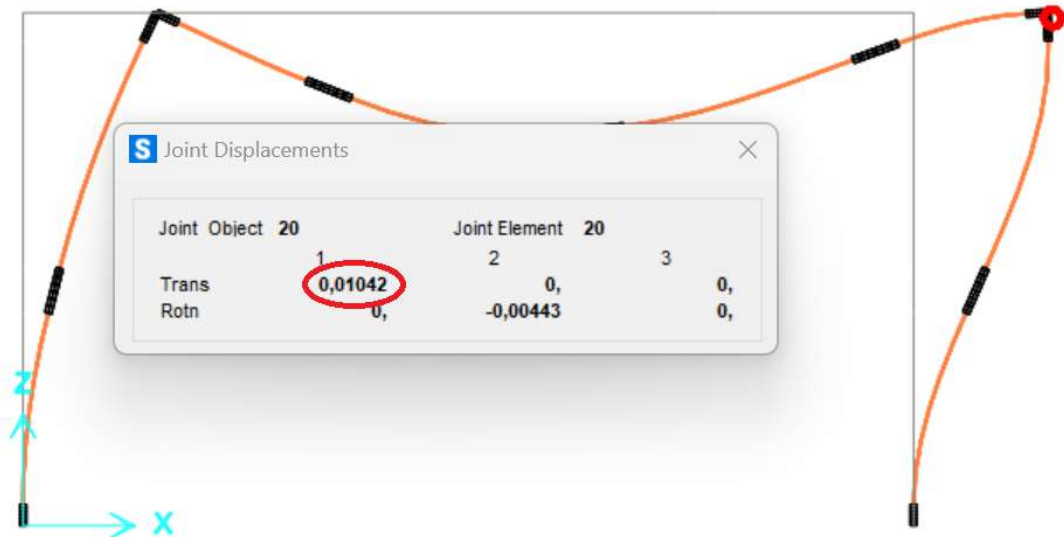


Figura 117, desplazamiento obtenido por SAP de la esquina derecha del pórtico

El desplazamiento obtenido mediante SAP2000 es 0,01042 m.

Ensayo	Desplazamiento (m)
REAL	0,01391
SAP	0,01042

Tabla 13, comparación de resultados

Se puede observar que hay una ligera diferencia de 0,003 m entre el resultado real y el resultado obtenido mediante el SAP2000.

Para carga lateral, rigidez del pórtico en SAP2000: $k = 24,33 \text{ N/m}$

Otra observación que se puede apreciar, es que el punto central del pórtico se ha desplazado verticalmente al aplicar una carga horizontalmente, se ha desplazado 0,0044 m.

Diagrama de cortante:

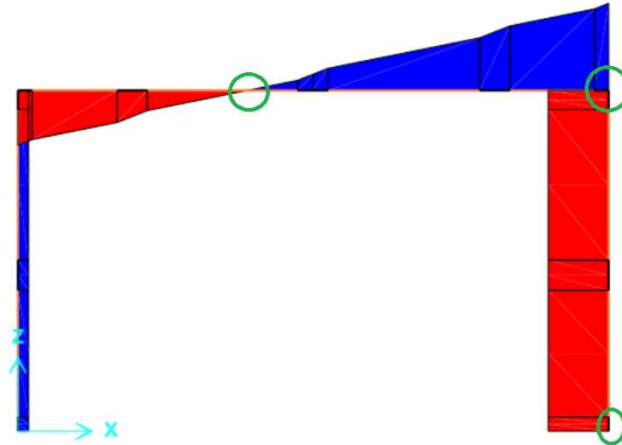


Figura 118, representación diagrama de cortantes para carga en la esquina

Se puede observar que la sección crítica no está tan clara como en el anterior caso, hay que fijarse donde el cortante sea 0, a simple vista la sección crítica son los puntos en verde donde puede estar la sección crítica.

A continuación, se sacará por pantalla el diagrama de flectores:

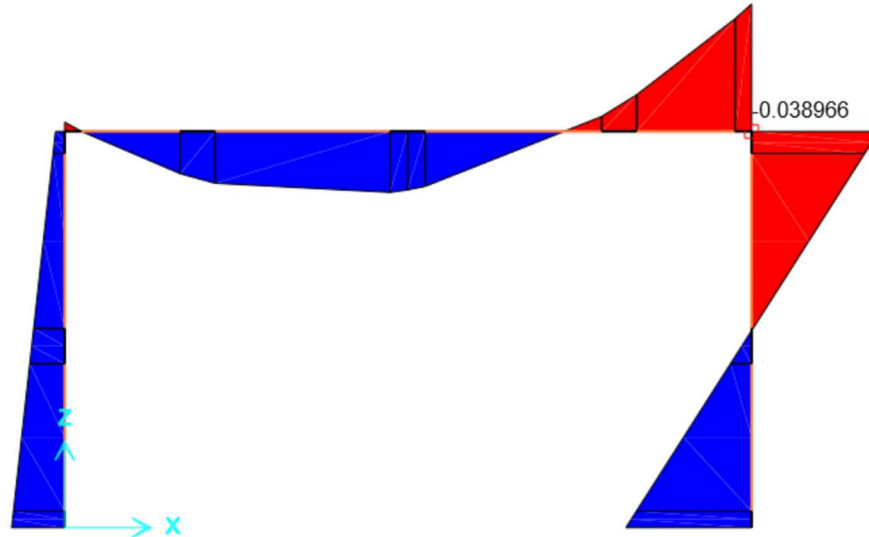


Figura 119, representación diagrama de flectores para carga en la esquina

El punto más crítico del pórtico al aplicarle una carga horizontal en la esquina superior izquierda es la esquina superior contraria, también hay que tener en cuenta el empotramiento derecho, ya que el momento es algo menor que el crítico, pero muy parecido.



Capítulo 6: Conclusiones del trabajo

6.1 Conclusiones finales

A lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se ha diseñado, construido y analizado una estructura a pequeña escala utilizando materiales de bajo coste, concretamente palitos de madera y uniones impresas en 3D en PLA. El objetivo principal ha sido evaluar el comportamiento estructural de este sistema mediante ensayos mecánicos y su validación a través de simulación numérica con el software SAP2000.

- Se ha llevado a cabo una caracterización experimental de los palitos de madera, mediante ensayos a flexión, tracción y compresión. Estos ensayos han permitido estimar el módulo de Young del material y analizar fenómenos como el pandeo o la pérdida de rigidez por uso repetido.
- Se ha evaluado el efecto de las uniones impresas en 3D sobre el comportamiento global de los elementos estructurales. Se ha comprobado que la presencia de estrías en las paredes interiores de las uniones mejora significativamente la capacidad de transmisión de esfuerzos y la rigidez global del sistema.
- Los resultados experimentales han sido comparados con modelos creados en SAP2000. En particular, al introducir los valores estimados del módulo de elasticidad en el modelo numérico, los desplazamientos obtenidos han coincidido con los valores experimentales con una diferencia inferior al 5 %, lo que valida tanto el enfoque experimental como el modelado numérico.

Este trabajo demuestra que es posible utilizar materiales no convencionales y accesibles para llevar a cabo un estudio estructural riguroso, aplicando conceptos de mecánica, elasticidad, pandeo y simulación por elementos finitos.

6.2 Líneas de mejora y trabajos futuros

- **Rediseño de las uniones impresas:** Aunque funcionales, las uniones podrían optimizarse incluyendo geometrías más complejas que distribuyan mejor los esfuerzos.
- **Caracterización más precisa del material:** Se podría realizar un análisis más completo del palito de madera incluyendo ensayos de dureza, humedad, densidad o propiedades anisotrópicas.
- **Análisis dinámico:** Una posible extensión del trabajo consistiría en estudiar la respuesta del pórtico frente a cargas dinámicas o vibraciones, ampliando el uso del software SAP2000.

- **Condiciones de estudio óptimas:** Realizar los ensayos en condiciones óptimas en ausencia de ruido lo que condiciona de manera significativa la toma de datos en los diferentes ensayos.

6.3 Factores a considerar

En este apartado, se pretende realizar una estimación del coste de trabajo en horas y el coste del trabajo en términos económicos.

Coste de trabajo en horas.

Se ha realizado una estimación del coste en horas para todas las fases del Trabajo de Fin de Grado (TFG), abarcando desde la investigación inicial hasta la redacción final. Esta evaluación proporciona una visión clara del esfuerzo requerido. Para ello, se ha estimado un tiempo de realización de cada tarea que lleva asociado un valor monetario en euros.

Tarea	Tiempo estimado (horas)
Revisión bibliográfica e investigación previa	15
Diseño de los bancos de ensayo	5
Realización de ensayos experimentales	45
Procesado y análisis de datos	40
Modelado en software (SAP2000, CAD, etc.)	35
Redacción del documento	155
Total	295

Tabla 14, tabla resumen con las tareas realizadas y las horas asociadas a la realización de cada tarea

Coste de trabajo económicamente

Tras haber estimado las horas totales que ha llevado a cabo la realización del presente trabajo, se procede a calcular el coste monetario asociado a dicho trabajo.



Las horas totales para la realización del TFG han sido 295 horas, cumpliendo con las horas estimadas según la guía docente. El sueldo de un técnico industrial en España ronda los 13,04 €.

Se realiza la multiplicación de las horas totales obtenidas mediante la **Tabla 14** por el precio de una hora de trabajo efectivo obteniendo un resultado de 3846,8 €.

Bibliografía

- [1] J. M. Gere, «Resistencia de materiales,» de de *Timoshenko Resistencia de Materiales*, 2018
- [2] L. O. Berrocal, *Elasticidad*, McGraw-Hill/Interamericana de España.
- [3] «Prontuario básico de estructuras simples».
- [4] Esfuerzos [En línea]. Available: Esfuerzos de tracción y compresión
- [5] [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Definicion-grafica-del-concepto-de-modulo-de-elasticidad-Curva-Tension-s_fig2_311988131.
- [6] SAP2000. Available: CSI Spain | IGENMAI
- [7] ElectricBricks - LEGO, Playmobil y robótica educativa, «electricBricks: LEGO shop guide and database,» [En línea]. Available: <https://www.electricbricks.com/index.php>. [Último acceso: 24 junio 2023].
- [8] BOE, «Capítulo II, Régimen de Trabajo,» de *BOE, Otras Disposiciones*, 2024, p. 27.



ANEXOS

Anexo: Diseño y fabricación de uniones

Diseño en CAD

Los palitos de madera de café serán ensamblados mediante uniones diseñadas en Catia V5 y fabricadas con impresora 3D.

Se crearon tres tipos de piezas: la unión inicial, la unión longitudinal y la unión en esquina. Cada una fue modelada para asegurar una correcta fijación del palito de madera.

Preparación para impresión 3D

Para poder imprimir las uniones se utilizará un programa llamado “Ultimaker Cura” el cual se mandará la pieza de Catia en un formato stl.



Figura 120, programa Ultimaker Cura

Ultimaker Cura traduce la geometría digital del modelo en una serie de capas horizontales configurando una trayectoria de extrusión capa por capa. Este proceso incluye una gran variedad de parámetros ajustables, que permiten un control del proceso de impresión.

Cuando se abre la aplicación, lo primero que se tiene que hacer es elegir el extrusor con el que se quiere imprimir la pieza, se ha optado por el extrusor 2 debido a un mal funcionamiento del extrusor 1. Por defecto el material que se va a utilizar va a ser PLA, ácido poliláctico, es el material más común para imprimir en 3D ya que ofrece buenas prestaciones al combinar una alta velocidad de impresión con unos bordes muy definidos.

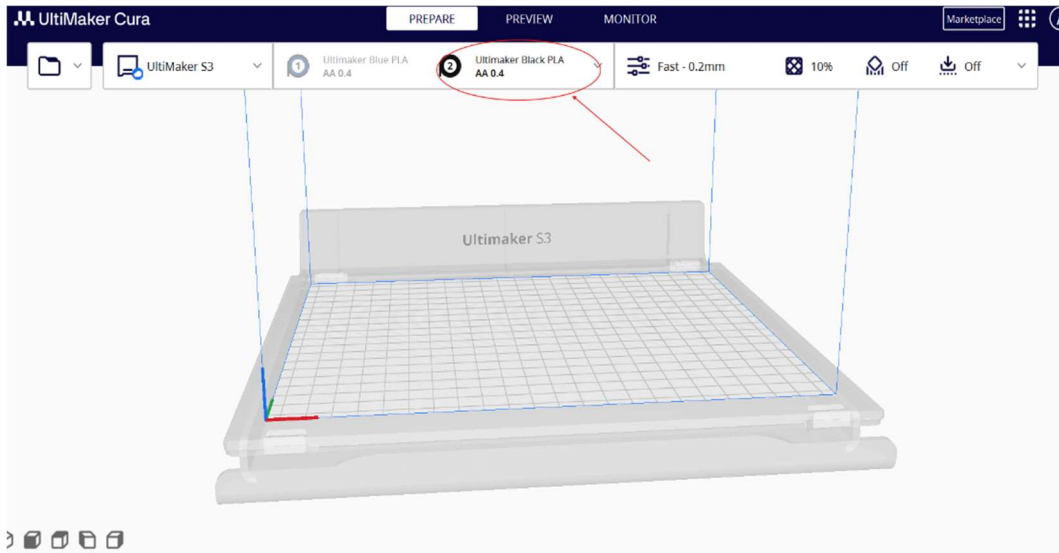


Figura 121, elección del extrusor 2

Una vez se tiene el extrusor marcado, se va a configurar los parámetros de impresión como:

- **Altura de capa:** define la resolución vertical del objeto.
- **Velocidad de impresión:** afecta al tiempo total y a la calidad superficial.
- **Temperaturas del extrusor y de la cama:** determinantes en la adherencia y en las propiedades del material.
- **Tipo de relleno y densidad:** controlan la resistencia estructural y el consumo de material.
- **Grosor de las paredes**

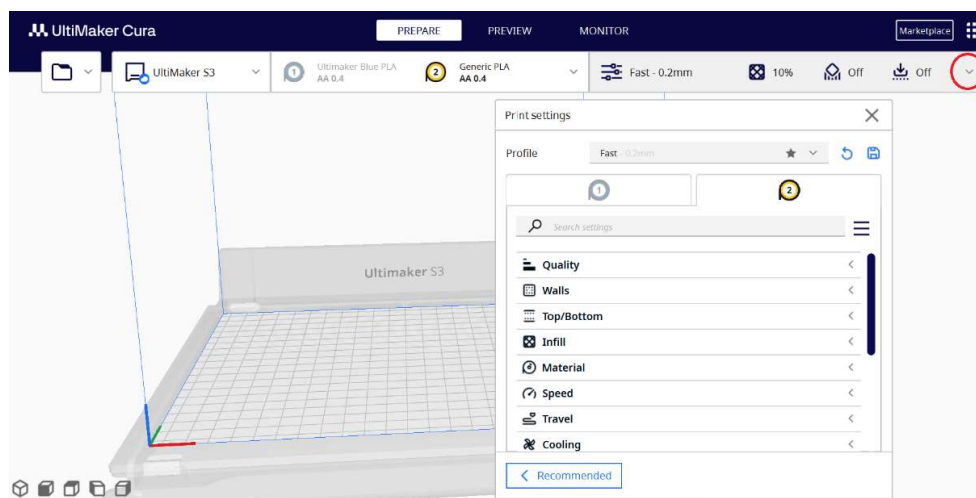


Figura 122, configuración de parámetros de impresión.

Una vez configurado los parámetros, se va a insertar la pieza en el cura desde nuestro equipo.

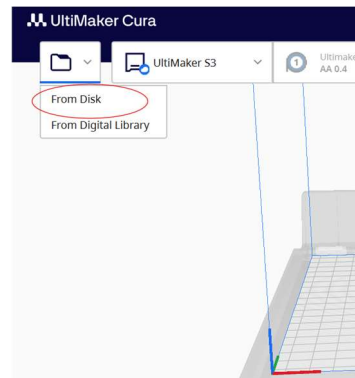


Figura 123, importación de la pieza

Una vez insertada la pieza al Cura, se tiene que elegir la cara sobre la que empieza a imprimirse, esto es muy importante a la hora de que la impresión se complete sin fallos.

Tiene un sistema ejes los cuales se puede girar la pieza de cualquier forma.

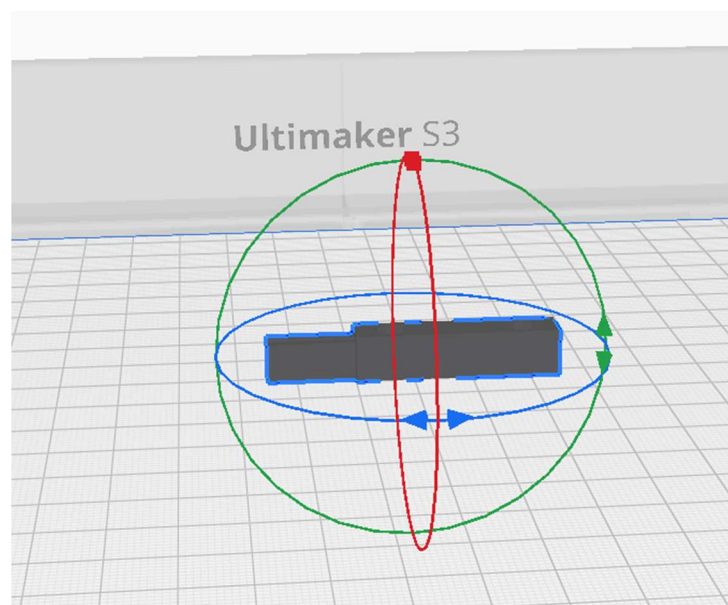


Figura 16, sistema de ejes del Cura

Está la opción de ver el desarrollo de la impresión con el modo Preview, esto es bastante útil a modo de asegurarse de que hemos configurado bien los parámetros.

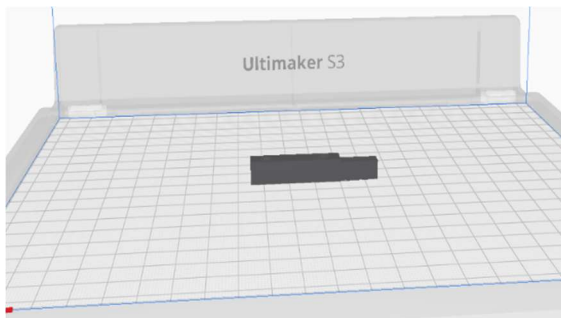


Figura 124, pieza determinada

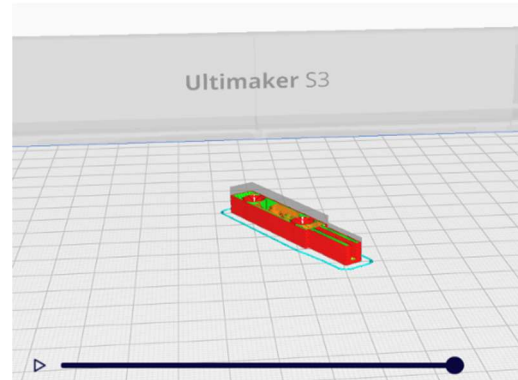


Figura 125, pieza vista preview

Impresora 3D utilizada

La impresora 3D que se va a utilizar es la Ultimaker, y el material que se utilizará es PLA, el cual estará enrollado, y con ayuda de un pequeño motor cargará o descargará el material.

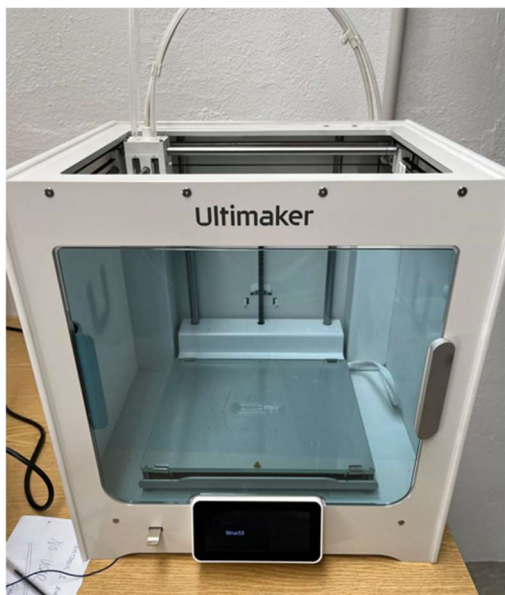


Figura 126, Impresora Ultimaker vista frontal

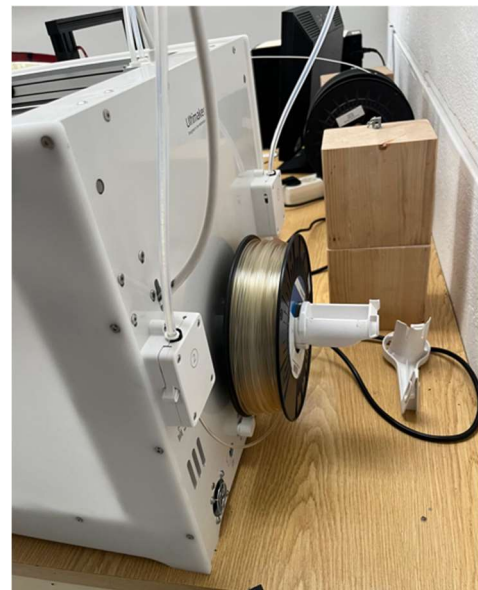


Figura 127, rodillo de PLA



Planos:

D

C

B

A

4

3

2

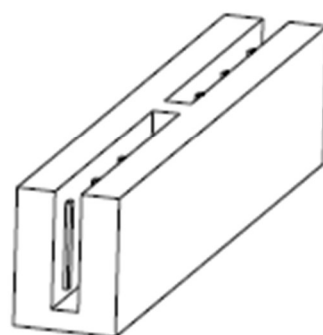
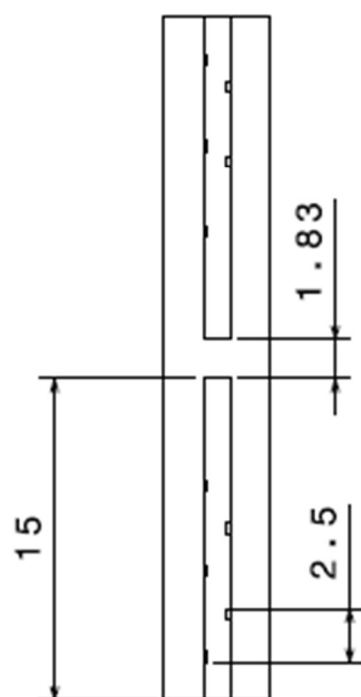
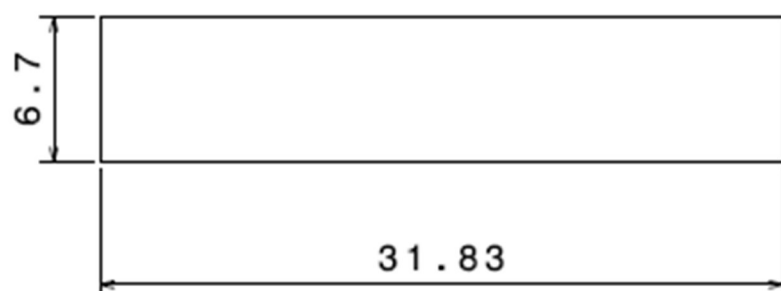
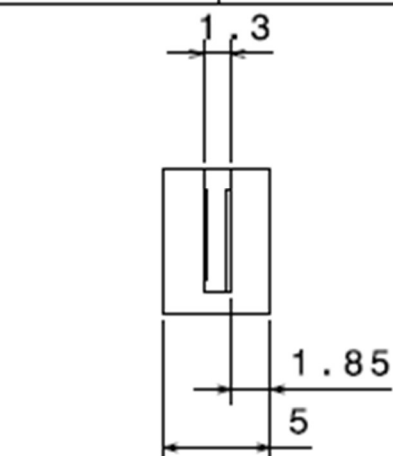
1

4

3

2

1



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

DRAWING TITLE

UNIÓN LONGITUDINAL

DRAWN BY

Alberto

DATE

27/06/2025

CHECKED BY

Alberto

DATE

27/06/2025

SIZE

A4

DRAWING NUMBER

1

DESIGNED BY

Alberto

DATE

27/05/2025

SCALE

3:1

Titulación: Tecnologías Industriales

D

A

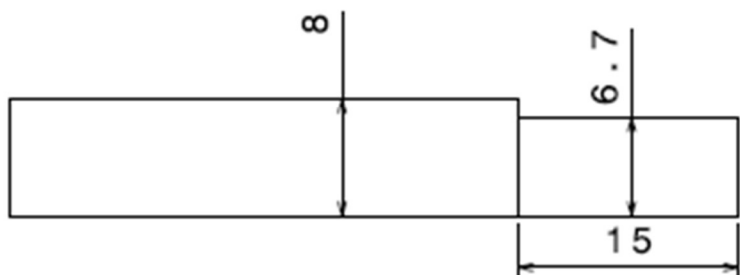
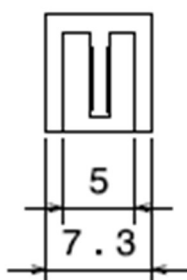
D

C

B

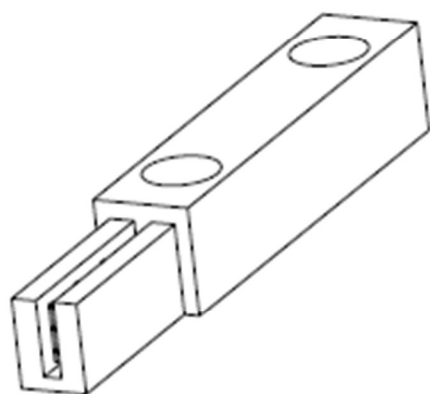
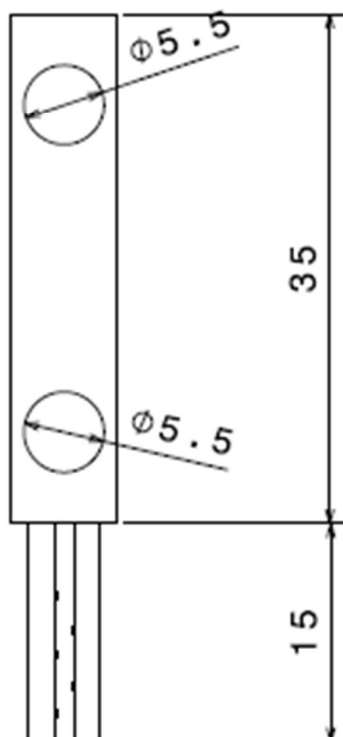
A

4



4

3



3

2

2

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

DRAWING TITLE

UNIÓN INICIAL

DRAWN BY
AlbertoDATE
27/06/2025CHECKED BY
AlbertoDATE
27/06/2025DESIGNED BY
AlbertoDATE
27/05/2025SIZE
A4

DRAWING NUMBER

2

SCALE

2:1

Titulación: Tecnologías industriales

D

A

1

1

D

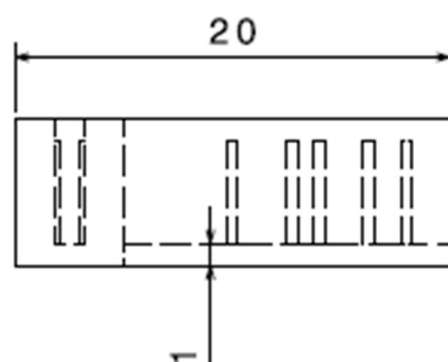
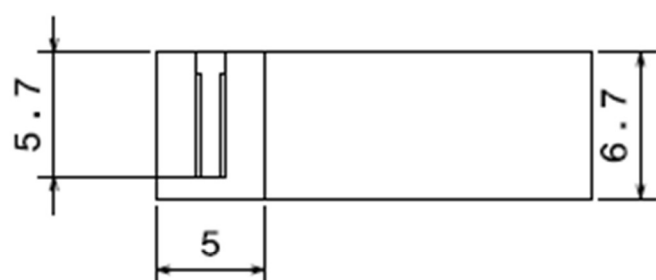
C

B

A

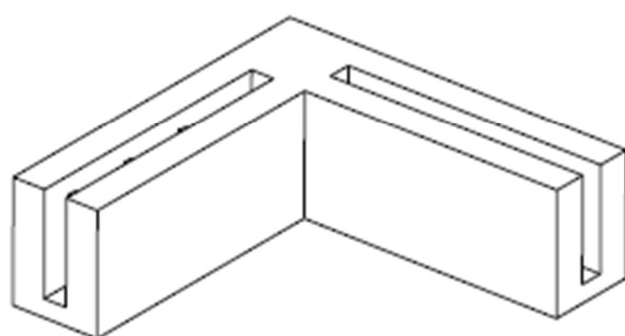
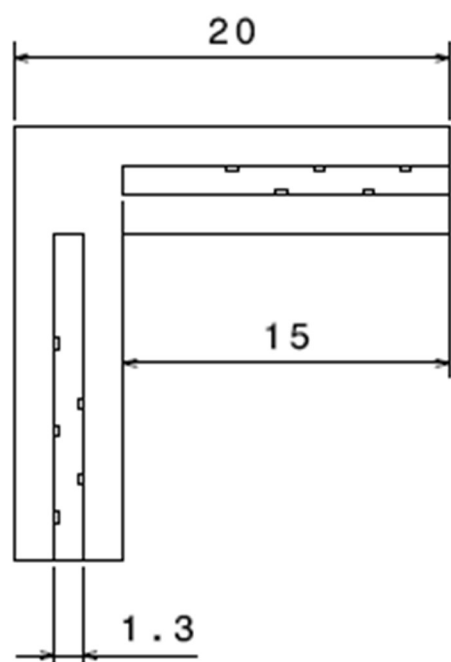
4

4



3

3



2

2

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

DRAWING TITLE

UNIÓN EN ESQUINA

DRAWN BY
AlbertoDATE
27/06/2025CHECKED BY
AlbertoDATE
27/06/2025DESIGNED BY
AlbertoDATE
27/05/2025SIZE
A4

DRAWING NUMBER

3

SCALE

3:1

Titulación: Tecnologías Industriales

D

A

1

1