Universidad Zaragoza
1542

Trabajo Fin de Grado

Procedimiento para el cálculo mecánico por elementos finitos en mobiliario del sector retail, frente a carga puntual y distribuida.

Procedure for mechanical calculations in retail sector furniture, considering point and distributed load, using finite element.

Autor

Pablo Corrochano Albareda

Director

David Valladares Hernando
Carlos Paúl Nadal

Titulación del autor

Ingeniería de diseño industrial y desarrollo del producto

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2024

1. RESUMEN

1.1. Objetivos del TFG

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) persigue los siguientes objetivos:

- Desarrollar un procedimiento para el cálculo de estabilidad y esfuerzos en el departamento de ingeniería de producto de HMY Yudigar.
- Evaluar la resistencia del mobiliario mediante análisis detallados de los cálculos realizados.
- Optimizar el diseño y los costes del mobiliario a través de la optimización de materiales y estructuras.
- Garantizar la seguridad y estabilidad del mobiliario fabricado por HMY Yudigar.

Estos objetivos se alcanzarán mediante una investigación exhaustiva, un estudio de caso práctico y la aplicación de técnicas de análisis por elementos finitos en SolidEdge. El resultado final será un procedimiento sistemático y optimizado para el cálculo de estabilidad y esfuerzos en mobiliario retail, aplicable a los productos de HMY Yudigar.

1.2. Alcance

El proyecto se centra en el análisis de cargas puntuales y distribuidas para la optimización de costes en el diseño de mobiliario de HMY Yudigar. A lo largo del proyecto se analizará:

- El comportamiento del mobiliario frente a diferentes tipos de cargas puntuales y distribuidas.
- El potencial de reducción de costes mediante la optimización del diseño del mobiliario.
- La metodología utilizada para llevar a cabo los análisis y optimizaciones, empleando el software SolidEdge.
- Estudios específicos de casos, incluyendo un análisis detallado de estructuras como estanterías, mesas y burros, con comparaciones de los diseños antes y después de la optimización de costes.
- Resultados obtenidos de los análisis, destacando la reducción de tensiones y desplazamientos, y su impacto en la seguridad y estabilidad del mobiliario.

Se considerarán las limitaciones del software y los recursos disponibles para la realización del proyecto.

ÍNDICE

1. RESUMEN 3
1.1. Objetivos del TFG 3
1.2. Alcance 3
ÍNDICE 4
TABLA DE ILUSTRACIONES 5
2. INTRODUCCIÓN 8
2.1. HMY Yudigar 8
2.2. Motivación y relevancia del tema 9
2.3. Metodología/Estructura del TFG 9
2.4. Software Utilizado 10
3. INVESTIGACIÓN Y APRENDIZAJE DE HERRAMIENTAS 11
3.1. Introducción 11
3.2. Objetivos de aprendizaje 11
3.3. Conceptos clave en FEA 11
3.4. Interfaz de usuario y herramientas básicas 14
4. DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO 30
4.1. Estudio 1: Simulación inicial 30
4.2. Estudio 2: Análisis de Barra de Carga 39
4.3. Estudio 3: Análisis Monorail ajustable 44
4.4. Estudio 4: Mesa de apoyo 50
5. OPTIMIZACIÓN DE COSTES 56
5.1. RdC Monorail 56
5.2. RdC Mesa 61
6. Conclusiones 66
6.1. Principales Hallazgos 66
7. BIBLIOGRAFÍA 67

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 → Factor de seguridad 13
Ilustración 2 → Panel superior - Simulación 14
Ilustración 3 → Estudio 14
Ilustración 4 → Nuevo estudio 15
Ilustración 5 → Tipo de estudio 15
Ilustración 6 → Tipo de malla 16
Ilustración 7 → Opciones avanzadas 16
Ilustración 8 → Tabla de materiales - 1 17
Ilustración 9 → Tabla de materiales - 2 17
Ilustración 10 → Definición de geometría 17
Ilustración 11 → Cargas estructurales 17
Ilustración 12 → Cargas de fuerza 18
Ilustración 13 → Creación de punto 18
Ilustración 14 → Restricciones 19
Ilustración 15 → Restricción fija 19
Ilustración 16 → Conectores 19
Ilustración 17 → Conectores paso 2 20
Ilustración 18 → Conectores paso 3 20
Ilustración 19 → Mallado 20
Ilustración 20 → Opciones mallado 20
Ilustración 21 → Panel simulación 21
Ilustración 22 → Verificador malla 21
Ilustración 23 → Opciones verificador 21
Ilustración 24 → Visor error malla 22
Ilustración 25 → Visor error malla - 2 22
Ilustración 26 → Malla fina 22
Ilustración 27 → Malla corregida 22
Ilustración 28 → Resolver 23
Ilustración 29 → Resolver - Selección de datos 23
Ilustración 30 → Tensión 23
Ilustración 31 → Tensión Von Mises 24
Ilustración 32 → Marcador máx. 24
Ilustración 33 → Máx. tensión 24
Ilustración 34 → Panel visualización 24
Ilustración 35 → Borde sin malla 24
Ilustración 36 → Desplazamiento 25
Ilustración 37 → Porcentaje deformación 25
Ilustración 38 → Tabla desplazamiento 25
Ilustración 39 → Factor de seguridad 26
Ilustración 40 → 3D Factor de seguridad 26
Ilustración 41 → Barra de colores 26
Ilustración 42 → Escala definida por el usuario 26
Ilustración 43 → 3D factor de seguridad acotado 26
Ilustración 44 → Error Nastran 27
Ilustración 45 → Registro Nastran 28
Ilustración 46 → Resultados Nastran 28
Ilustración 47 → Resultados 29
Ilustración 48 → Tabla resultados 29
Ilustración 49 → Tabla resultados - 2 29

Ilustración 50 → 3D Estudio 1 30
Ilustración 51 → Nuevo estudio 1 31
Ilustración 52 → Carga distribuida. Estudio 1 31
Ilustración 53 → Restricción. Estudio 1 32
Ilustración 54 → Malla - 7. Estudio 1 32
Ilustración 55 → Visualización Malla - 7. Estudio 1 32
Ilustración 56 → Tensión malla7. Estudio 1 33
Ilustración 57 → Máx. tensión malla7. Estudio 1 33
Ilustración 58 → Desplazamiento malla7. Estudio 1 33
Ilustración 59 → Malla - 10. Estudio 1 34
Ilustración 60 → Visualización Malla - 10. Estudio 1 34
Ilustración 61 → Tensión malla10. Estudio 1 34
Ilustración 62 → Desplazamiento malla10. Estudio 1 35
Ilustración 63 → Puntos. Estudio 1 36
Ilustración 64 → Carga puntual. Estudio 1 36
Ilustración 65 → Supresión Carga distribuida 36
Ilustración 66 → Tensión. Carga puntual 37
Ilustración 67 → Desplazamiento. Carga puntual 37
Ilustración 68 → 3D Estudio 2 39
Ilustración 69 → Carga distribuida. Estudio 2 39
Ilustración 70 → Conectores. Estudio 2 40
Ilustración 71 → Opciones mallado. Estudio 2 40
Ilustración 72 → Mallado. Estudio 2 40
Ilustración 73 → Tensión. Estudio 2 41
Ilustración 74 → Máx. Tensión. Estudio 2 41
Ilustración 75 → Desplazamiento. Estudio 2 42
Ilustración 76 → 3D Estudio 3 44
Ilustración 77 → Carga distribuida. Estudio 3 45
Ilustración 78 → Fijaciones. Estudio 3 45
Ilustración 79 → Opciones mallado. Estudio 3 46
Ilustración 80 → Mallado. Estudio 3 46
Ilustración 81 → Tensión. Estudio 3 47
Ilustración 82 → Máx. Tensión. Estudio 3 47
Ilustración 83 → Desplazamiento. Estudio 3 48
Ilustración 84 → 3D Estudio 4 50
Ilustración 85 → 3D - 2. Estudio 4 50
Ilustración 86 → Carga distribuida. Estudio 4 51
Ilustración 87 → Fijaciones. Estudio 4 51
Ilustración 88 → Opciones mallado. Estudio 4 52
Ilustración 89 → Mallado. Estudio 4 52
Ilustración 90 → Tensión. Estudio 4 53
Ilustración 91 → Máx. tensión. Estudio 4 53
Ilustración 92 → Desplazamiento. Estudio 4 53
Ilustración 93 → Carga puntual. Estudio 4 54
Ilustración 94 → Tensión carga puntual. Estudio 4 54
Ilustración 95 → Desplazamiento carga puntual. Estudio 4 55
Ilustración 96 → 3D RdC monorail 56
Ilustración 97 → Carga distribuida. RdC monorail 57
Ilustración 98 → Borde. RdC monorail 57
Ilustración 99 → Conector de borde. RdC monorail 57
Ilustración 100 → Tensión. RdC monorail 58
Ilustración 101 → Desplazamiento. RdC monorail 58

Ilustración 102 → Tensión monorail V1 59
Ilustración 103 → Tensión monorail V2 59
Ilustración 104 → Desplazamiento monorail V1 60
Ilustración 105 → Desplazamiento monorail V2 60
Ilustración 106 → 3D RdC mesa 61
Ilustración 107 → Cambio en patas 61
Ilustración 108 → Carga distribuida. RdC mesa 62
Ilustración 109 → Tensión. RdC mesa 62
Ilustración 110 → Desplazamiento. RdC mesa 63
Ilustración 111 → Tensión, carga puntual. RdC mesa 64
Ilustración 112 → Desplazamiento, carga puntual. RdC mesa 64

2. INTRODUCCIÓN

2.1. HMY Yudigar

HMY Yudigar es una empresa reconocida por su capacidad para diseñar y fabricar una amplia variedad de estructuras para el sector retail, enfocándose en optimizar la exposición y accesibilidad de productos en tiendas. Dentro del marco de este Trabajo Fin de Grado (TFG), nos centraremos en aquellas estructuras que están diseñadas para soportar cargas de peso significativas, como estanterías, mesas y burros. Estas estructuras son fundamentales en el entorno comercial, ya que deben combinar resistencia, durabilidad y estética para garantizar una exhibición efectiva y segura de productos.

2.1.1. Barras de carga

Las barras de carga son uno de los productos más comunes y versátiles fabricados por HMY Yudigar. Estas estructuras están diseñadas para maximizar el espacio de almacenamiento vertical y permitir una fácil organización y acceso a los productos. Deben soportar cargas distribuidas y, en algunos casos, cargas puntuales significativas, por lo que su diseño y fabricación requieren un análisis cuidadoso de los materiales y las técnicas de ensamblaje. Las barras de carga pueden ser modulares, permitiendo una fácil adaptación y reconfiguración según las necesidades específicas de cada tienda.

2.1.2. Mesas

Las mesas utilizadas en tiendas y espacios comerciales son otra categoría importante de estructuras que fabricamos. Estas mesas no solo deben ser estéticamente atractivas, sino también robustas y capaces de soportar el peso de los productos que se exhiben. Las mesas pueden variar en tamaño y diseño, desde mesas pequeñas para accesorios hasta grandes mesas de exposición para artículos voluminosos. El análisis de cargas en estas estructuras es esencial para asegurar que puedan manejar tanto el peso estático de los productos como el estrés adicional de la interacción del cliente.

2.1.3. Burros

Los burros, o percheros móviles, son estructuras diseñadas para colgar y transportar ropa y otros artículos colgantes. Estas estructuras deben ser ligeras y móviles, pero al mismo tiempo suficientemente fuertes para soportar cargas pesadas sin deformarse o colapsar. Los burros son fundamentales en tiendas de ropa y almacenes, donde la movilidad y la capacidad de carga son cruciales. Al igual que con las estanterías y mesas, es vital realizar un análisis detallado de cargas para asegurar que estas estructuras cumplan con los estándares de seguridad y funcionalidad.

2.1.4. Importancia del Análisis de Cargas

El análisis de cargas puntuales y distribuidas en estas estructuras es fundamental para garantizar su rendimiento y seguridad. Al evaluar cómo se comportan las estructuras bajo diferentes condiciones de carga, podemos optimizar el uso de materiales y mejorar los diseños, reduciendo costos sin comprometer la calidad o la seguridad. Este enfoque nos permite innovar continuamente y ofrecer soluciones que satisfagan las necesidades del mercado retail moderno.

En el contexto de este TFG, nos centraremos en el análisis de estas estructuras específicas, aplicando herramientas avanzadas de simulación y técnicas de optimización para desarrollar soluciones más eficientes y sostenibles.

2.2. Motivación y relevancia del tema

En el sector retail, la optimización de costes y la seguridad del mobiliario son aspectos de vital importancia. Los muebles deben ser resistentes, duraderos y capaces de soportar las cargas previstas sin comprometer la seguridad de los usuarios. Al mismo tiempo, la reducción de costes de producción es esencial para mantener la competitividad y mejorar los márgenes de beneficio.

El cálculo mecánico por elementos finitos (MEF) ofrece una herramienta poderosa para abordar estos desafíos en el diseño de mobiliario retail. A través de simulaciones computacionales, el MEF permite evaluar el comportamiento del mobiliario bajo diferentes condiciones de carga, identificando puntos débiles y zonas críticas de tensión. Esta información es fundamental para optimizar el diseño, utilizando materiales y estructuras más eficientes sin comprometer la seguridad.

En el contexto de HMY Yudigar, la aplicación del MEF en el diseño de mobiliario retail presenta un gran potencial. Al reducir costes de producción mediante un diseño más eficiente, la empresa puede mejorar su competitividad y aumentar sus márgenes de beneficio. Además, se garantiza la seguridad y estabilidad del mobiliario, evitando posibles fallos y accidentes que podrían dañar la imagen de la empresa y generar costes adicionales.

Cabe destacar que el MEF no solo permite optimizar costes y seguridad, sino que también abre la puerta a la innovación en el diseño de mobiliario retail. Al comprender mejor el comportamiento del mobiliario bajo diferentes condiciones, se pueden desarrollar nuevos productos más ligeros, resistentes y funcionales, que satisfagan las necesidades de los clientes y las tendencias del mercado.

En definitiva, el cálculo mecánico por elementos finitos se convierte en una herramienta fundamental para HMY Yudigar, permitiéndole optimizar costes, garantizar la seguridad y fomentar la innovación en el diseño de mobiliario retail.

2.3. Metodología/Estructura del TFG

La metodología para este TFG se divide en tres fases principales:

1. Investigación y Aprendizaje de Herramientas:
   - Objetivo: Adquirir conocimientos sobre el uso de SolidEdge y su módulo de elementos finitos.
   - Actividades: Estudio de documentación, visualización de tutoriales y prácticas con el software.

2. Desarrollo del Procedimiento de Cálculo:
   - Objetivo: Crear un procedimiento sistemático para realizar cálculos de estabilidad y esfuerzo.
   - Actividades: Documentar los pasos para configurar y ejecutar análisis en SolidEdge.

3. Aplicación y Optimización:
   - Objetivo: Implementar y validar el procedimiento en productos reales para optimizar diseño y costes.
   - Actividades: Aplicar el procedimiento a productos seleccionados, analizar resultados y proponer mejoras en diseño y materiales.

Cada fase está orientada a garantizar que los cálculos puedan realizarse internamente en HMY Yudigar, optimizando costes y mejorando la eficiencia del diseño.

2.4. Software Utilizado

Para la realización de este Trabajo de Fin de Grado (TFG), se ha utilizado el software SolidEdge, específicamente la versión Academic Edition 2310 (compilación 224.00.00.101 x64) del año 2024.

La versión Academic Edition 2310 de SolidEdge incluye el módulo SolidEdge Simulation, que permite realizar análisis por elementos finitos (FEA). Esta herramienta es fundamental para evaluar el comportamiento de estructuras y componentes bajo diferentes tipos de cargas y condiciones operativas, lo cual es crucial para el análisis y optimización de los diseños en este TFG.

La versión académica utilizada dispone de todas las funciones necesarias para llevar a cabo un análisis completo, incluyendo la definición de materiales, la aplicación de cargas y restricciones, la generación de mallas y la interpretación de resultados. Estas capacidades permiten realizar simulaciones detalladas y precisas, esenciales para el objetivo de optimizar el diseño y reducir costos de material en el mobiliario fabricado.

La elección de esta versión de SolidEdge se debe a su capacidad para manejar complejos ensamblajes y su amplia gama de herramientas de simulación y análisis, lo que garantiza un enfoque riguroso y efectivo en el desarrollo del proyecto.

3. INVESTIGACIÓN Y APRENDIZAJE DE HERRAMIENTAS

3.1. Introducción

Para el desarrollo de este TFG utilizaremos el software SolidEdge, una herramienta CAD (Diseño Asistido por Computadora) ampliamente utilizada en ingeniería y el diseño industrial. Su módulo "Simulación" permite realizar análisis por elementos finitos (FEA) para evaluar el comportamiento de estructuras y componentes bajo diferentes tipos de cargas. Elegimos SolidEdge debido a su uso predominante en HMY, la empresa donde se desarrollan los productos analizados en este proyecto, lo que facilita la integración de nuestros análisis con los procesos industriales existentes.

3.2. Objetivos de aprendizaje

El objetivo principal de este apartado es detallar el proceso de aprendizaje realizado para dominar el uso de SolidEdge y su extensión 'Simulación'. Este conocimiento es fundamental para garantizar la precisión y fiabilidad de los análisis realizados en los estudios posteriores del TFG.

3.3. Conceptos clave en FEA

3.3.1. Mallado

El mallado es el proceso de dividir una geometría en elementos finitos más pequeños, conocidos como malla, que son utilizados en el análisis por elementos finitos (FEA). La malla puede estar compuesta de varios tipos de elementos, como tetraedros, hexaedros, prismas, entre otros.

Tipos de Malla:

- **Malla de Cuerpo**: Se aplica a todo el volumen de la geometría. Es útil para análisis tridimensionales completos donde se necesita evaluar el comportamiento interno de la pieza.
- **Malla de Superficie**: Se aplica solo a la superficie de la geometría. Es útil para análisis de estructuras delgadas donde el grosor no tiene un impacto significativo en el comportamiento.
- **Malla de Cuerpos Mixtos y Generales**: Esta opción se utiliza para geometrías complejas que incluyen múltiples cuerpos o componentes ensamblados. Esta malla es versátil y puede adaptarse a diferentes tipos de elementos dentro de un ensamblaje, permitiendo un análisis más detallado y preciso de estructuras compuestas.

Importancia: El tamaño y la calidad de la malla son cruciales para la precisión de los resultados del análisis. Una malla demasiado gruesa puede simplificar demasiado el problema, resultando en resultados imprecisos, mientras que una malla demasiado fina puede requerir un tiempo de cálculo excesivo y recursos computacionales significativos.

Aplicación en SolidEdge: En SolidEdge, la malla se genera automáticamente, pero los usuarios pueden ajustar el tamaño de la malla y otras configuraciones para optimizar el equilibrio entre precisión y tiempo de cálculo. Los ajustes de la malla se realizan a través de una escala del 1 al 10, donde se selecciona la finura de la malla según las necesidades del análisis. Para generar una malla de cuerpo, es necesario que la geometría esté correctamente definida y que el material esté asignado.

3.3.2. Propiedades del Material

Las propiedades del material son las características físicas y mecánicas que definen cómo un material se comportará bajo diferentes condiciones de carga. Estas propiedades incluyen el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, el límite elástico (LE), entre otras.

Selección: En SolidEdge, es crucial seleccionar y asignar las propiedades del material adecuadas para cada componente antes de realizar un análisis FEA. Los materiales se eligen de una biblioteca predefinida, que incluye metales, plásticos, compuestos y otros materiales comunes en la ingeniería.

Propiedades Clave:

- **Módulo de Elasticidad (E)**: Mide la rigidez de un material. Un alto módulo de elasticidad indica un material más rígido.
- **Coeficiente de Poisson (ν)**: Relaciona la deformación longitudinal y transversal. Define cómo un material se deforma en dirección perpendicular a la aplicación de la carga.
- **Límite Elástico (σy)**: La tensión máxima que un material puede soportar sin deformarse permanentemente.

Importancia: Asignar correctamente las propiedades del material es esencial para obtener resultados precisos en el análisis FEA. La resistencia, rigidez y comportamiento bajo carga de la pieza dependen directamente de estas propiedades. En los estudios de los anexos, se detalla cómo se asignan estos materiales en SolidEdge y cómo afectan los resultados de las simulaciones.

3.3.3. Tensión y Deformación

Definición:

- **Tensión (Stress)**: La fuerza interna por unidad de área dentro de un material. Se mide en Megapascales (MPa).
- **Deformación (Strain)**: La medida de la deformación del material en respuesta a la tensión aplicada. Es una cantidad adimensional que representa el cambio relativo en la forma o tamaño del material.

Tipos de Deformación:

- **Deformación Elástica**: Ocurre cuando el material vuelve a su forma original una vez que se retira la carga. Este tipo de deformación es reversible.
- **Deformación Plástica**: Ocurre cuando el material sufre una deformación permanente después de que se retira la carga. Este tipo de deformación es irreversible.

Relevancia en el Análisis: Medir y analizar la tensión y deformaciones es crucial para evaluar la integridad estructural de una pieza. En SolidEdge, los resultados de los análisis FEA incluyen gráficos y datos sobre la distribución de tensiones y deformaciones, permitiendo a los ingenieros identificar zonas críticas y posibles puntos de falla. Las tensiones se analizan en Megapascales (MPa), una unidad común en ingeniería para expresar la magnitud de las tensiones en los materiales.

Aplicación en los Estudios: En los estudios realizados en los anexos, se aplican cargas distribuidas y se observan las tensiones y deformaciones resultantes. Estos análisis permiten determinar si las piezas y ensamblajes cumplen con los criterios de diseño y seguridad, y si las modificaciones propuestas (como la reducción de costes) afectan negativamente su desempeño. La interpretación de estos resultados es crucial para validar el diseño y garantizar su funcionalidad bajo condiciones de trabajo realistas.

3.3.4. Factor de seguridad

El factor de seguridad muestra la relación entre el límite elástico del material y las tensiones máximas que el material experimenta bajo las condiciones de carga dadas. Se calcula con la fórmula, *Ilustración 1*. En nuestros estudios marcaremos un límite de que el factor de seguridad sea igual o mayor a 1,5. Puesto que la realización de los estudios que vamos a analizar pueden tener un cierto margen de error, y la seguridad en el mobiliario es clave para garantizar al cliente que la estructura va a aguantar la carga a la que se va a ver sometida sin riesgo a que se rompa o pueda causar algún tipo de peligro a las personas.

$$F_S = \frac{\sigma_{elástica}}{\sigma_{máxima}}$$

Ilustración 1 → Factor de seguridad

- FS: Factor de seguridad

El factor de seguridad es una medida de cuán seguro es un diseño. Indica cuánto puede resistir el material o el componente más allá de las cargas máximas esperadas antes de fallar.

- $\sigma_{elá}$: Límite elástico

Como hemos visto en el apartado, *3.3.2 Propiedades del Material,* el LE es la tensión máxima que un material puede soportar antes de romperse o fallar completamente.

- $\sigma_{máxima}$: Tensión máxima aplicada o esperada en el material

La tensión máxima es la mayor tensión que el material experimentará bajo las condiciones de carga dadas en el diseño. Es la tensión calculada en el punto de mayor carga del componente durante el análisis. Se mide en unidades de presión, como megapascales (MPa).

Interpretación del Fs

1. **Fs > 1**:
   - Significa que el material puede soportar las tensiones aplicadas sin superar su límite elástico. El diseño es seguro bajo las cargas dadas.
   - Un Fs mayor indica mayor seguridad. Por ejemplo, un Fs de 2 significa que el material puede soportar el doble de la carga aplicada antes de alcanzar su límite elástico.
2. **Fs = 1**:
   - Indica que las tensiones en el material son iguales al límite elástico. El material está justo en el punto de ceder bajo las cargas aplicadas. Esto generalmente no es aceptable para la mayoría de los diseños.
3. **Fs < 1**:
   - Significa que las tensiones en el material exceden el límite elástico. El material fallará bajo las cargas aplicadas, lo que indica que el diseño no es seguro.

3.4. Interfaz de usuario y herramientas básicas

En el panel superior de la ventana "Simulación", se encuentran todas las herramientas necesarias para realizar estudios de cargas. A continuación, se explica paso a paso cada una de las funciones esenciales para llevar a cabo los análisis deseados.

Ilustración 2 → Panel superior - Simulación

3.4.1. **Estudio.** Creación de Distintos Estudios Estáticos y Definición del Material.

Podemos crear tantos estudios como queramos, lo que puede ser de utilidad para tener un estudio distinto con distintas pruebas de carga.

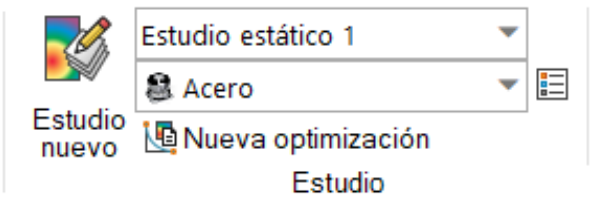


Ilustración 3 → Estudio

Nuevo estudio:

Al crear un nuevo estudio (*Ilustración 4*), se presentan varios parámetros editables según el tipo de estudio deseado.

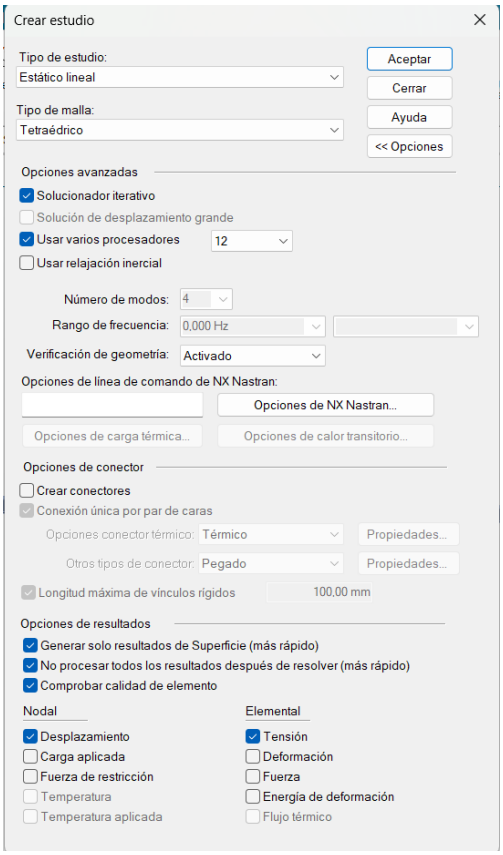


Ilustración 4 → Nuevo estudio

- Tipo de estudio:

Para los estudios realizados en este TFG, se utilizará principalmente el análisis estático lineal, adecuado para los diseños 3D analizados.

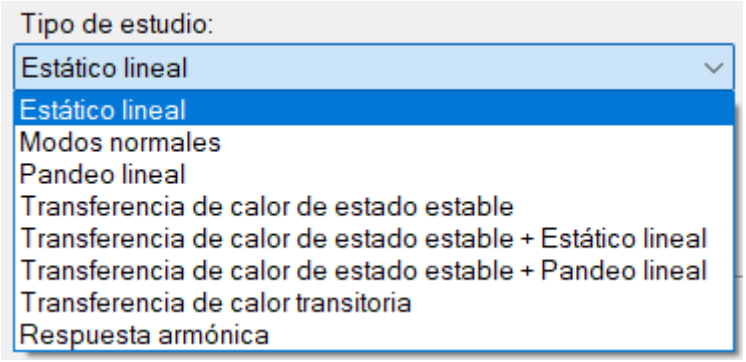


Ilustración 5 → Tipo de estudio

- Tipo de malla:

Hay tres opciones de malla disponibles:

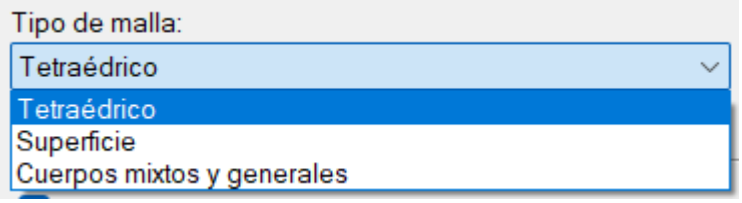


Ilustración 6 → Tipo de malla

1. **Tetraédrica:** Comúnmente utilizada para diseños 3D simples.
2. **Malla de superficie:** Para sólidos creados a partir de superficies. No se usará en este TFG.
3. **Cuerpos Mixtos y Generales:** Disponible en ficheros de ensamblajes. Útil para diseños complejos con zonas pequeñas. Preferible para estudios con posibles problemas en el diseño, gracias a su mejor adaptabilidad a las superficies.

- Opciones avanzadas:

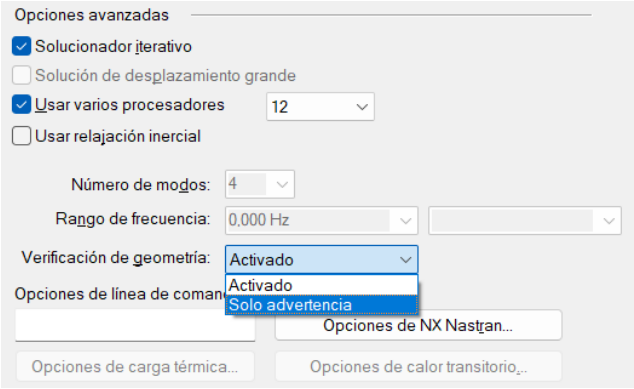


Ilustración 7 → Opciones avanzadas

- **Solucionador iterativo:** Permite obtener resultados de forma más eficiente mediante un proceso aproximado repetido hasta alcanzar una solución convergente.
- **Procesadores:** Utilizar el máximo número posible para minimizar el tiempo de cálculo.
- **Verificación de Geometría:** Marcar "Solo advertencia" para resolver el análisis, permite que el programa genere resultados aunque existan pequeños fallos en el diseño 3D.

Tabla de materiales:

El material inicialmente cogerá los que tengan definidos los componentes en su diseño 3D. Si, por lo contrario, en el estudio quieres asignar un material distinto, la tabla de materiales permite seleccionar el material del que está compuesto todo el diseño de la estructura. En este caso no permite seleccionar distintos materiales según el componente.

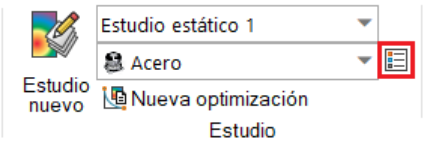


Ilustración 9 → Tabla de materiales - 1

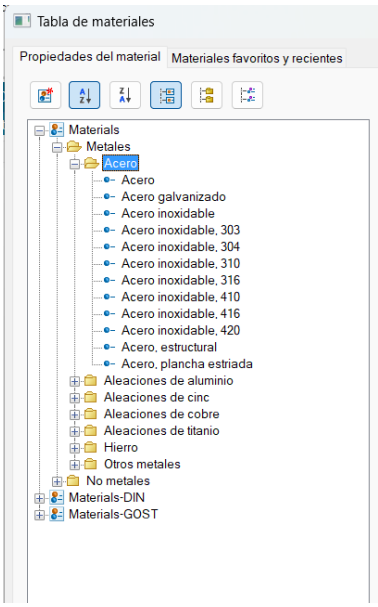


Ilustración 8 → Tabla de materiales - 2

3.4.2. Geometría

En diseños 3D con ensamblajes, es crucial definir las piezas a incluir en el estudio.

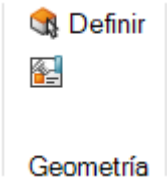


Ilustración 10 → Definición de geometría

3.4.3. Cargas estructurales

Nos enfocaremos en las cargas de fuerza, aplicables tanto de manera puntual como distribuida. Vamos a empezar con la carga distribuida.

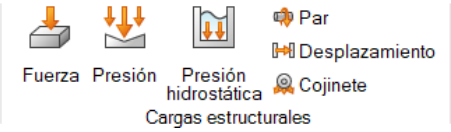


Ilustración 11 → Cargas estructurales

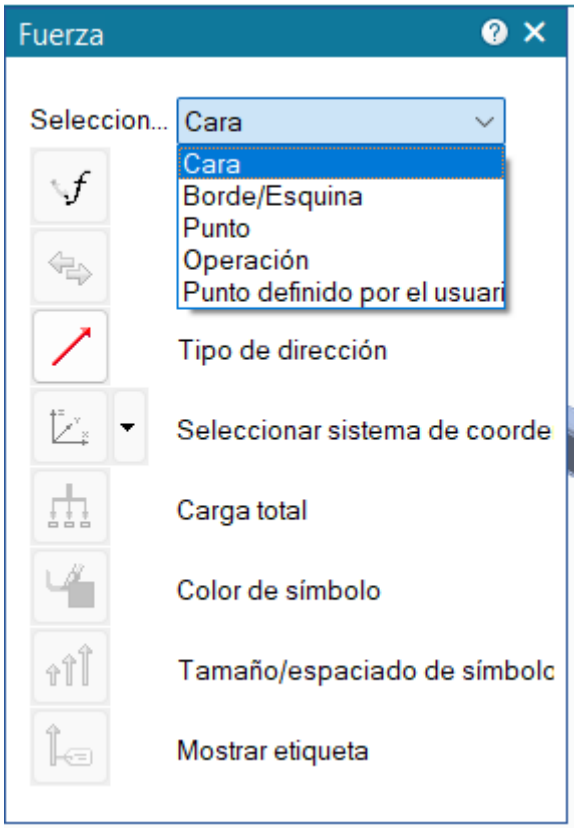


Ilustración 12 → Cargas de fuerza

- **Sobre una superficie:** Seleccionar la cara para aplicar la fuerza e indicar la carga a aplicar.

Si queremos aplicar la fuerza a lo largo de toda una superficie, seleccionaremos la cara.

Si por lo contrario queremos que la fuerza se aplique sobre un único punto, existen dos posibilidades. Que el punto este definido por la geometría del artículo, es decir que sea en una esquina de una arista. O si queremos que se aplique sobre un punto cualquiera en el espacio, para ello tenemos que dibujar el punto en el diseño 3D sobre un boceto y seleccionar la fuerza sobre "Punto definido por el usuario", donde te permitirá seleccionar el punto del boceto.

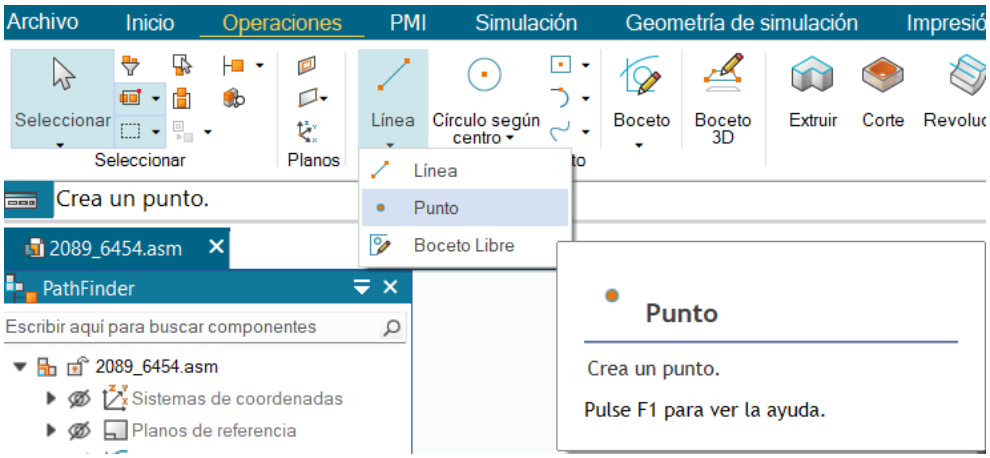


Ilustración 13 → Creación de punto

3.4.4. Restricciones

Es necesario restringir el cuerpo para poder resolver el análisis. Para los estudios se usará principalmente la restricción fija, la cual simulará la unión que tenga el artículo al suelo o a la pared.

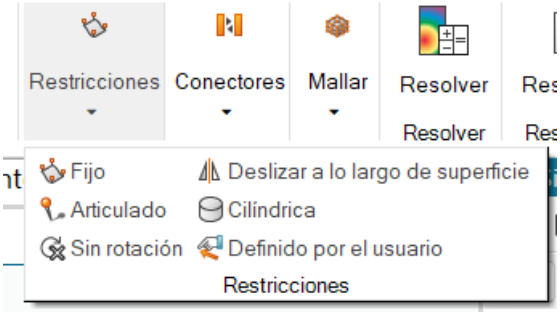


Ilustración 14 → Restricciones

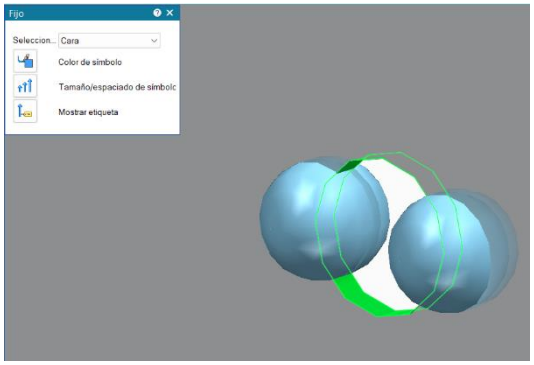


Ilustración 15 → Restricción fija

3.4.5. Conectores

Permite realizar las conexiones entre las piezas del diseño 3D, como pueden ser soldaduras, pegados, uniones atornilladas, etc. Para los estudios a realizar usaremos principalmente la función de "Auto", que hace una simulación similar a la que puede dejar una soldadura o una unión atornillada.

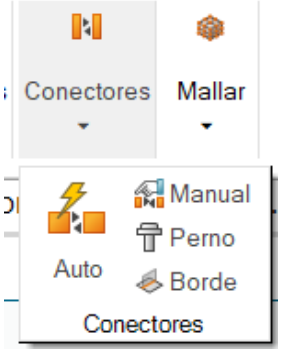


Ilustración 16 → Conectores

Paso 1

Seleccionar todos los elementos entre los que queremos realizar una conexión.

Paso 2

Segundo paso, darle a aceptar para que nos muestre las conexiones que encuentra.

Paso 3

Nos muestra los resultados que ha obtenido. Si son los deseados, le daremos a "Crear conectores" abajo a la derecha para finalizar la operación.

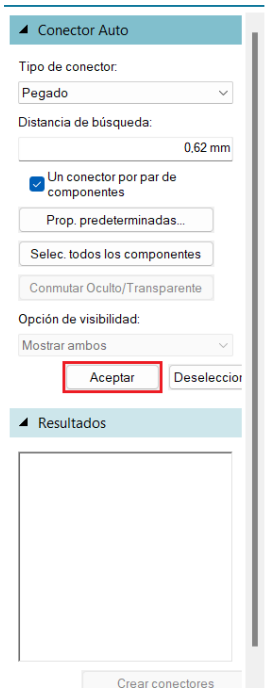


Ilustración 17 → Conectores paso 2

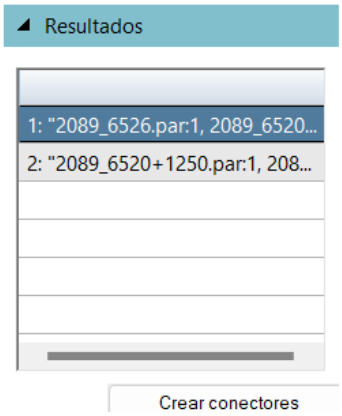


Ilustración 18 → Conectores paso 3

3.4.6. Mallar

Una vez resueltos los pasos anteriores, pasamos a desarrollar la malla del cuerpo.

Ilustración 19 → Mallado

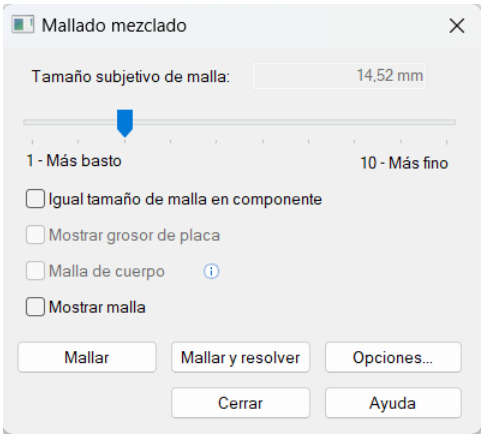


Ilustración 20 → Opciones mallado

En las opciones de mallado, *Ilustración 20*, tenemos la opción de dar el tamaño de malla que deseamos. Siendo "más basto" una malla con formas más grades y por tanto resultados menos precisos, y "más fino" serán formas geométricas más pequeñas y los resultados serán más precisos.

La opción de "Igual tamaño de malla en componente" permite elegir el tamaño de malla a mano y este se aplica para toda la superficie en los componentes, siendo de igual tamaño en todas partes. Esta opción puede ser útil para modelos con geometría simple.

La malla de cuerpo permite mejorar la calidad de la malla, permitiendo que el mallado pueda atravesar las caras de cada cuerpo.

Errores al mallar: Cuando mallamos los componentes puede ocurrir que estos den error. Esto lo sabremos porque en el panel lateral derecho de simulación, en el apartado de Malla, tenemos todas las mallas que ha generado en cada uno de los elementos. Si la malla no se ha podido realizar en uno de los elementos, el icono saldrá en rojo como se puede ver en este ejemplo.

Para saber que ha podido ocurrir y corregirlo abriremos el panel de herramientas de la Malla y seleccionaremos Comprobar calidad de elemento. Marcaremos aviso y error y para que nos de los resultados "Mostrar elementos" con lo que nos mostrará en el visualizador 3D en rojo las partes que han fallado al mallar los componentes y en amarillo zonas críticas.

Con esto nos podemos hacer una idea de cual ha podido ser el error, por ejemplo, puede suceder que dos elementos tengan interferencia o que un elemento en una zona sea muy estrecha o pequeña. Por lo que este análisis nos puede ser útil como comprobación de que el diseño del mueble no tiene errores.

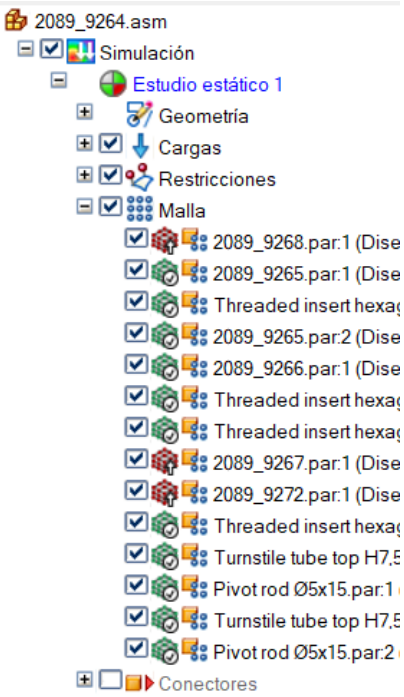


Ilustración 21 → Panel simulación

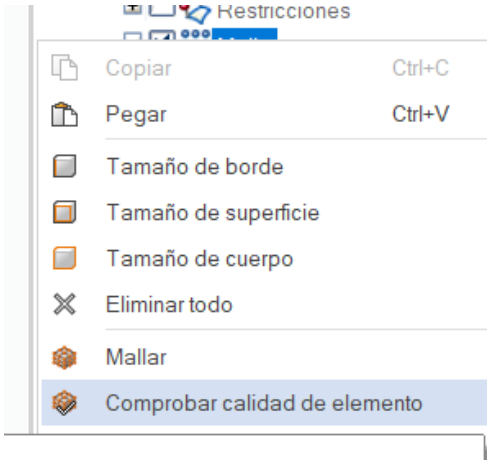


Ilustración 22 → Verificador malla

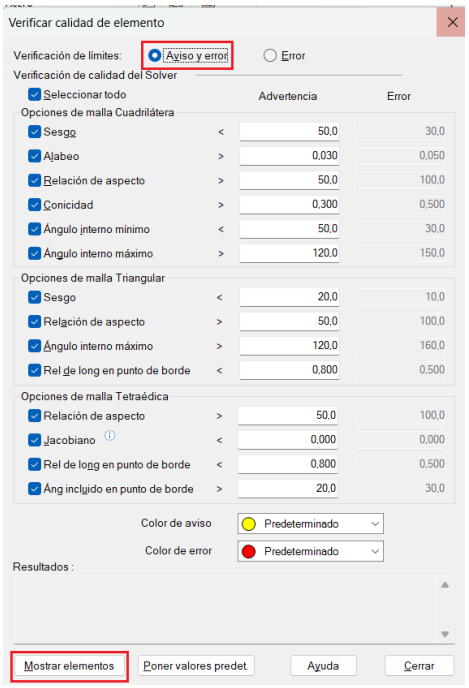


Ilustración 23 → Opciones verificador

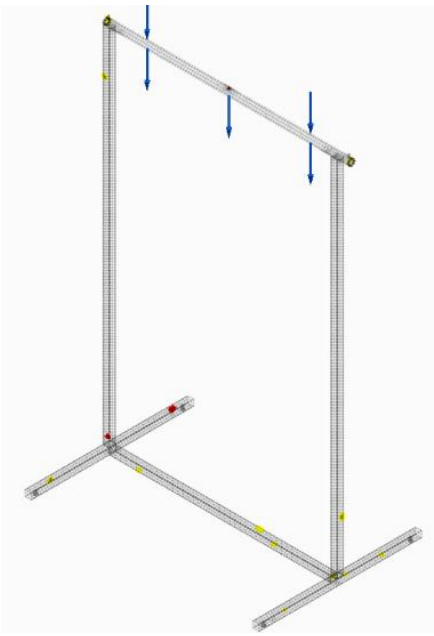


Ilustración 25 → Visor error malla

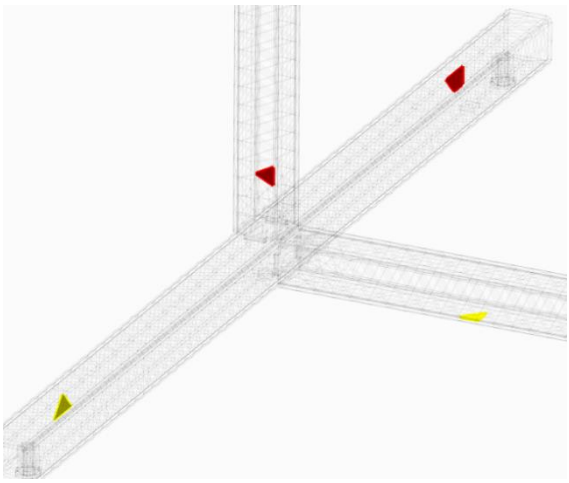


Ilustración 24 → Visor error malla - 2

Al resolver la verificación de calidad, se nos muestra en el diseño 3D las zonas de aviso y de error. Como podemos ver en la *Ilustración 25*, hay varias zonas del diseño que están en amarillo. Estas zonas son las de aviso, quiere decir que la malla no se adapta correctamente a la geometría en esa zona. Las partes en rojo son las que dan error, ya que la malla no ha podido crearse en esas partes de los componentes. Esto puede estar debido a que el tamaño de malla que hemos ejecutado es demasiado grueso para la forma y geometría de la pieza. Por lo que volvemos a mallar (*Ilustración 26*) las piezas seleccionando un tamaño de malla más fino. En este caso probamos con un tamaño de malla de 7,81mm consiguiendo que el diseño no de ningún error de malla, *Ilustración 27*.

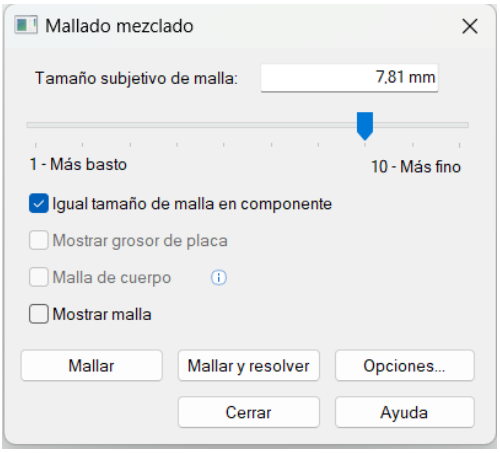


Ilustración 26 → Malla fina

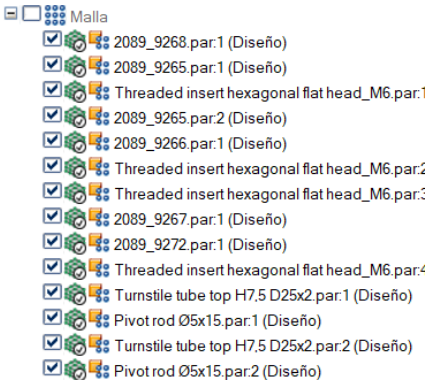


Ilustración 27 → Malla corregida

3.4.7. Resolver

Por último, resolvemos el estudio y analizamos los resultados, principalmente de tensión y desplazamiento.

Ilustración 29 → Resolver

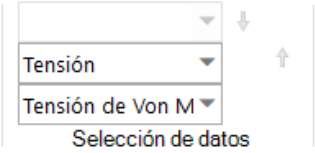


Ilustración 28 → Resolver - Selección de datos

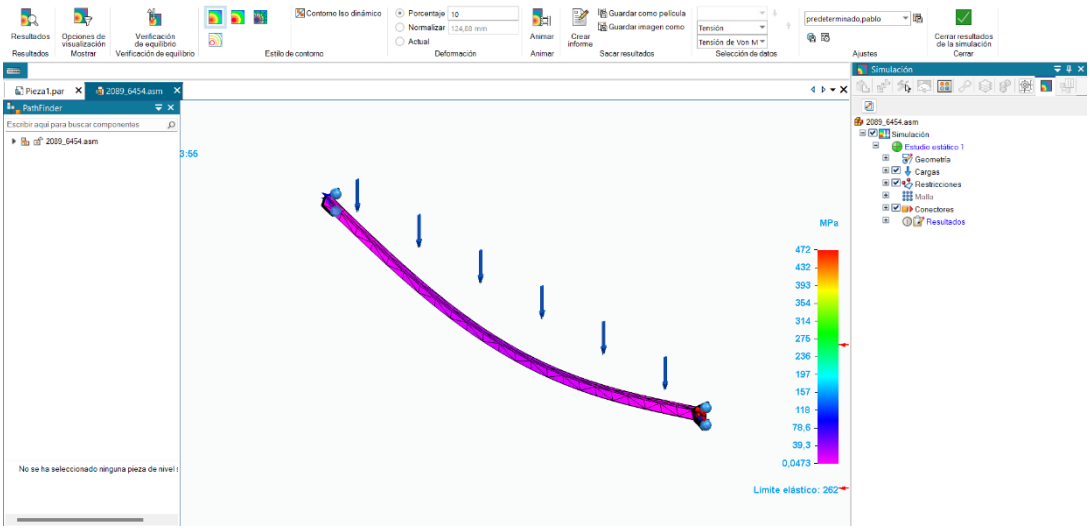


Ilustración 30 → Tensión

Tensión

En la selección de datos, *Ilustración 28*, puedes seleccionar si quieres visualizar la tensión de los elementos o el desplazamiento en cada eje. Seleccionamos "Tensión" y "Tensión de Von Mises".

En la parte inferior derecha nos aparece un gráfico donde nos muestra el valor máximo y mínimo de desplazamiento o de tensión, según la selección de datos que hayamos seleccionado. Así como el límite elástico del material, con lo que podemos observar si el artículo puede soportar la carga indicada con el diseño actual.

Analizando la *Ilustración 33*, vemos que el valor máximo de tensión que soporta la estructura es de 472Mpa, al ser un valor superior al LE vamos a estudiar donde se encuentra esta tensión para evaluar si es un problema.

Para localizar el punto de máxima tensión podemos seleccionar el marcador máximo, ver *Ilustración 32*. Ahora nos muestra en el 3D el punto y vemos que se encuentra justo en la unión fija, *Ilustración 31*. Según el diseño y la carga que soporta habría que valorar si es un problema en el análisis de cargas, esto puede deberse a que la malla no es muy fina en esa zona y no calcula bien las tensiones. Si ese no fuera el problema, habría que considerar según la tensión que soporta, si la estructura podría correr peligro. En este caso, en el que el punto crítico se localiza en un punto muy pequeño, aunque la tensión sea superior al LE, la estructura no debería de correr peligro. Si por el contrario la zona fuese de un mayor tamaño y la tensión fuera superior al LE habría que considerar cambiar el diseño estructural, pero esto debe ser estudiado en cada caso.

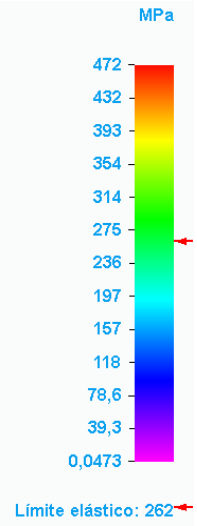


Ilustración 33 → Tensión Von Mises

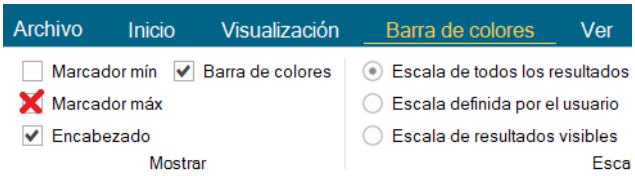


Ilustración 32 → Marcador máx.

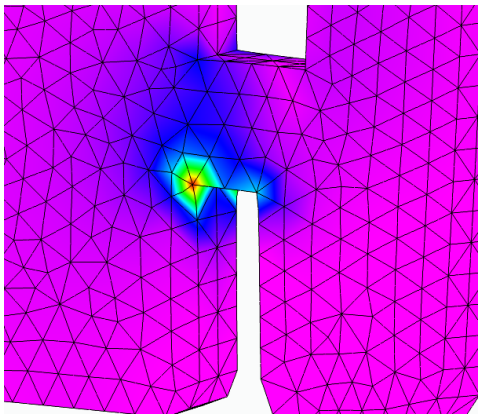


Ilustración 31 → Máx. tensión

Si la visualización no es muy nítida y nos molesta la malla, podemos configurar la vista para que nos represente el conjunto con los diferentes tonos de colores según la tensión y sin que salga la malla. Para ello iremos al panel superior "Visualización", *Ilustración 34*, y en estilo de bordes marcaremos "modelo", *Ilustración 35*.

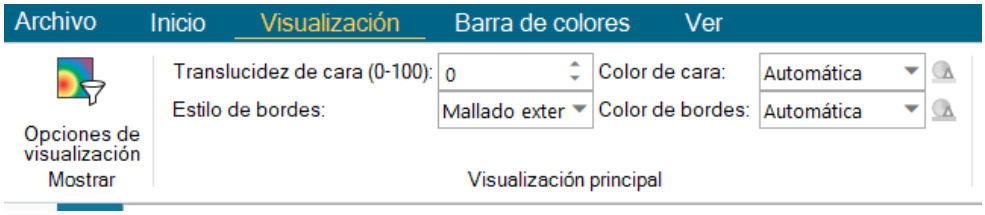


Ilustración 34 → Panel visualización

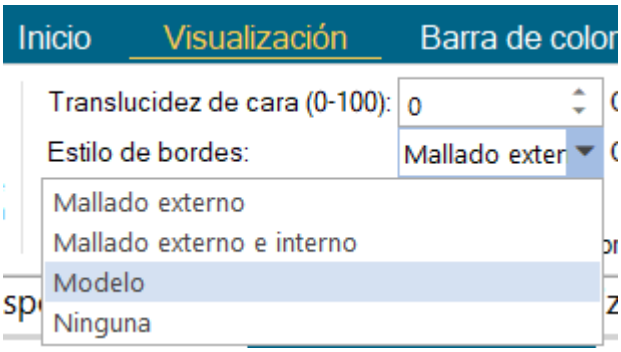


Ilustración 35 → Borde sin malla

Desplazamiento

Ahora en la selección de datos, *Ilustración 28*, elegimos desplazamiento y nos cambia la simulación 3D al comportamiento que tendría la estructura ante dicha carga, *Ilustración 36*. Para modificar la escala en la que se nos muestra el desplazamiento, tenemos en el panel superior "Deformación", *Ilustración 37*, el porcentaje por el que se está multiplicando el movimiento. Permitiéndonos ver de una manera más rápida las partes que mayor deformación van a tener.

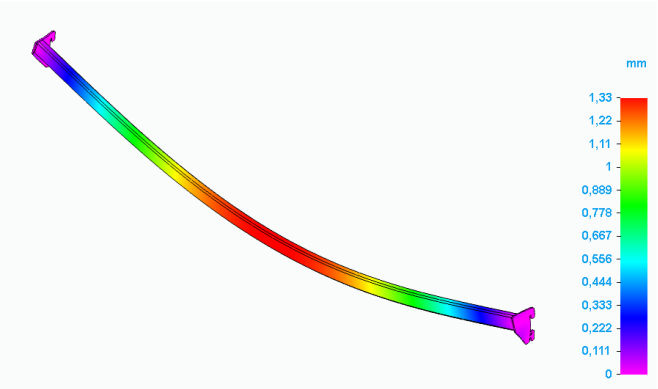


Ilustración 36 → Desplazamiento

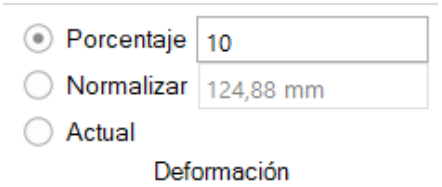


Ilustración 37 → Porcentaje deformación

Según la *Ilustración 38*, el máximo desplazamiento es de 1,33mm el cual se encuentra en la parte central de tubo horizontal. Para evaluar si el desplazamiento que sufre es viable o no, es muy importante tener en cuenta el criterio del cliente al que se va a vender el diseño. Ya que cada cliente trabajo con un nivel de tolerancias según la calidad de diseño que quieran.

Generalmente, en estructuras de longitudes grandes se suele permitir un desplazamiento de varios milímetros, pero siempre consultando con cliente para que nos den su validación.

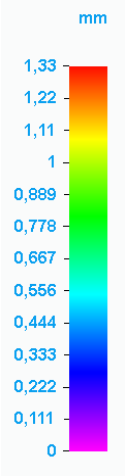


Ilustración 38 → Tabla desplazamiento

Factor de seguridad

Cambiamos la selección de datos a "Factor de seguridad" *Ilustración 40*, lo que nos va a permitir determinar si el diseño es estructuralmente fiable y seguro.

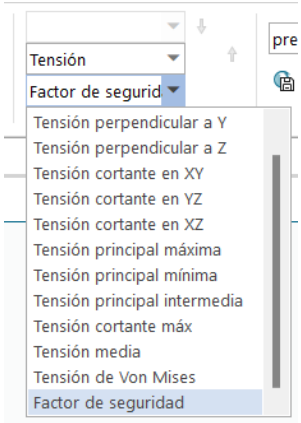


Ilustración 40 → Factor de seguridad

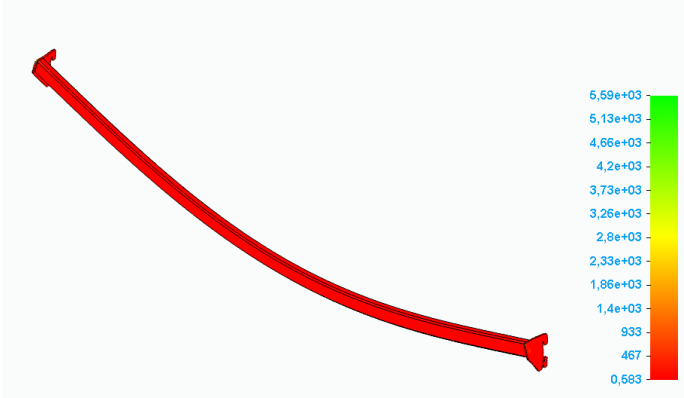


Ilustración 39 → 3D Factor de seguridad

Como podemos observar en la *Ilustración 39*, el valor mínimo de Fs en el diseño es 0,583 y el valor máximo es muy elevado. Como no podemos determinar que zonas tienen el factor de seguridad por debajo de 1 vamos a cambiar los valores del gráfico derecho. Para ellos vamos a "Barra de colores" en el menú contextual superior, *Ilustración 41*, y en escala seleccionamos "Escala definida por el usuario". Lo que nos va a permitir poner el valor máximo y mínimo que nos muestra el gráfico de colores.

El valor mínimo lo dejamos en 0,583 y el valor máximo vamos a poner 5, ver *Ilustración 43*.

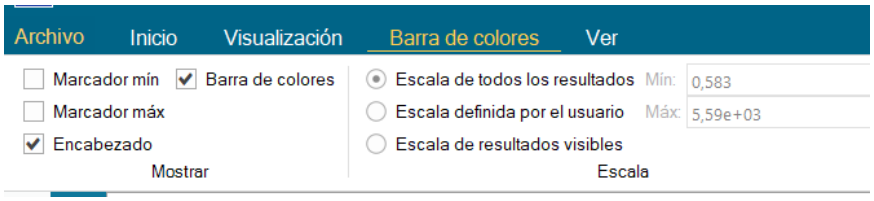


Ilustración 41 → Barra de colores

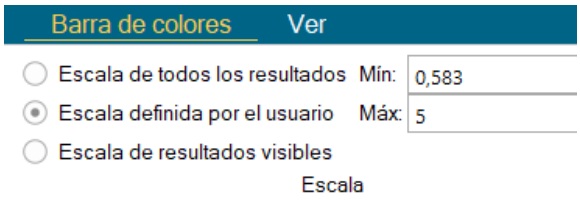


Ilustración 43 → Escala definida por el usuario

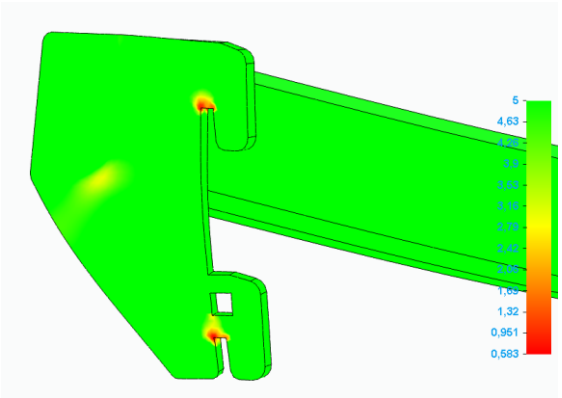


Ilustración 42 → 3D factor de seguridad acotado

Ya vemos en la *Ilustración 42*, que los valores donde el Fs es menor que 1 son fácilmente reconocibles. Y estos puntos son en la zona de los enganches, donde esta fija nuestra pieza. Es algo que podíamos deducir ya que era la zona que mayor tensión soportaba, y al ser toda la pieza del mismo material (acero) tiene el mismo LE por lo que las zonas que mayor tensión soportan son las que el factor de seguridad es menor. Como hemos podido aprender en el apartado *3.3.4 Factor de seguridad*, el Fs es el resultado de la división entre la tensión que soporta un punto entre el LE. Por lo que todos los puntos en los que la tensión sea superior al LE, 262MPa en el caso del acero que utilizamos, el Fs será menor que 1.

Errores

Es posible que cuando intentemos resolver el estudio, nos salga algún fallo. A continuación, vamos a ver un posible error y como interpretar la causa por la que sale el error.

Cuando el programa no logra resolver el estudio nos va a saltar un pop-up, *Ilustración 44*, que nos indica que el sistema está fallando. Para poder entender cual es lo que no ha funcionado, vamos a seleccionar "Registro de NX Nastran" abajo a la izquierda del pop-up *Ilustración 44*.

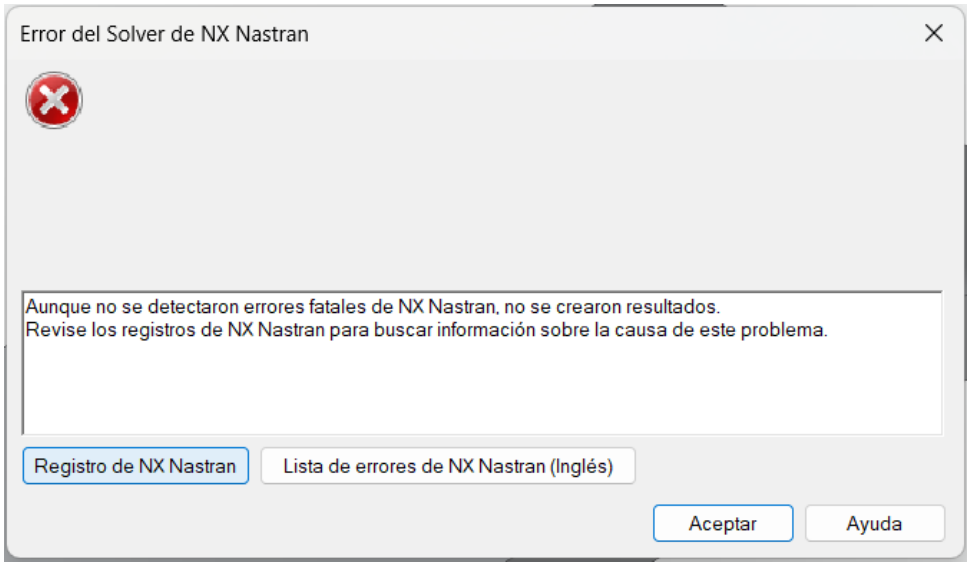


Ilustración 44 → Error Nastran

Se nos va a abrir una ventana con los registros de Nastran, *Ilustración 45*,donde aparece toda la información que ha obtenido el programa en la simulación. Como aparecen muchos datos y es complejo de entender vamos a bajar hasta las últimas líneas del documento.

En estas últimas líneas, *Ilustración 46*, se puede leer que el error que ha salido es porque no se ha podido asignar los datos en la memoria. Nos indica que el programa requiere de 3 Gb de memoria RAM.

En este caso para poder resolver el análisis se recomendaría cerrar todos las ventanas y programas posibles que tengamos abiertos. Para poder dejarle al sistema más memoria libre para ejecutar nuestro análisis de cargas.

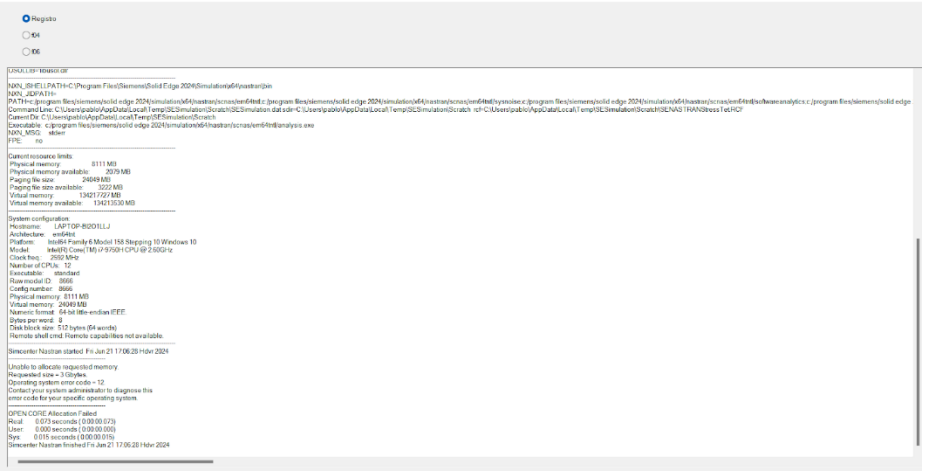


Ilustración 45 → Registro Nastran

```
-----------------------------------------------
Unable to allocate requested memory.
Requested size = 3 Gbytes.
Operating system error code = 12.
Contact your system administrator to diagnose this
error code for your specific operating system.
-----------------------------------------------
OPEN CORE Allocation Failed
Real:      0.073 seconds ( 0:00:00.073)
User:      0.000 seconds ( 0:00:00.000)
Sys:       0.015 seconds ( 0:00:00.015)
Simcenter Nastran finished Fri Jun 21 17:06:28 Hdvr 2024
```

Ilustración 46 → Resultados Nastran

3.4.8. Resultados

Dentro de la simulación, a la izquierda de la barra de herramientas, tenemos la opción de ver resultados. Esto nos mostrará una tabla, *Ilustración 49,* que nos permite ver los valores de desplazamiento en los 3 ejes de cada uno de los puntos que forman el diseño 3D.

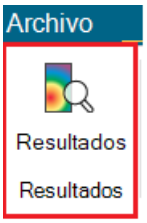


Ilustración 48 → Resultados

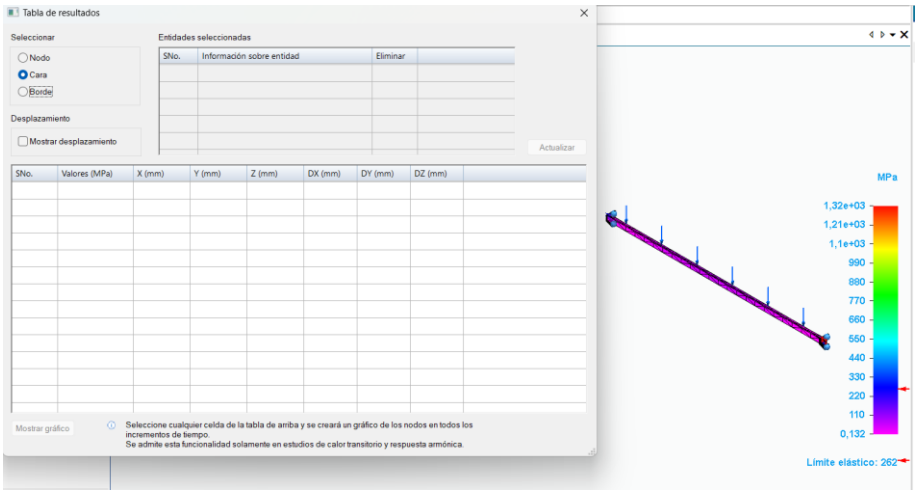
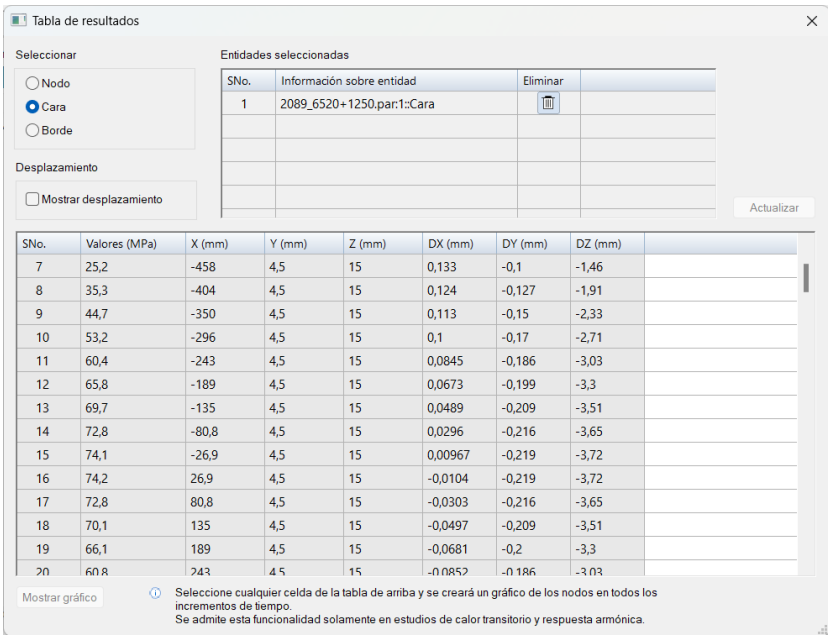


Ilustración 49 → Tabla resultados



SNo.	Valores (MPa)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
7	25,2	-458	4,5	15	0,133	-0,1	-1,46
8	35,3	-404	4,5	15	0,124	-0,127	-1,91
9	44,7	-350	4,5	15	0,113	-0,15	-2,33
10	53,2	-296	4,5	15	0,1	-0,17	-2,71
11	60,4	-243	4,5	15	0,0845	-0,186	-3,03
12	65,8	-189	4,5	15	0,0673	-0,199	-3,3
13	69,7	-135	4,5	15	0,0489	-0,209	-3,51
14	72,8	-80,8	4,5	15	0,0296	-0,216	-3,65
15	74,1	-26,9	4,5	15	0,00967	-0,219	-3,72
16	74,2	26,9	4,5	15	-0,0104	-0,219	-3,72
17	72,8	80,8	4,5	15	-0,0303	-0,216	-3,65
18	70,1	135	4,5	15	-0,0497	-0,209	-3,51
19	66,1	189	4,5	15	-0,0681	-0,2	-3,3
20	60,8	243	4,5	15	-0,0852	-0,186	-3,03

Ilustración 47 → Tabla resultados - 2

4. DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

En esta sección, se documentará el proceso paso a paso para llevar a cabo simulaciones de elementos finitos (FEA) aplicadas a piezas y ensamblajes de mobiliario fabricados por HMY Yudigar. Para la realización de estos estudios partiremos de algunos diseños 3D que tenemos ya diseñados.

El objetivo de este apartado es proporcionar una guía práctica y detallada que permita replicar el procedimiento de cálculo en diferentes componentes y estructuras.

4.1. Estudio 1: Simulación inicial

Para comenzar, se realizará un estudio de simulación sobre una pieza básica. Este estudio inicial servirá para familiarizarse con el procedimiento y sentar las bases para análisis más complejos en estudios posteriores. Se proporcionará una descripción detallada de cada paso del proceso, acompañada de imágenes y explicaciones precisas sobre el uso de SolidEdge Simulación.

El estudio tratará de analizar el comportamiento de la pieza ante una carga distribuida de 20N a lo largo de la cara superior, al igual que su comportamiento ante una carga fija de 15N. Estas cargas se han seleccionado de manera aproximada al peso que se podría poner en una pieza de dimensiones similares a la que vamos a analizar.

Con este estudio se espera ganar mayor conocimiento acerca de la herramienta Simulación, así como aprender a interpretar los resultados que obtengamos y saber si un diseño es estructuralmente funcional.

4.1.1. Diseño 3D

Esta pieza se trata de una chapa plegada, en forma de C con espesor 1,8mm. Irá fijada por tres tornillos situados en el lateral izquierdo. Las dimensiones de la cara superior, donde ira la carga, tienen 750x300mm de largo y ancho.

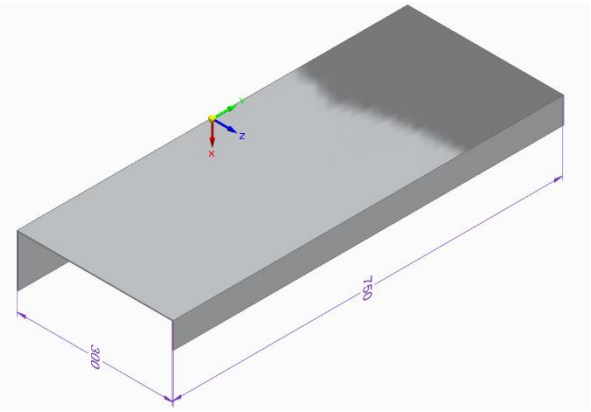


Ilustración 50 → 3D Estudio 1

4.1.2. Nuevo estudio

Comenzamos creando el nuevo estudio, de tipo lineal y malla tetraédrica.

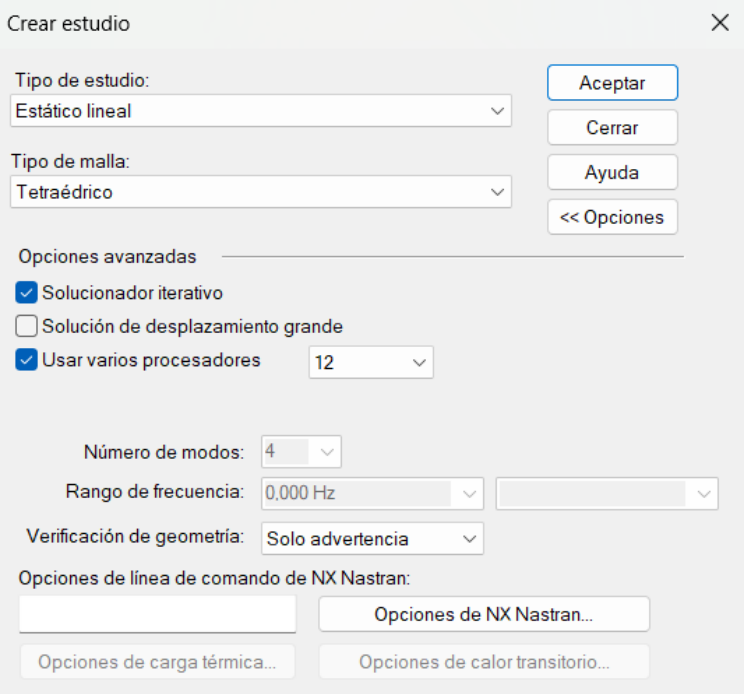


Ilustración 51 → Nuevo estudio 1

4.1.3. Carga estructural

Aplicamos una carga distribuida de 20N en sentido perpendicular a la cara y la dirección que muestran las flechas.

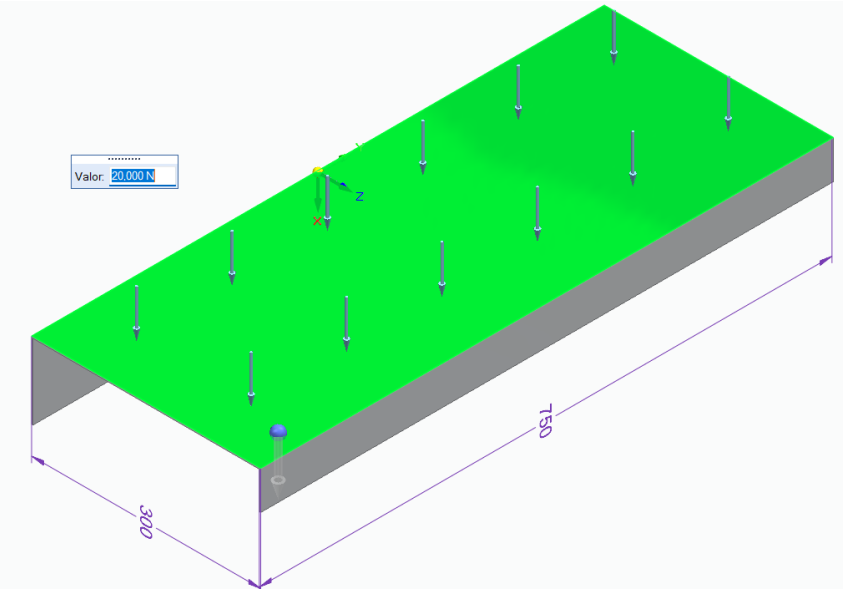


Ilustración 52 → Carga distribuida. Estudio 1

4.1.4. Restricciones

Ponemos una restricción fija en la posición de los tornillos

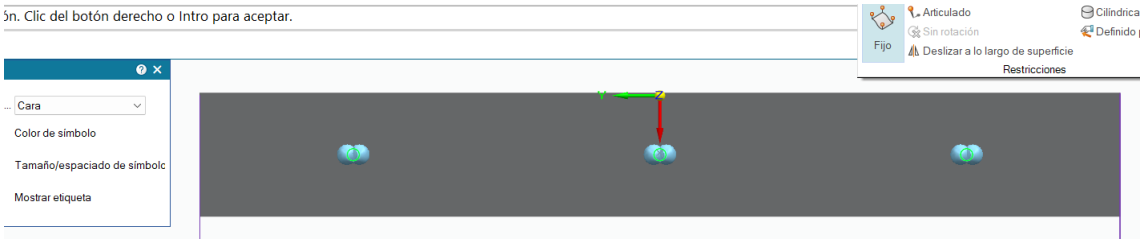


Ilustración 53 → Restricción. Estudio 1

4.1.5. Malla tamaño 7

Realizamos una malla de cuerpo ajustando la Escala de Tamaño de Malla en el punto 7.

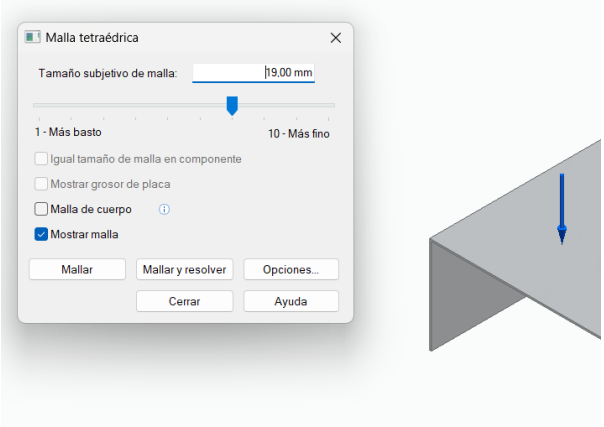


Ilustración 55 → Malla - 7. Estudio 1

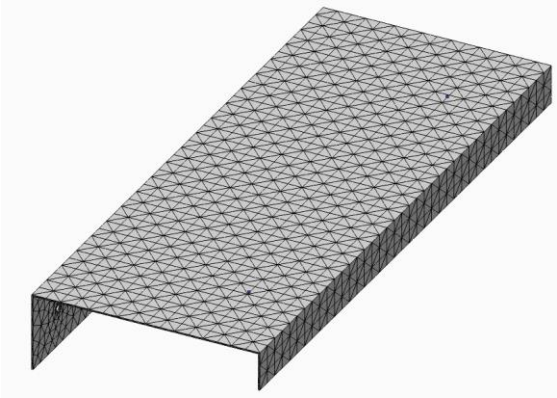


Ilustración 54 → Visualización Malla - 7. Estudio 1

Tensión

Resolvemos y analizamos los resultados. Primeramente, observamos la tensión de Von Mises y vemos que la parte que más sufre es el pliegue destacado en azul. Esto se debe a que esa cara es la que va atornillada y con el peso se genera una tensión que se acumula en esa zona. Analizando los valores vemos que la tensión en esa zona es de unos 12MPA, un valor bastante alejado del límite elástico (262MPA), por lo que no corre peligro de deformación plástica. Sin embargo, vemos en el gráfico derecho que la tensión máxima que se acumula en el diseño es de 41,2 MPa. Buscamos cual es la zona en rojo y vemos que se trata de los agujeros donde se alojan los tornillos, *Ilustración 57*.

Esto se puede deber a que, en el caso de los agujeros, especialmente si están sometidos a cargas perpendiculares a su eje, se genera una tensión circunferencial. Esta tensión es máxima justo en el borde del agujero y disminuye a medida que nos alejamos del mismo.

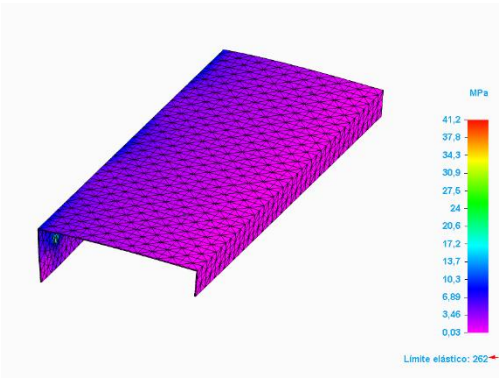


Ilustración 56 → Tensión malla7. Estudio 1

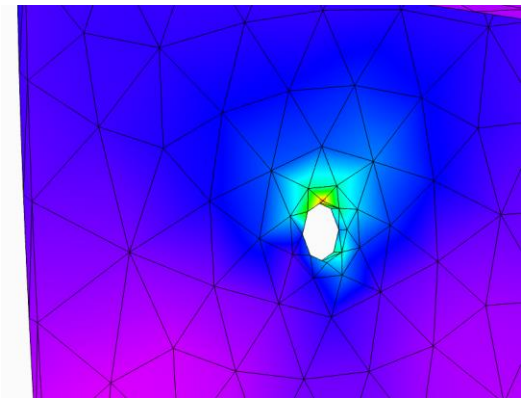


Ilustración 57 → Máx. tensión malla7. Estudio 1

Desplazamiento

La zona con mayor desplazamiento se encuentra en la región más alejada del punto de anclaje, representada en rojo en la simulación. En esta área, la pieza se desplaza 1,45mm.

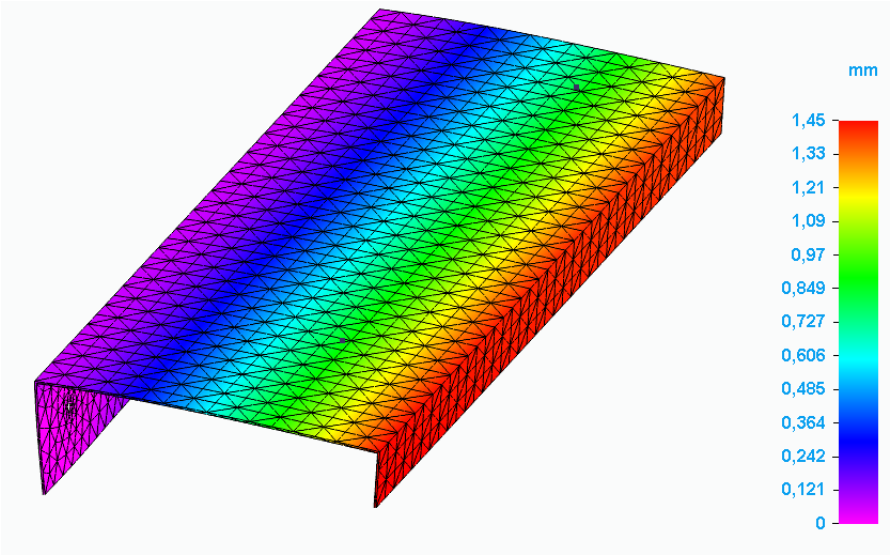


Ilustración 58 → Desplazamiento malla7. Estudio 1

4.1.6. Malla tamaño 10

Para comprobar si el tamaño de malla 7 elegido en el apartado anterior es adecuado y observar si el tamaño de malla altera los resultados, vamos a realizar el estudio de esta misma pieza con la misma carga distribuida, pero con un tamaño de malla más fino.

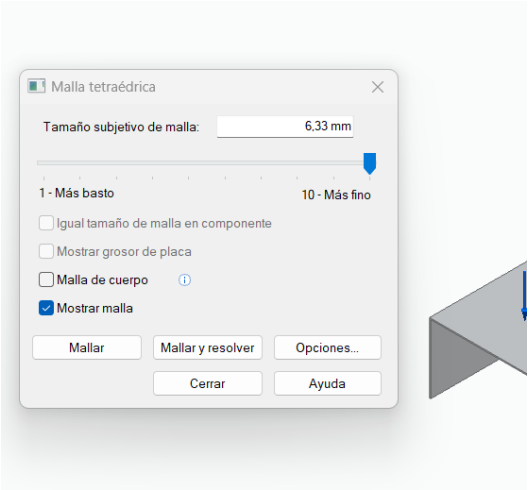


Ilustración 59 → Malla - 10. Estudio 1

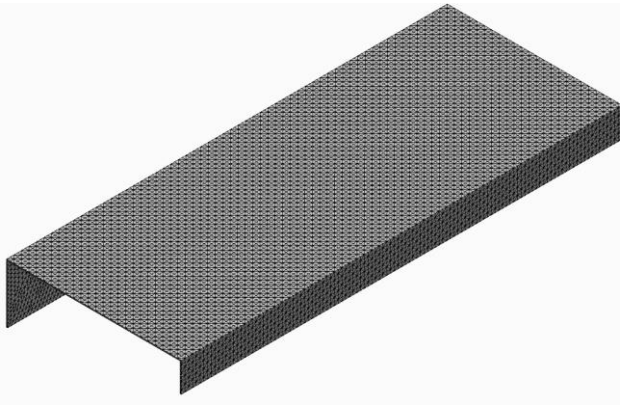


Ilustración 60 → Visualización Malla - 10. Estudio 1

Tensión

Vemos en la *Ilustración 61*, que la máxima tensión ha bajado un poco hasta 39,4 MPa. Siendo está máxima tensión en el mismo punto, ver *Ilustración 57*.

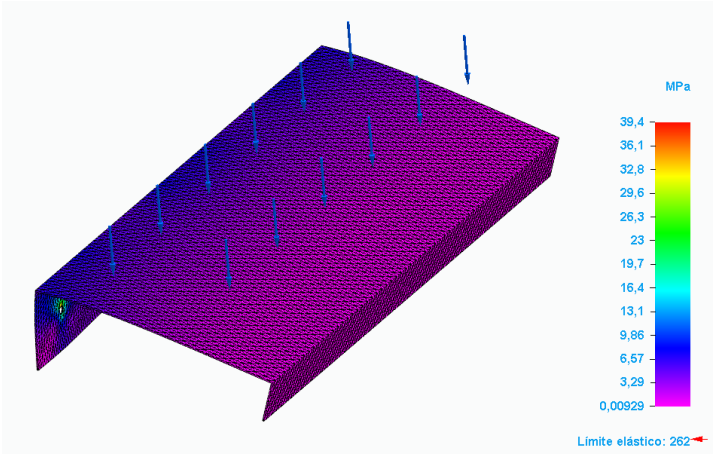


Ilustración 61 → Tensión malla10. Estudio 1

Desplazamiento

El desplazamiento máximo ha subido a 1,79 mm, *Ilustración 62*.

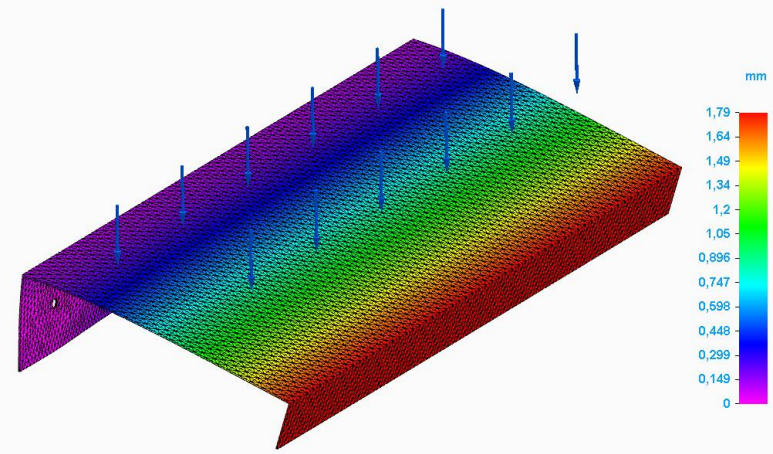


Ilustración 62 → Desplazamiento malla10. Estudio 1

4.1.7. Conclusiones malla

Coherencia en los Resultados

La coherencia en los resultados obtenidos con diferentes tamaños de malla y la tendencia hacia la convergencia son indicadores de que los resultados son razonablemente fiables.

La diferencia pequeña en las tensiones máximas y el comportamiento esperado de los desplazamientos indican que el modelo está bien configurado y que las propiedades del material, las condiciones de contorno y las cargas aplicadas están adecuadamente definidas.

Validación de la Malla

El análisis sugiere que una malla de tamaño 10 proporciona una representación más precisa del comportamiento de la pieza. Sin embargo, dado que la diferencia con la malla de tamaño 7 es pequeña, se puede considerar que la malla de tamaño 7 también ofrece resultados aceptablemente precisos para un análisis preliminar.

Recomendaciones

Para análisis críticos y detallados, se recomienda utilizar la malla más fina (tamaño 10) para garantizar la precisión de los resultados.

Realizar estudios adicionales de convergencia con tamaños de malla intermedios podría proporcionar una confirmación adicional de la fiabilidad de los resultados.

4.1.8. Carga puntual

Vamos a observar cómo se comporta esta misma pieza ante la tensión puntual sobre dos puntos. Primero posicionamos los puntos creando un boceto en la cara donde se aplicarán las fuerzas. Lo ponemos en la misma cara en la que hemos aplicado la carga distribuida en la sección anterior, y distanciamos los puntos aproximándolos a los extremos más alejados de las fijaciones.

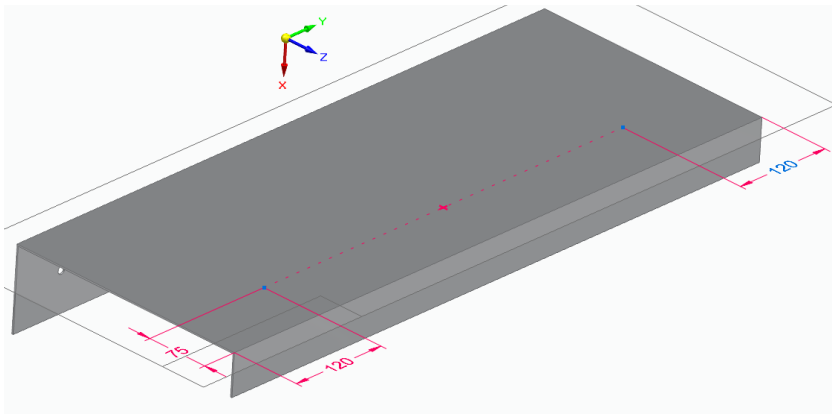


Ilustración 63 → Puntos. Estudio 1

Ponemos una carga puntual de 5N en cada uno de los puntos.

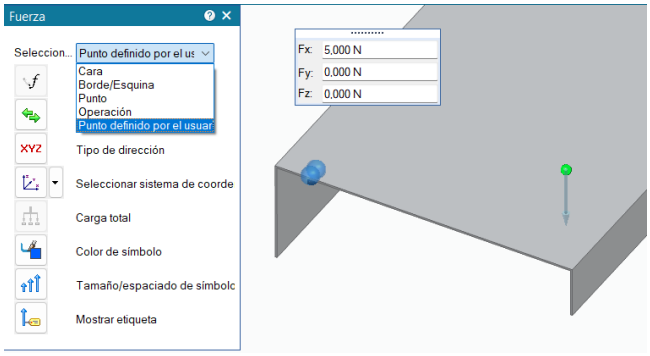


Ilustración 64 → Carga puntual. Estudio 1

Mantenemos la malla de tamaño 10 ya que hemos visto que proporciona unos resultados más fiables. A continuación, suprimimos la carga distribuida de fuerza que habíamos creado anteriormente (20N), para poder analizar los nuevos resultados con la carga puntual de 5N.

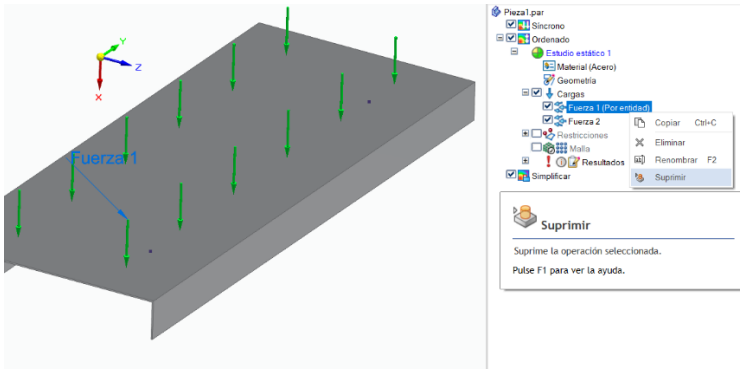


Ilustración 65 → Supresión Carga distribuida

Resultados

Resolvemos y vemos que la tensión máxima es de 59,6MPa (*Ilustración 66*), frente a los 39,4MPa en la carga distribuida. Y el desplazamiento que sufre la pieza en la parte más externa es de 2,83mm (*Ilustración 67*), 1,04mm más de desplazamiento que con la carga distribuida.

Por lo que concluimos que la pieza se comporta mejor ante carga distribuida.

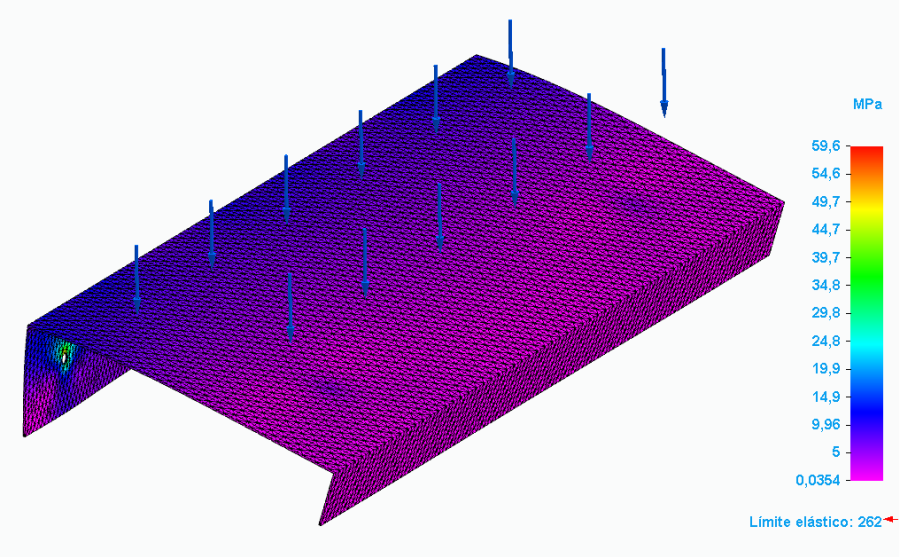


Ilustración 66 → Tensión. Carga puntual

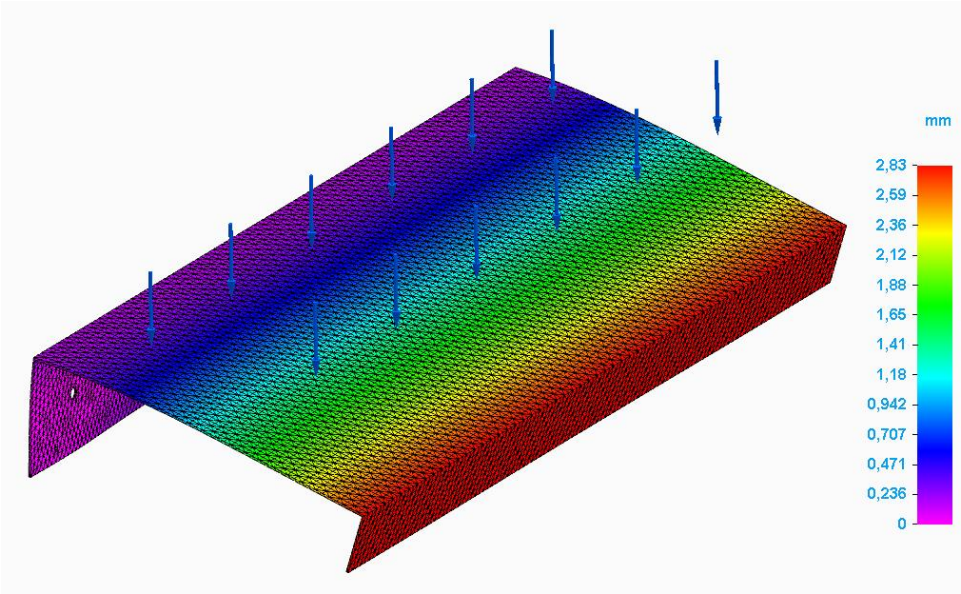


Ilustración 67 → Desplazamiento. Carga puntual

1.1.9. Conclusiones

Tensiones y Desplazamientos con Malla 7

- **Tensión:** La máxima tensión registrada es de 41,2 MPa en los agujeros de los tornillos, muy por debajo del límite elástico de 262 MPa, lo que asegura que no habrá deformación plástica.
- **Desplazamiento:** El desplazamiento máximo es de 1,45 mm, lo que no compromete la integridad estructural de la pieza.

Verificación con Malla de Tamaño 10

- **Tensión:** La tensión máxima disminuye a 39,4 MPa con una malla más fina, confirmando la precisión del análisis.
- **Desplazamiento:** El desplazamiento aumenta a 1,79 mm, indicando mayor precisión sin riesgo estructural.

Carga Puntual

- **Tensión:** Bajo carga puntual, la máxima tensión es de 59,6 MPa, aún segura bajo el límite elástico.
- **Desplazamiento:** El desplazamiento máximo es de 2,83 mm, mayor que con carga distribuida pero aceptable.

Recomendaciones

- **Malla:** Utilizar malla de tamaño 10 para análisis detallados y malla de tamaño 7 para análisis preliminares.
- **Carga:** La pieza se comporta mejor bajo cargas distribuidas que puntuales, sugiriendo el diseño para cargas distribuidas.
- **Validación:** Estudios adicionales de convergencia pueden optimizar precisión y tiempo de cálculo.

En resumen, la pieza es estructuralmente funcional bajo las cargas analizadas, proporcionando una base sólida para estudios más avanzados y optimizaciones de costes.

4.2. Estudio 2: Análisis de Barra de Carga

Para continuar, se realizará un estudio de simulación sobre una barra de carga utilizada en tiendas de ropa. La barra de carga consiste en un tubo horizontal con dos chapas soldadas a los lados, diseñado para engancharse a postes verticales y soportar elementos colgantes.

El estudio analizará el comportamiento de la barra de carga bajo una carga distribuida de 200N a lo largo del tubo. Este peso es el que nos ha indicado cliente que debe soportar el diseño.

Este análisis permitirá entender cómo se comporta la barra de carga bajo las condiciones de uso típicas en un entorno de tienda, proporcionando información crucial para optimizar el diseño y asegurar su resistencia y durabilidad.

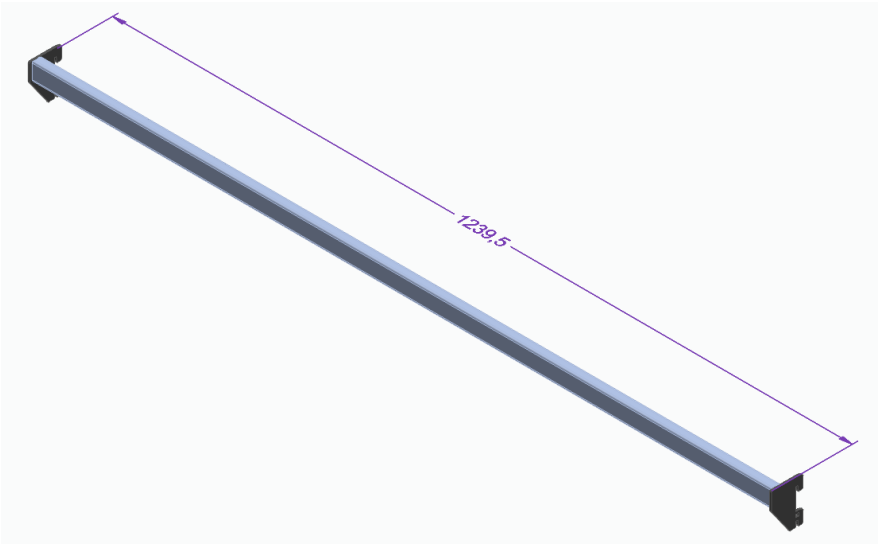


Ilustración 68 → 3D Estudio 2

4.2.1. Carga distribuida

Aplicamos la carga de 200N sobre la cara superior del tubo

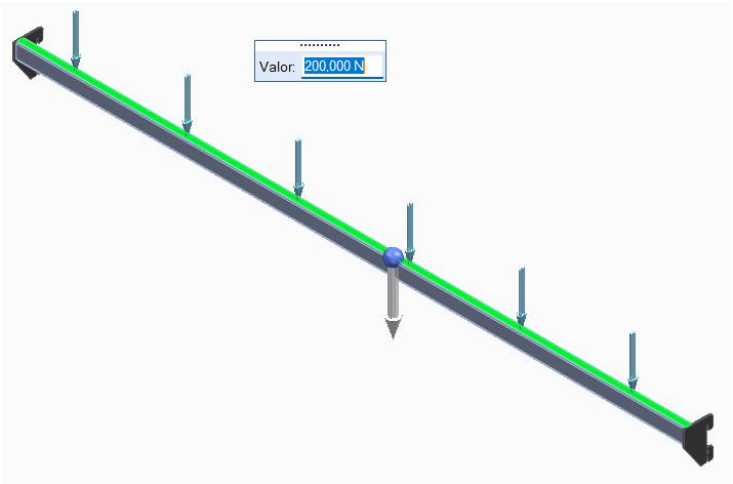


Ilustración 69 → Carga distribuida. Estudio 2

4.2.2. Conectores

Creamos los conectores tipo pegado, simulando la soldadura entre el tubo y las chapas laterales

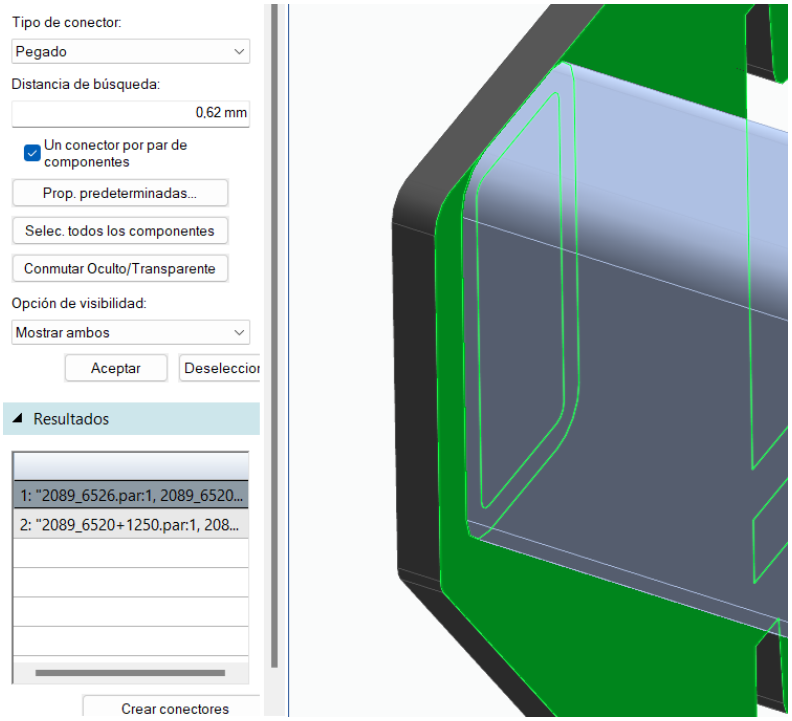


Ilustración 70 → Conectores. Estudio 2

4.2.3. Malla

Creamos la malla ajustando la Escala de Tamaño de Malla a 10, con igual tamaño de malla en componente. Para obtener resultados bastante precisos en todo el diseño. Como se ve en la *Ilustración 72*, el tamaño de malla generado es de un tamaño lo suficientemente pequeño como para obtener resultados bastante precisos, pero tampoco es demasiado pequeño como para que el proceso de mallado sea demasiado largo y costoso. Si viéramos que el proceso tarda mucho tiempo se puede procesas con un tamaño de malla más grande.

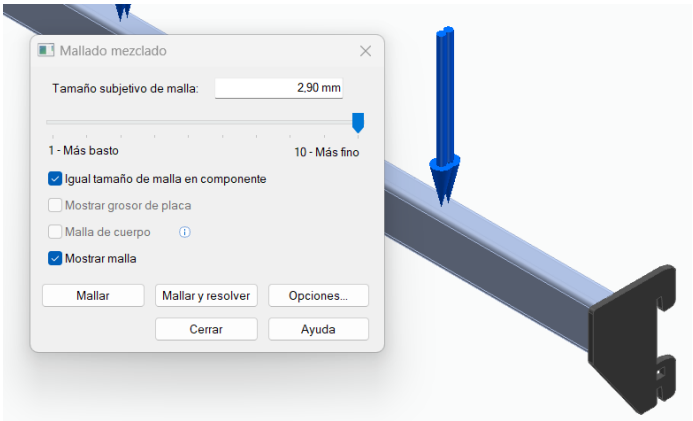


Ilustración 71 → Opciones mallado. Estudio 2

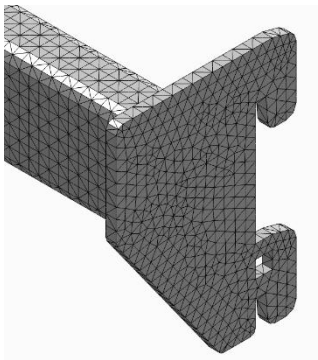


Ilustración 72 → Mallado. Estudio 2

4.2.4. Resultados

Tensión

Resolvemos el estudio, y observando la simulación de la tensión de Von Mises podemos ver que la tensión máxima a la que se ve sometido el tubo es de 186MPa. Siendo la parte del enganche, *Ilustración 74*, la que sufre una mayor tensión. Esto se puede deber a que el diseño en esa arista del enganche no tiene un redondeamiento. Aún así la máxima tensión en ese punto es de 186MPa, por lo que no debería de suponer un problema en cuanto al diseño estructural. Pero se recomendaría redondear esa arista para que no se acumule tanta tensión en ese punto.

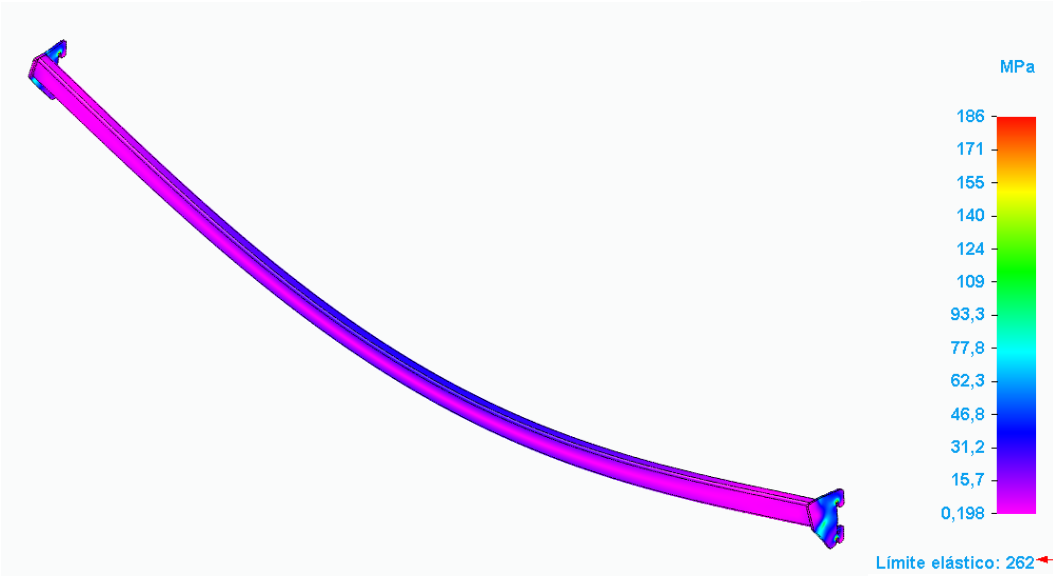


Ilustración 73 → Tensión. Estudio 2

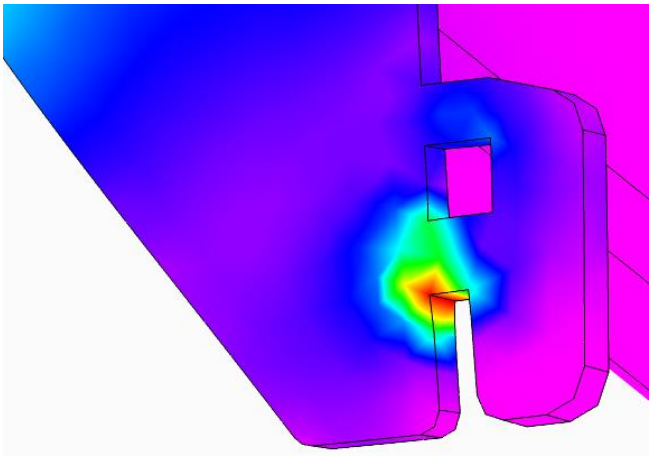


Ilustración 74 → Máx. Tensión. Estudio 2

Desplazamiento

Cambiamos a la simulación del desplazamiento para ver la deformación máxima que sufren los componentes, y observamos que el punto más crítico es el de la parte central del tubo, donde se desplaza 1,25mm. Como la tensión en ese punto era de unos 20MPa, bastante inferior al límite elástico del material (262MPa), la deformación que va a sufrir el material es una deformación elástica y por tanto el diseño de nuestra barra de carga es perfectamente válida para la carga que quieren poner.

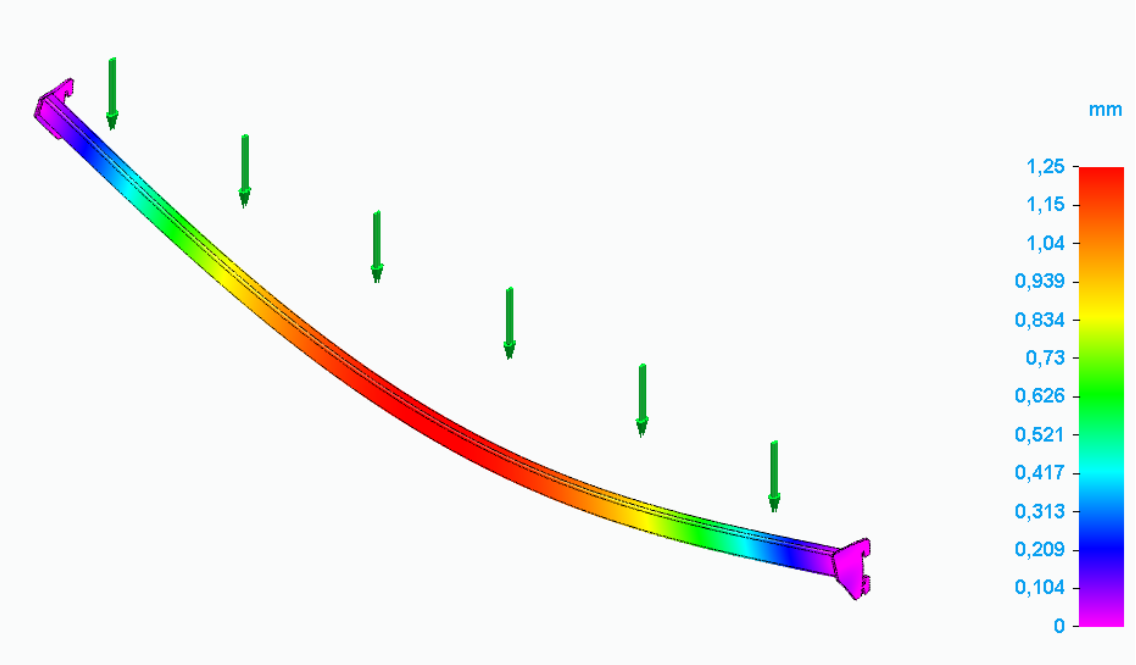


Ilustración 75 → Desplazamiento. Estudio 2

4.2.5. Conclusiones

El análisis de la barra de carga utilizada en tiendas de ropa, bajo una carga distribuida de 200N, ha demostrado los siguientes puntos clave:

- **Funcionamiento Estructural**

El diseño estructural de la barra de carga es funcional y capaz de soportar la carga especificada sin comprometer su integridad.

- **Tensiones Máximas:**

La tensión máxima registrada fue de 186 MPa, localizada en la arista del enganche. Aunque este punto sufre una mayor concentración de tensiones, la tensión se encuentra por debajo del límite elástico del material (262 MPa).

- **Factor de Seguridad:**

Con una tensión máxima de 186 MPa y un límite elástico de 262 MPa, el diseño presenta un factor de seguridad de aproximadamente 1,4. Esto indica que la barra puede soportar la carga. Pero como hemos comentado en el apartado *3.3.4. Factor de seguridad*, hemos marcado como límite de factor de seguridad 1,5 para poder garantizar la seguridad del diseño.

En consonancia, este diseño no sería seguro y habría que realizar un cambio de diseño en su estructura para poder garantizar su fiabilidad. Para poder aumentar el factor de seguridad se propondría cambiar el material a uno con mayor limite elástico o cambiar el diseño, por ejemplo, redondear la esquina del enganche para distribuir las tensiones acumuladas y que por tanto el factor de seguridad aumente.

- **Desplazamientos:**

El desplazamiento máximo registrado en la parte central del tubo fue de 1,26mm. La tensión en este punto fue de 20 MPa, lo que confirma que la deformación es elástica y no permanente.

- **Recomendaciones:**

Se recomienda redondear la arista del enganche, aumentar el espesor de la chapa o cambiar el material a uno con mayor limite elástico para reducir las concentraciones de tensión y mejorar la durabilidad del diseño.

4.3. Estudio 3: Análisis Monorail ajustable

En este estudio, se realizará un análisis de simulación sobre el diseño de una estructura denominada 'Monorail', hecha de tubos de sección circular y utilizada para almacenar prendas de ropa. El peso del conjunto es de 7,426Kg. Este análisis tiene como objetivo evaluar la integridad estructural del Monorail bajo una carga de 200N, proporcionando una base para comparar el diseño actual con una versión optimizada y de menor coste. Esto nos permitirá determinar si el nuevo diseño puede mantener su funcionalidad y resistencia habiendo hecho una reducción en los costos.

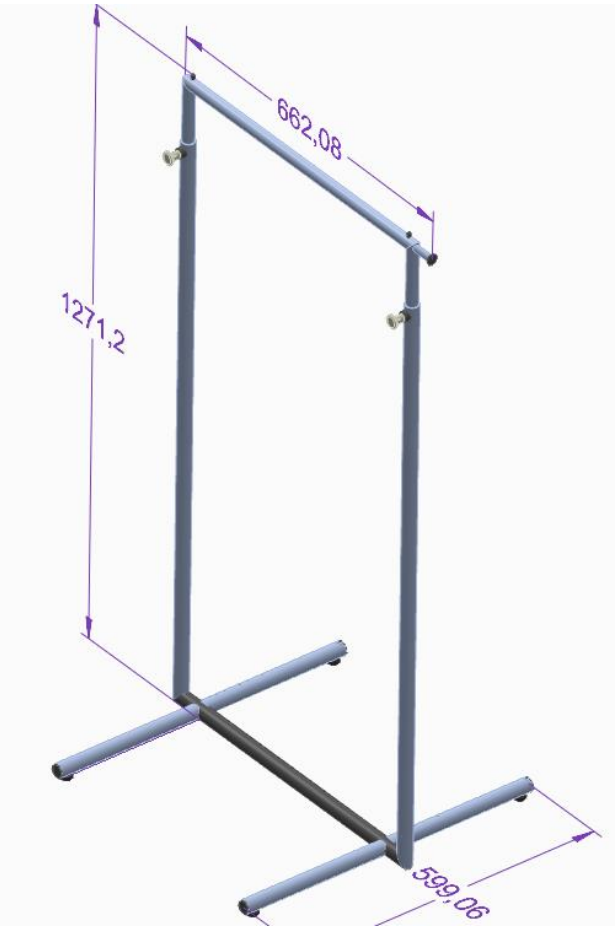


Ilustración 76 → 3D Estudio 3

4.3.1. Carga distribuida

Aplicamos la carga de 200N sobre la cara superior del tubo

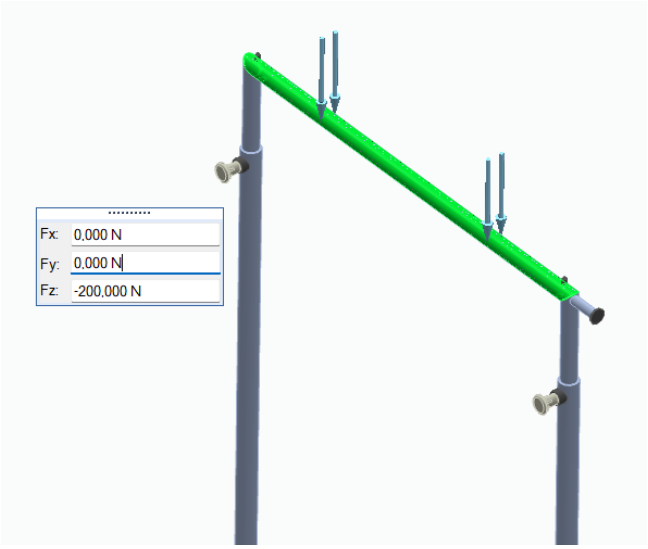


Ilustración 77 → Carga distribuida. Estudio 3

4.3.2. Fijaciones

Creamos las fijaciones en las bases de las patas de la estructura del Monorail

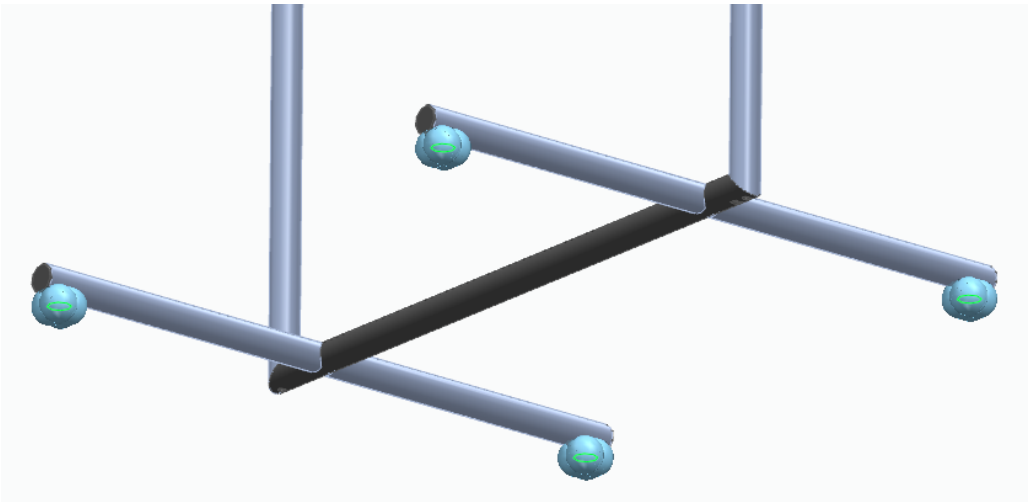


Ilustración 78 → Fijaciones. Estudio 3

4.3.3. Malla

Creamos la malla ajustando la Escala de Tamaño de Malla en el punto 3. Al ser un diseño bastante grande, elegimos un tamaño que no sea excesivamente pequeño para no hacer la malla demasiado pesada y que no nos de problemas cuando resolvamos los resultados.

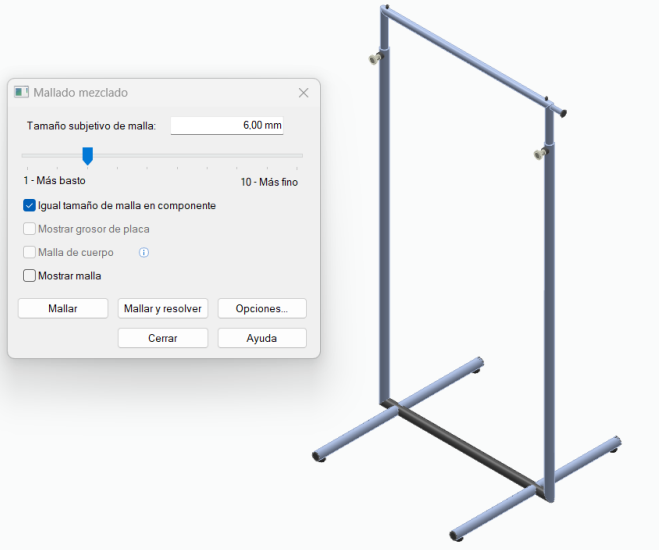


Ilustración 80 → Opciones mallado. Estudio 3

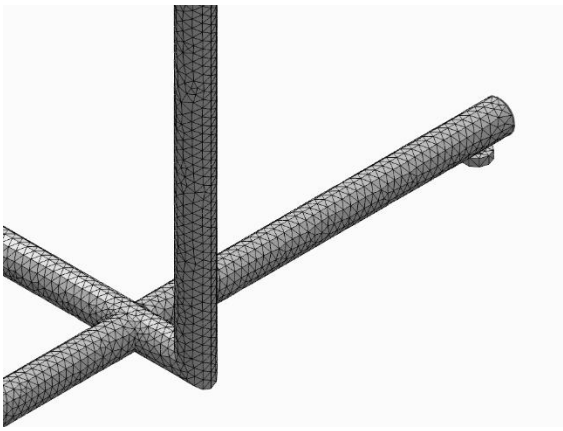


Ilustración 79 → Mallado. Estudio 3

4.3.4. Resultados

Tensión

Resolvemos el estudio, y observando la simulación de la tensión de Von Mises podemos ver que la tensión a la que se ve sometida la estructura es bastante baja, teniendo los valores más altos de 40,9 MPa en la unión de la base, *Ilustración 82*. Por lo que la estructura no se ve sometida a una tensión muy elevada. Esto nos permitirá tener más margen a la hora de hacer un nuevo diseño en la reducción de costes.

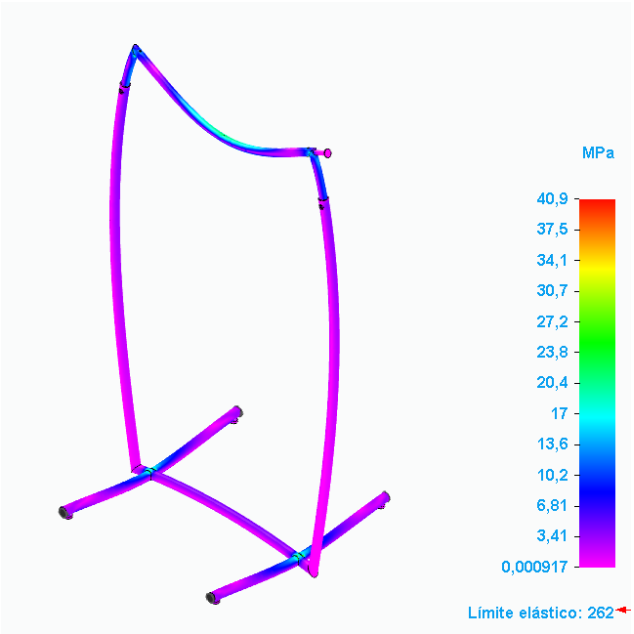


Ilustración 81 → Tensión. Estudio 3

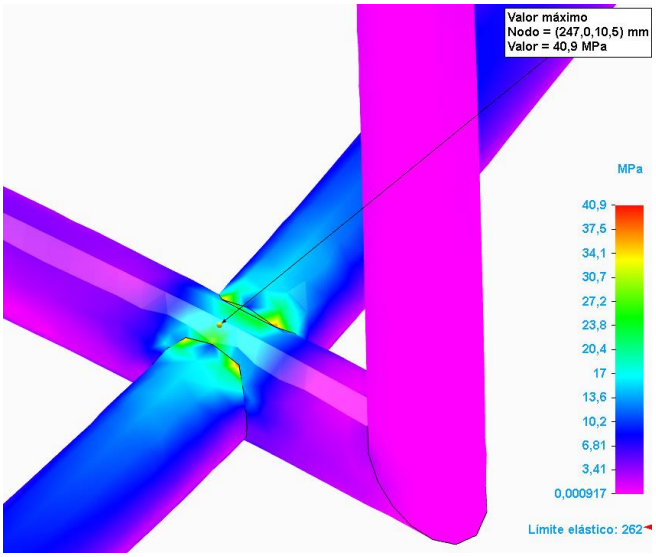


Ilustración 82 → Máx. Tensión. Estudio 3

Desplazamiento

Analizando la simulación de desplazamiento vemos que el desplazamiento más elevado es de 0,494mm. La estructura es bastante estable y no sufre apenas ninguna deformación elástica.

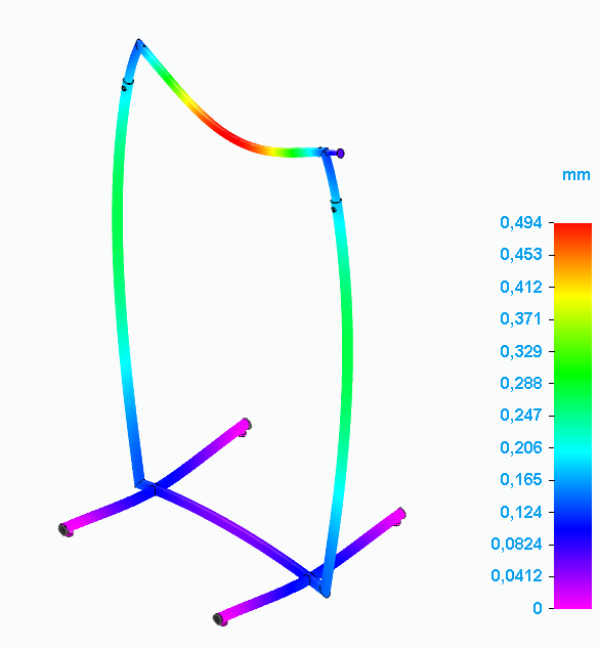


Ilustración 83 → Desplazamiento. Estudio 3

4.3.5. Conclusiones

El análisis de simulación del Monorail ajustable, utilizado para almacenar prendas de ropa bajo una carga de 200N, ha revelado los siguientes puntos clave:

- **Funcionamiento Estructural:**

El diseño estructural del Monorail es funcional y capaz de soportar la carga especificada sin comprometer su integridad.

- **Tensiones Máximas:**

La tensión máxima registrada fue de 40,9 MPa, localizada en la unión de la base. Esta tensión está significativamente por debajo del límite elástico del material, indicando que la estructura no se ve sometida a tensiones elevadas y tiene un margen de seguridad considerable.

- **Factor de Seguridad:**

Con una tensión máxima de 40,9 MPa y considerando que el límite elástico del material es 262MPa, el diseño presenta un factor de seguridad elevado (mayor a 6), lo que sugiere que hay un amplio margen para reducir costos sin comprometer la seguridad estructural.

- **Desplazamientos:**

El desplazamiento máximo registrado fue de 0,494 mm, indicando que la estructura es bastante estable y sufre deformaciones mínimas bajo la carga aplicada.

- **Recomendaciones:**

Los resultados muestran que la estructura actual tiene tensiones bajas y desplazamientos mínimos, lo cual proporciona una buena base para optimizar el diseño. Se recomienda proceder con la reducción de costos manteniendo las propiedades estructurales adecuadas.

En resumen, el diseño del Monorail ajustable es estructuralmente adecuado y funcional, con un factor de seguridad elevado y sin riesgos significativos de deformaciones permanentes bajo la carga especificada. Esto sugiere que hay un potencial considerable para reducir costos sin comprometer la integridad estructural del Monorail.

4.4. Estudio 4: Mesa de apoyo

En este estudio, se realizará un análisis de simulación sobre el diseño de una estructura de mesa, con unas patas de tubo sección cuadrada, unas escuadras como unión y una chapa de refuerzo longitudinalmente sobre el centro de la encimera de espesor 25mm en melamina. Las dimensiones generales de la mesa son 1700x900x750 y el peso es de 35,361Kg. Este análisis tiene como objetivo evaluar la integridad estructural de la mesa bajo una carga de 1000N (carga máxima a la que está previsto su uso). Según los resultados obtenidos se propondrá un nuevo diseño con reducción de costes. Esto nos permitirá determinar si el nuevo diseño puede mantener su funcionalidad y resistencia habiendo hecho una reducción en los costos.

Ilustración 84 → 3D Estudio 4

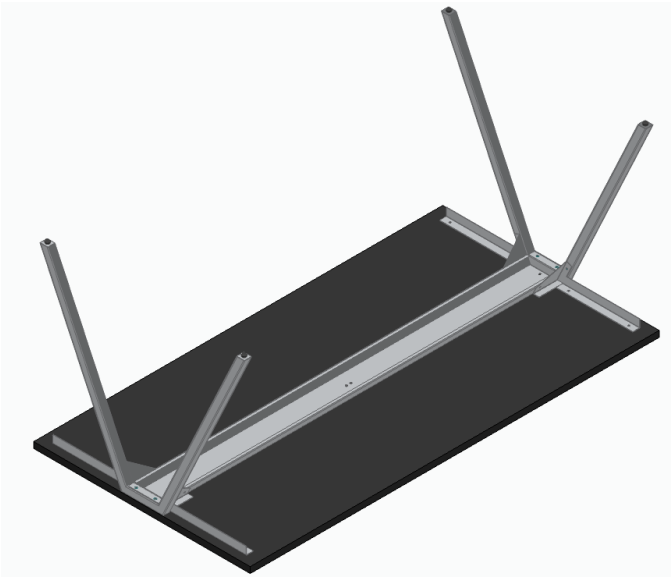


Ilustración 85 → 3D - 2. Estudio 4

4.4.1. Carga distribuida

Aplicamos la carga distribuida de 1000N sobre toda la encimera.

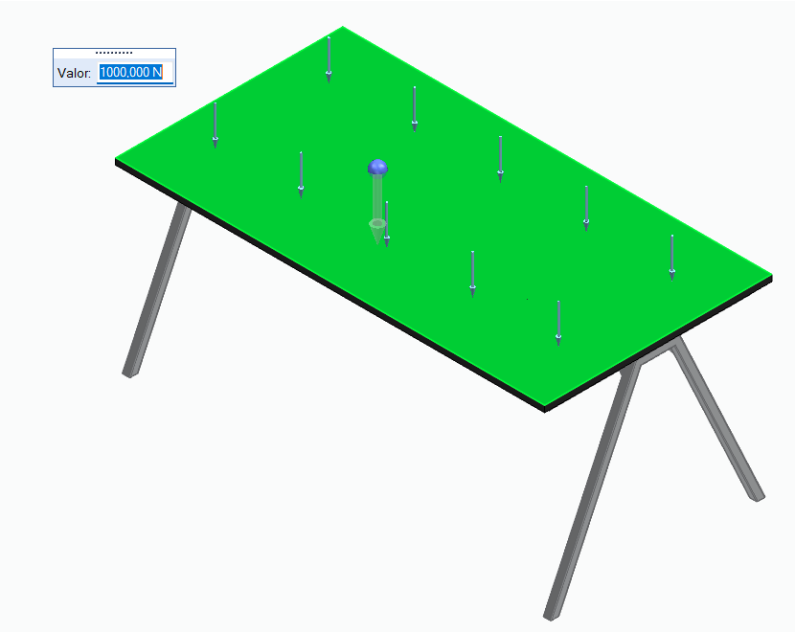


Ilustración 86 → Carga distribuida. Estudio 4

4.4.2. Fijaciones

Aplicamos las fijaciones en las patas de la mesa, ya que son el punto de apoyo fijo.

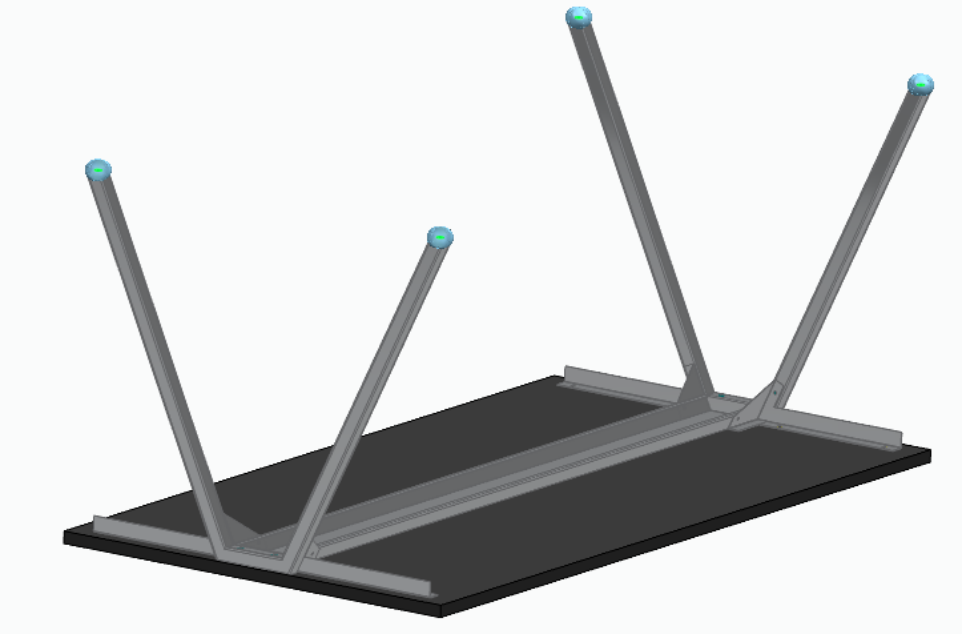


Ilustración 87 → Fijaciones. Estudio 4

4.4.3. Malla

Creamos la malla ajustando la Escala de Tamaño de Malla en el punto 6, ya que con tamaños de malla más finos la malla suponía demasiado peso para el programa y no lograba resolver los análisis.

Como podemos ver en la *Ilustración 89*, el mallado ha quedado más fino en las partes más críticas, como pueden ser los agujeros para las uniones atornilladas, o las zonas con más pliegues. Por lo que conseguiremos unos resultados más precisos.

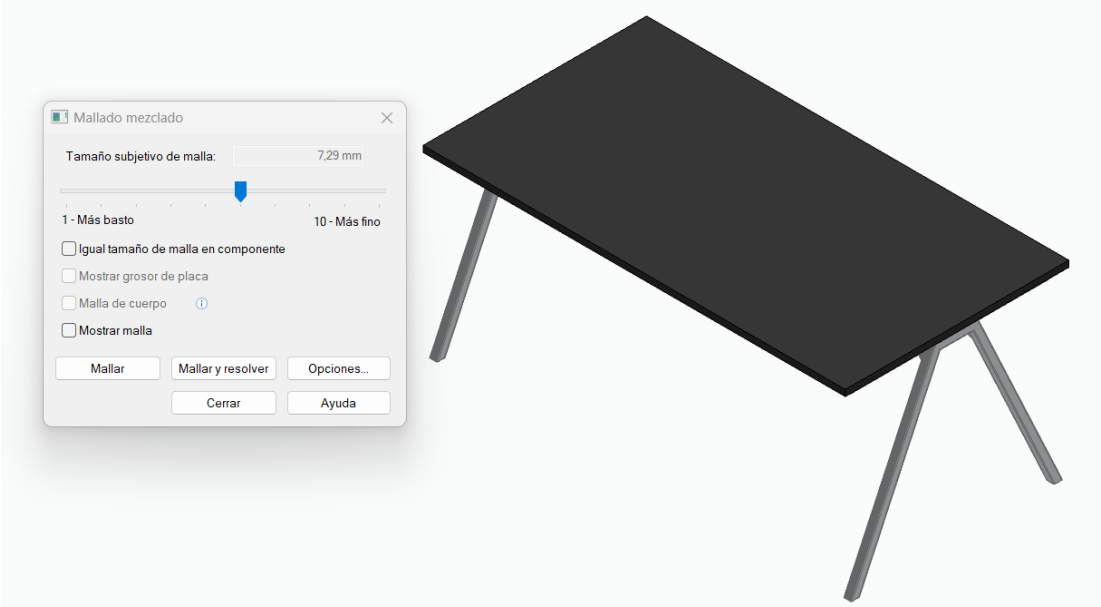


Ilustración 88 → Opciones mallado. Estudio 4

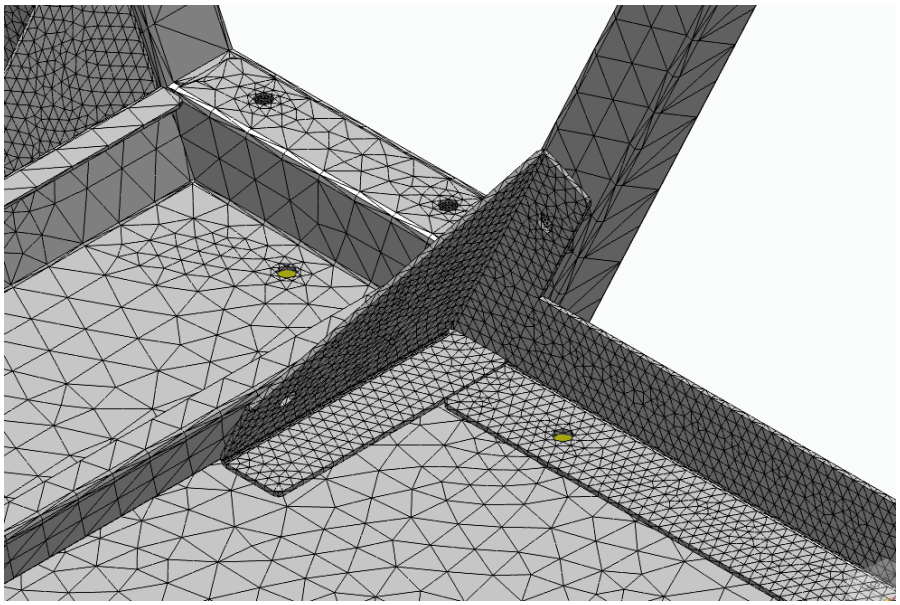


Ilustración 89 → Mallado. Estudio 4

4.4.4. Resultados

Tensión

Resolvemos el estudio, y observando la simulación de la tensión de Von Mises vemos que la tensión máxima a la que se ve sometido el diseño es de 118MPa, *Ilustración 91*. Siendo el punto más crítico en la base de las patas.

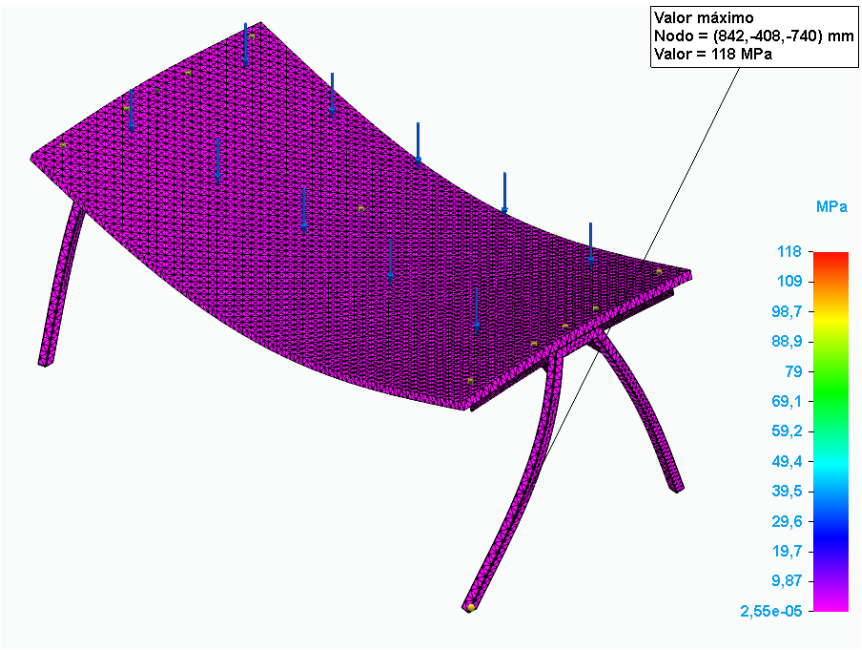


Ilustración 91 → Tensión. Estudio 4

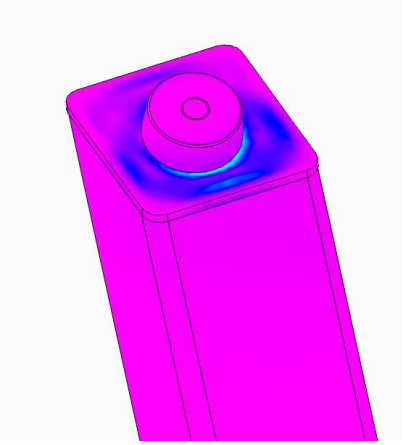


Ilustración 90 → Máx. tensión. Estudio 4

Desplazamiento

Analizando la simulación de desplazamiento vemos en el gráfico derecho que el valor más alto de desplazamiento es 0,159mm. El cual se da en la parte media de encimera

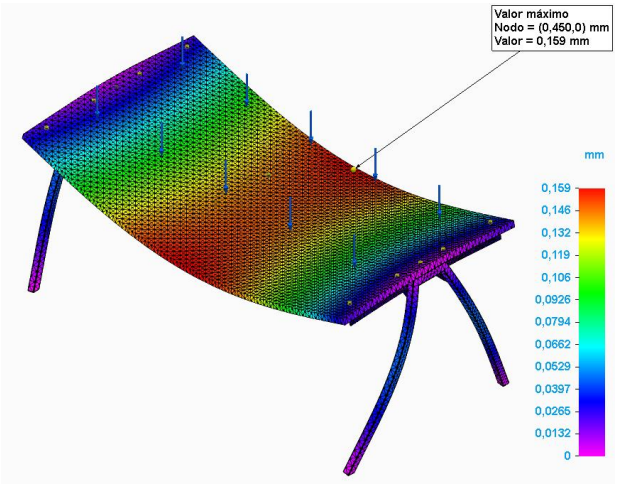


Ilustración 92 → Desplazamiento. Estudio 4

4.4.5. Carga puntual

A continuación, vamos a analizar uno de los usos críticos a los que se podría ver sometida la mesa, donde la encimera soporta una carga puntual en la zona media, simulando el peso de una persona sentada o apoyada gran parte del peso ahí (800N).

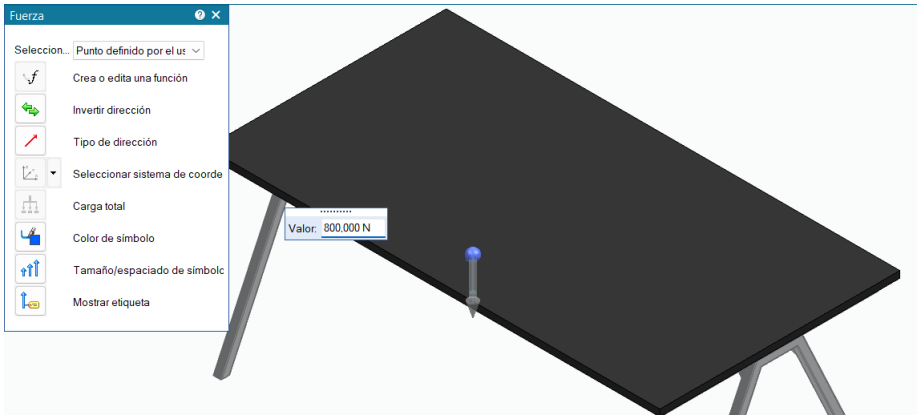


Ilustración 93 → Carga puntual. Estudio 4

Resultados

Observamos que la tensión máxima ha aumentado a 359 MPa. Esto se debe a que al soportar el peso en un solo lado, las patas delanteras son las que están soportando la mayor carga, resultando en una mayor tensión en estos puntos críticos.

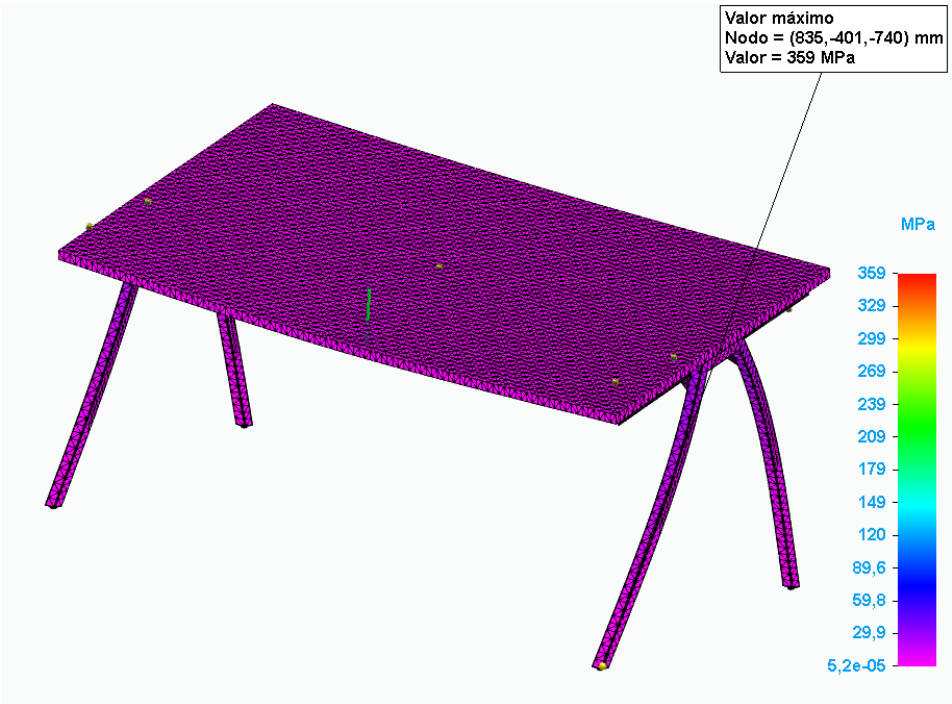


Ilustración 94 → Tensión carga puntual. Estudio 4

En cuanto al desplazamiento (*Ilustración 92*), ha aumentado a 1,09mm. Sin embargo, sigue siendo un desplazamiento leve y se mantiene dentro de los límites requeridos por el cliente.

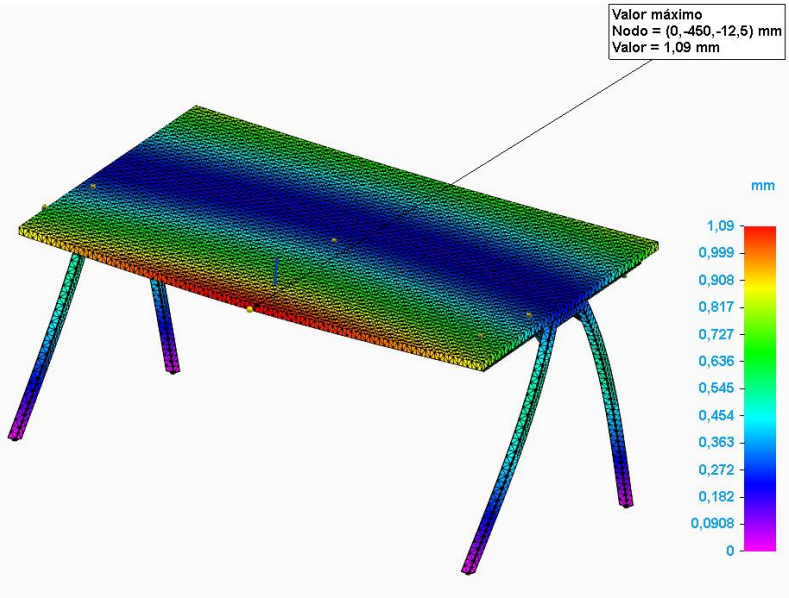


Ilustración 95 → Desplazamiento carga puntual. Estudio 4

4.4.6. Conclusiones

El análisis de la mesa de apoyo ha revelado lo siguiente bajo diferentes condiciones de carga:

Carga Distribuida

- **Tensión Máxima**: 118 MPa, localizada en la base de las patas, bien por debajo del límite de elasticidad del material (262 MPa).
- **Desplazamiento Máximo**: 0,159 mm en la parte media de la encimera, asegurando estabilidad y funcionalidad.

Carga Puntual

- **Tensión Máxima**: 359 MPa en las patas delanteras, superando el límite de elasticidad y indicando riesgo de deformación plástica.
- **Desplazamiento Máximo**: 1,09 mm, aceptable y dentro de los límites especificados por el cliente.

Conclusiones Generales

- **Bajo Carga Distribuida**: El diseño es estructuralmente fiable y estable, con tensiones y desplazamientos dentro de límites aceptables, permitiendo considerar la reducción de espesores para ahorrar costos.
- **Bajo Carga Puntual**: Las tensiones elevadas en puntos críticos requieren refuerzo o materiales más resistentes para evitar deformaciones plásticas.

Recomendaciones: Optimizar el diseño para reducir costos manteniendo la integridad estructural y la seguridad bajo todas las condiciones de uso.

5. OPTIMIZACIÓN DE COSTES

A continuación, tras lo analizado en los estudios del apartado *4. DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO*, vamos a realizar cambios de diseño con reducción de costes (RdC) en los modelos: *4.3. Estudio 3: Análisis Monorail ajustable* y *4.4 Estudio 4: Mesa de apoyo.*

5.1. RdC Monorail

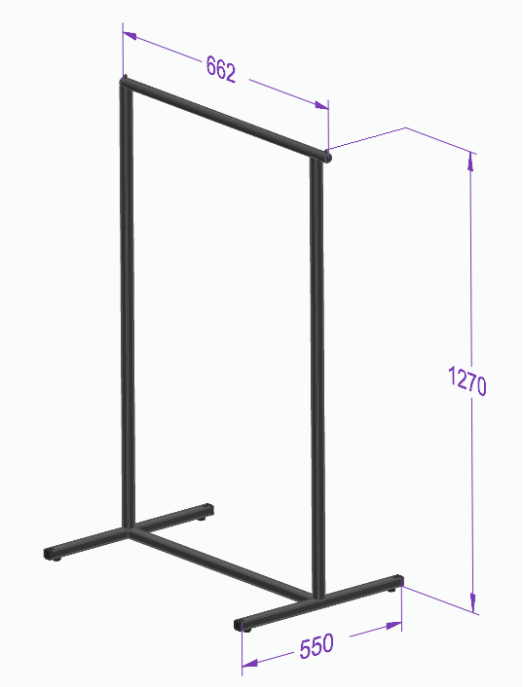


Ilustración 96 → 3D RdC monorail

5.1.1. Cambios

Para la reducción de costes del monorail, se han implementado varios cambios:

- **Cambio en la Materia Prima:** Se ha sustituido el tubo de acero con sección circular de 25 mm de diámetro y 2 mm de espesor por un tubo de sección cuadrada de 25x25 mm y 1,5 mm de espesor. Este cambio no solo simplifica el diseño gracias a la forma cuadrada del tubo, sino que también reduce los costes del material al disminuir el espesor. Con estos cambios hemos conseguido disminuir el peso del conjunto de 7,426Kg a 3,981Kg.
- **Simplificación del Diseño:** Se ha eliminado la opción de ajustar la altura del monorail. Esta simplificación reduce significativamente la cantidad de material necesario y simplifica el proceso de fabricación.
- **Reducción de la Base:** La base del monorail se ha reducido levemente de 600 mm a 550 mm. Esta reducción contribuye a disminuir el uso de material sin comprometer la estabilidad del diseño.

5.1.2. Carga distribuida

Aplicamos la misma carga que en el apartado, *4.3.1. Carga distribuida*, ya que era la carga máxima que meterá el cliente en este mueble. Y así podremos comparar los resultados antes y después de la reducción de costes.

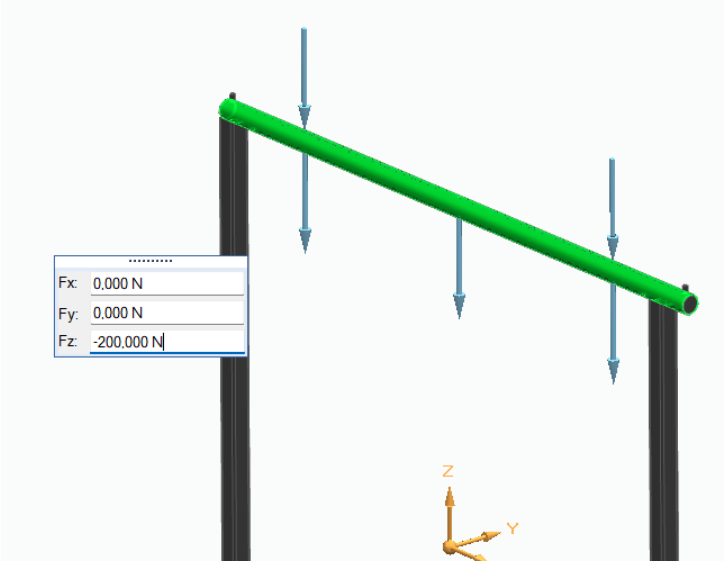


Ilustración 97 → Carga distribuida. RdC monorail

5.1.3. Conectores

Realizamos los conectores con el Auto, como normalmente, pero al haber reducido el espesor del material vemos que no nos crea conexiones entre el lateral del tubo vertical y el tubo horizontal. Por lo que esas conexiones las hacemos a mano mediante conexión por bordes, *Ilustración 98*.

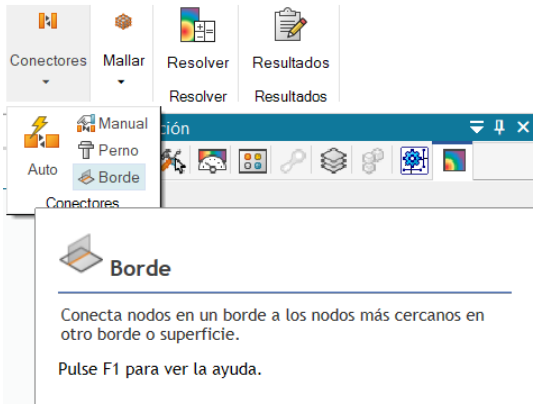


Ilustración 98 → Borde. RdC monorail

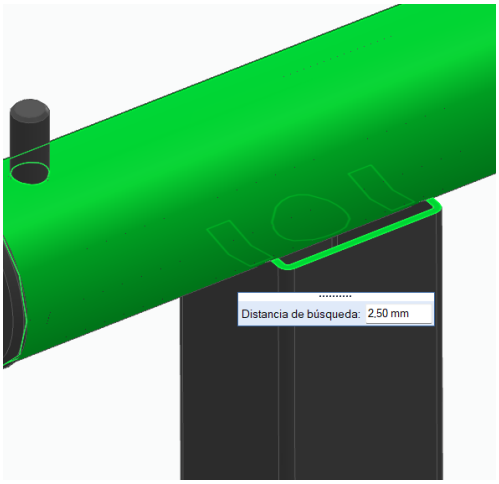


Ilustración 99 → Conector de borde. RdC monorail

5.1.4. Resultados

Tensión

Al resolver el estudio del nuevo monorail, podemos observar que la máxima tensión es 91,2MPa. Por lo que ha aumentado respecto al anterior diseño de monorail, pero sigue estando por debajo del límite elástico. El factor de seguridad en el punto más crítico es de 2,87, por lo que podemos garantizar su correcto funcionamiento.

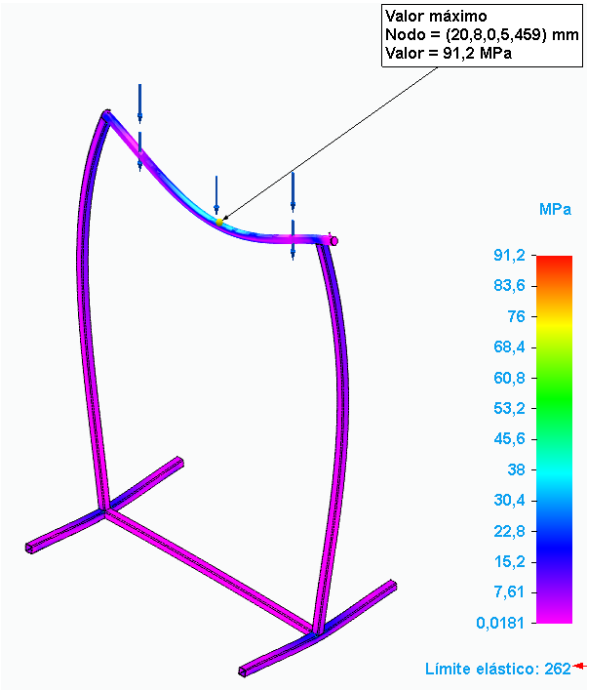


Ilustración 100 → Tensión. RdC monorail

Desplazamiento

En cuanto al desplazamiento también vemos un aumento en cuanto a la deformación elástica que sufre la estructura. Siendo ahora el valor máximo de 1,05 mm.

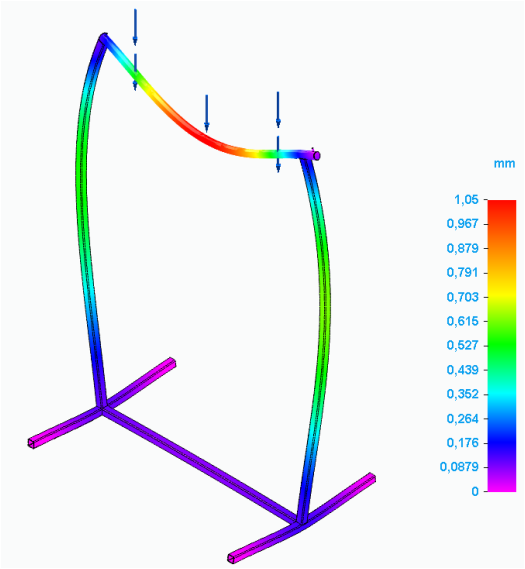


Ilustración 101 → Desplazamiento. RdC monorail

5.1.5. Comparación

En este apartado se va a mostrar una comparación gráfica de los resultados entre el monorail del apartado *4.3. Estudio 3: Análisis Monorail ajustable,* y el de la reducción de costes.

Tensión

Podemos apreciar que la tensión máxima ha aumentado, y la distribución de tensiones a lo largo de la estructura se ha mantenido bastante, con la diferencia de que en la unión de las patas ahora se acumula menos tensión gracias al cambio de diseño.

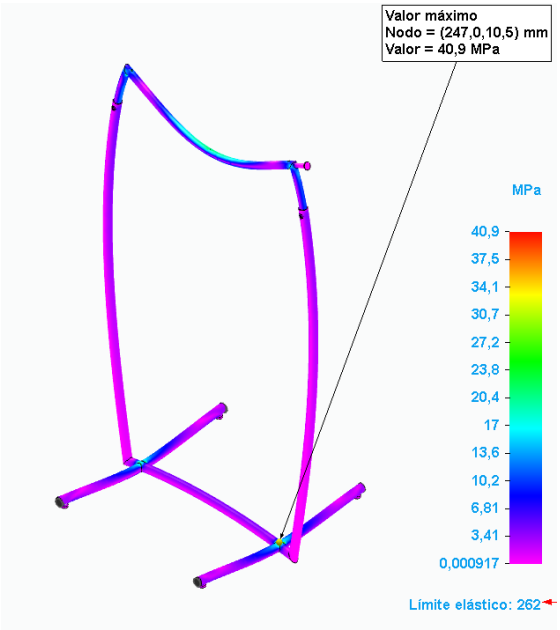


Ilustración 103 → Tensión monorail V1

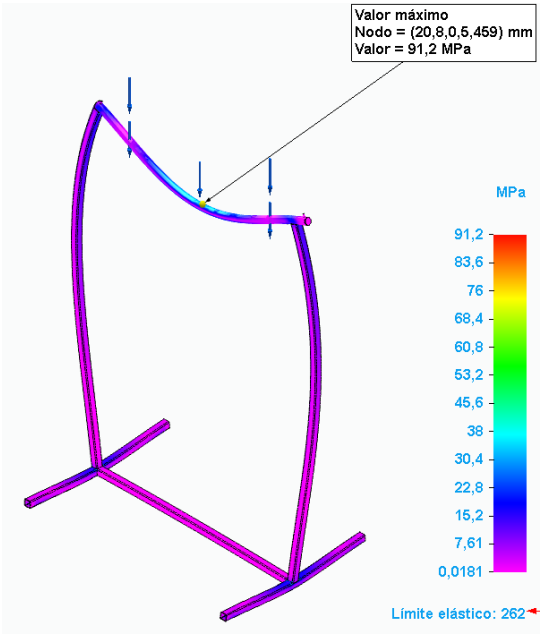


Ilustración 102 → Tensión monorail V2

Desplazamiento

La diferencia en la deformación antes y después de la reducción de costes es notable en proporción, ya que ha multiplicado la distancia de desplazamiento en los puntos críticos. Aún así la deformación como ya hemos visto es elástica por lo que la estructura no corre peligro.

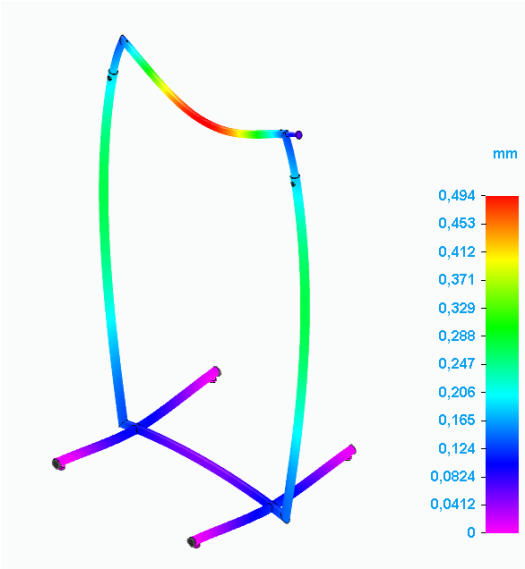


Ilustración 105 → Desplazamiento monorail V1

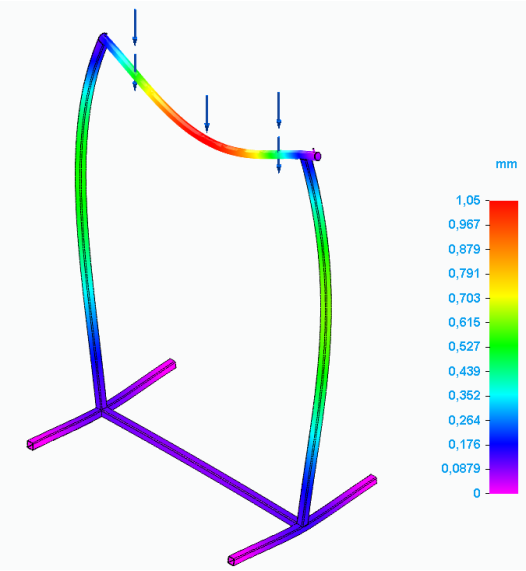


Ilustración 104 → Desplazamiento monorail V2

5.1.6. Conclusiones

El análisis del nuevo diseño del Monorail, tras aplicar las medidas de reducción de costes, ha revelado resultados positivos que indican que los cambios implementados no han afectado la fiabilidad ni la integridad estructural del diseño. Las principales conclusiones son:

- **Cambios Implementados**:
  - Se ha cambiado el material del tubo de sección circular a un tubo de sección cuadrada, reduciendo el espesor de 2 mm a 1,5 mm.
  - Se ha simplificado el diseño eliminando la opción de ajuste de altura, reduciendo la cantidad de material necesario.
  - La base se ha reducido de 600 mm a 550 mm, disminuyendo el uso de material sin comprometer la estabilidad.
- **Resultados del Análisis de Carga Distribuida**:
  - **Tensión Máxima**: 91,2 MPa. Aunque ha aumentado en comparación con el diseño original, sigue estando por debajo del límite elástico del material (262 MPa), asegurando un factor de seguridad mayor a 2,5.
  - **Desplazamiento Máximo**: 1,05 mm, indicando un ligero aumento en la deformación elástica, pero permaneciendo dentro de límites aceptables y sin comprometer la funcionalidad estructural.

Conclusiones Generales

- **Fiabilidad Estructural**: A pesar de los cambios y la reducción de costes, el Monorail mantiene su integridad estructural, con tensiones y desplazamientos dentro de los límites seguros.
- **Optimización de Costes**: Los cambios realizados han resultado en una reducción efectiva de los costes de fabricación sin afectar negativamente el rendimiento estructural del diseño.

En resumen, el nuevo diseño optimizado del Monorail es funcional y fiable, ofreciendo una solución más económica sin comprometer la seguridad ni la eficiencia estructural.

5.2. RdC Mesa

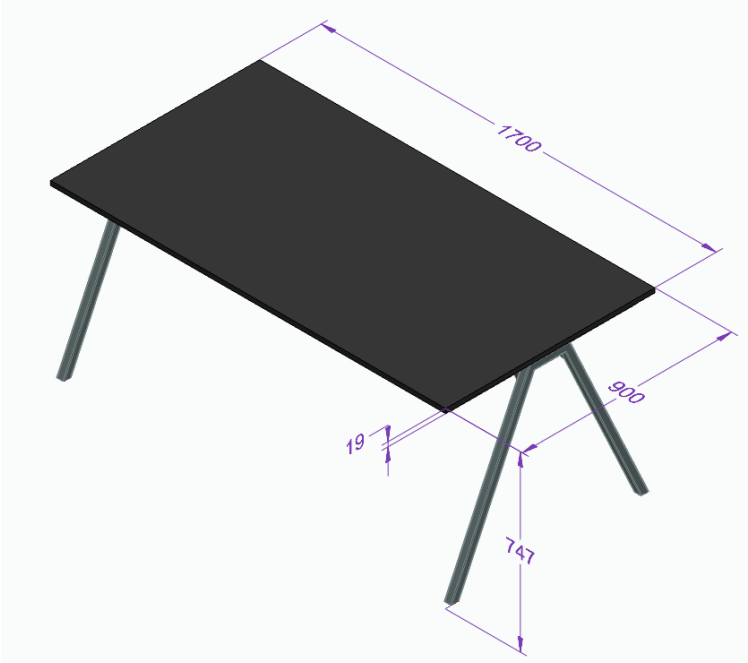


Ilustración 106 → 3D RdC mesa

5.2.1. Cambios

Para la reducción de costes de la mesa de apoyo, se han implementado varios cambios significativos:

- **Reducción del Espesor de la Encimera**: Se ha reducido el espesor de la encimera de melamina de 25 mm a 19mm. Esta reducción no solo disminuye la cantidad de material necesario, sino que también contribuye a la reducción del peso total de la mesa, facilitando su manejo y transporte. Con el cambio del espesor también hemos reducido el peso del conjunto pasando de 35,361Kg a 29,671Kg.

- **Modificación de los Niveladores de las Patas**: Se ha eliminado el uso de niveladores en las patas, donde previamente se acumulaba mucha tensión. Ahora, las patas se apoyan directamente sobre los tubos, *Ilustración 107*, a los cuales se les colocarán fieltros para evitar daños en el suelo y proporcionar estabilidad. Este cambio simplifica el diseño y reduce los costes asociados con la fabricación y el ensamblaje de los niveladores.

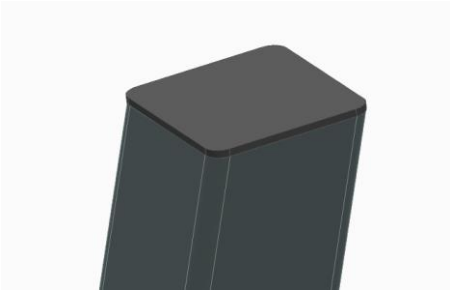


Ilustración 107 → Cambio en patas

5.2.2. Carga distribuida

Aplicamos la misma carga que en el apartado, *4.4.1. Carga distribuida*, ya que era la carga máxima que meterá el cliente en este mueble. Y así podremos comparar los resultados antes y después de la reducción de costes.

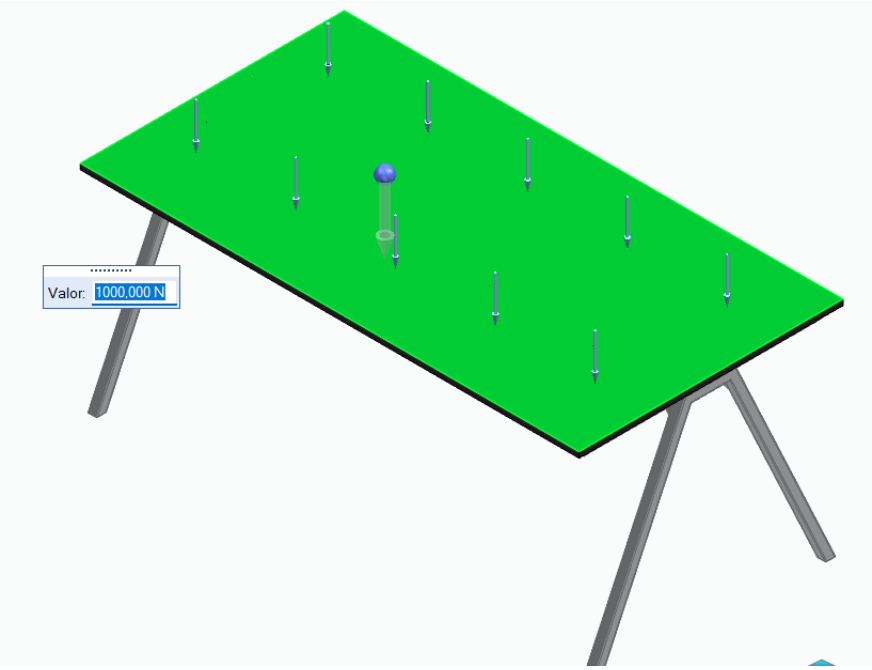


Ilustración 108 → Carga distribuida. RdC mesa

Resultados

- Tensión: Vemos que la tensión máxima es solo de 17,7 MPa. Por lo que se ha visto reducido en gran medida gracias al cambio realizado en el apoyo de las patas.

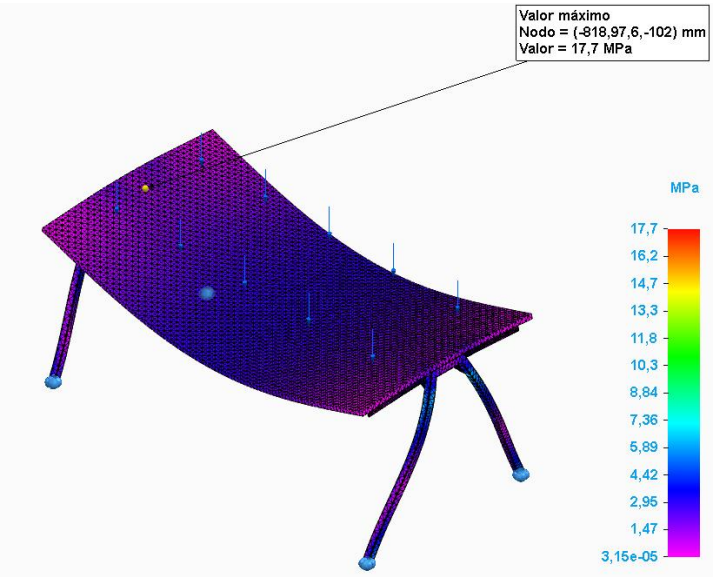


Ilustración 109 → Tensión. RdC mesa

- Desplazamiento: La deformación elástica si que se ha visto aumentada (0,291mm), ya que el espesor de la encimera ahora es de 19mm, pero igualmente es un valor muy bajo que no compromete el diseño estructural.

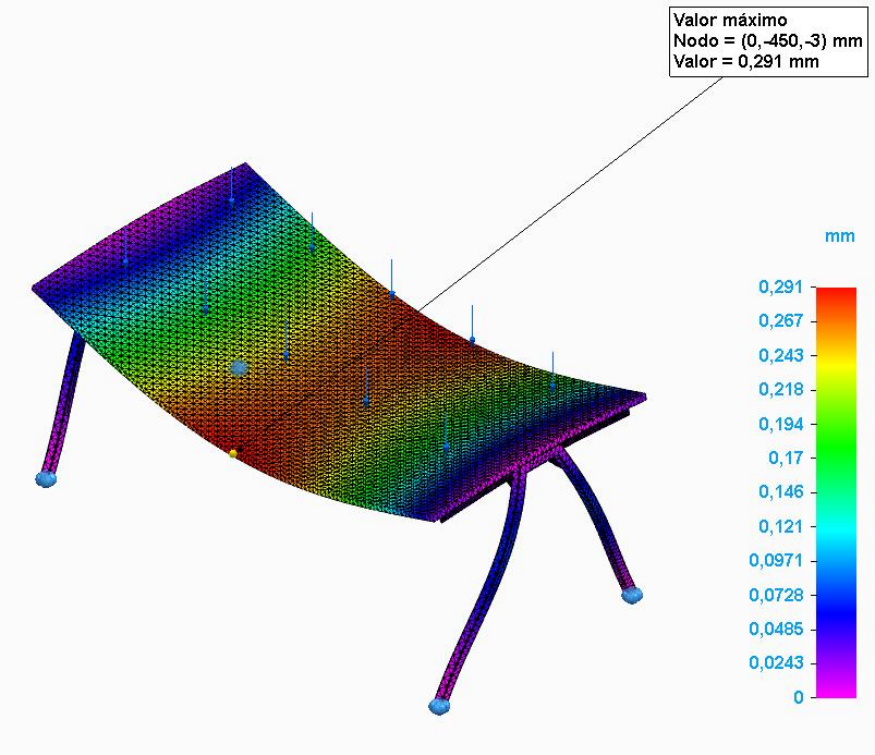


Ilustración 110 → Desplazamiento. RdC mesa

5.2.3. Carga puntual

Aplicamos la misma carga que anteriormente (800N) en el apartado *4.4.5. Carga puntual,* haciendo referencia a uno de los malos usos que se les pueda dar a la mesa. En el que una persona se siente en el centro de ella.

Resultados

- Tensión: La tensión (57,3MPa) ha aumentado conforme a la carga distribuida, como ya cabía esperar. Ahora esta máxima tensión se sitúa en la unión entre las patas, las escuadras y el refuerzo central. Ya que al ser un punto en el que se concentran muchos dobles y uniones las tensiones que soportan son más altas.

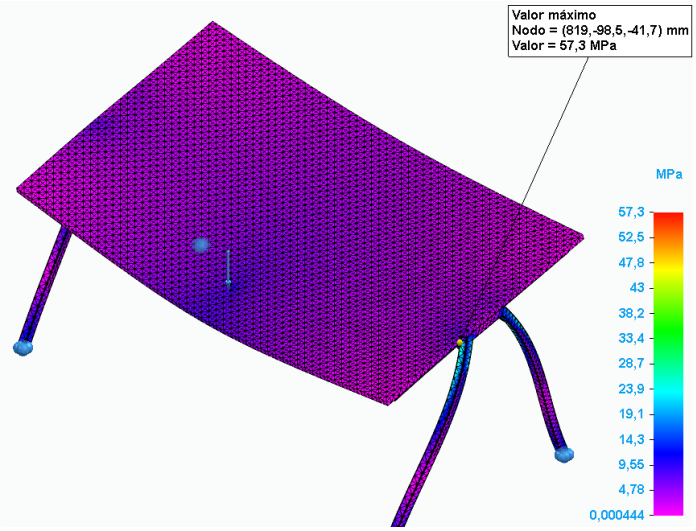


Ilustración 111 → Tensión, carga puntual. RdC mesa

- Desplazamiento: La deformación ha aumentado bastante poco, por lo que el diseño sigue siendo válido.

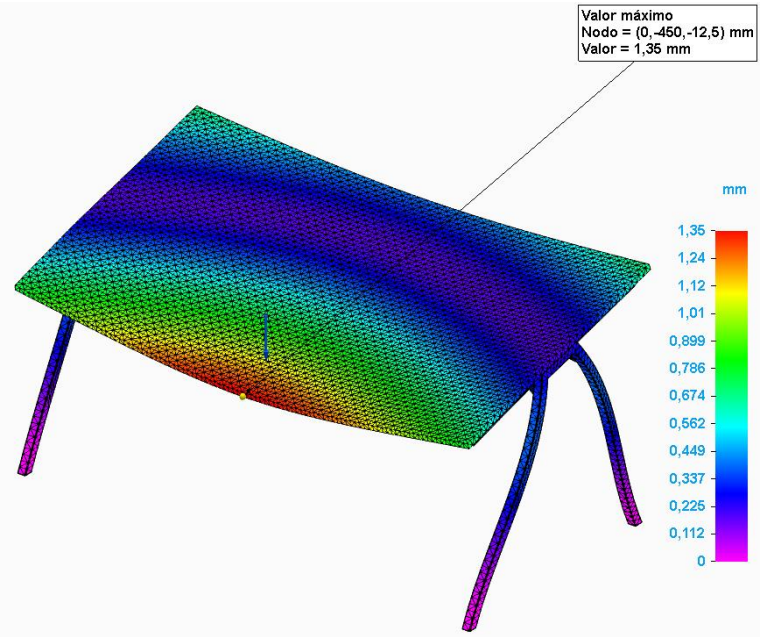


Ilustración 112 → Desplazamiento, carga puntual. RdC mesa

5.2.4. Conclusiones

Reducción del Espesor de la Encimera

- **Impacto Positivo:** La reducción del espesor de la encimera de melamina de 25 mm a 19 mm ha disminuido significativamente el material necesario, reduciendo costos y el peso total de la mesa, lo que facilita su manejo y transporte.
- **Resultados:** Aunque la deformación elástica ha aumentado a 0,291 mm, este valor sigue siendo bajo y no compromete la integridad estructural de la mesa.

Modificación de los Niveladores de las Patas

- **Impacto Positivo:** El cambio en el diseño de las patas, eliminando los niveladores y apoyándolas directamente sobre los tubos con fieltros, ha reducido los puntos de alta tensión y simplificado el proceso de fabricación.
- **Resultados:** La tensión máxima observada es de 17,7 MPa, significativamente menor, indicando una mejora en la distribución de tensiones y una reducción de puntos críticos.

Carga Puntual

- **Tensión:** Bajo una carga puntual de 800N, la tensión máxima ha aumentado a 57,3 MPa, localizada en la unión entre las patas, las escuadras y el refuerzo central. Aunque la tensión es mayor, sigue estando por debajo del límite elástico del material, garantizando la seguridad estructural, con un factor de seguridad de 4,57.
- **Desplazamiento:** El desplazamiento ha aumentado levemente, pero sigue siendo aceptable, confirmando la validez del diseño bajo condiciones de uso extremas.

Resumen

La reducción de costes implementada en el diseño de la mesa ha sido exitosa. Los cambios realizados han disminuido los costos de fabricación y el peso total sin comprometer la funcionalidad o la integridad estructural de la mesa. Los análisis de tensión y desplazamiento bajo cargas distribuidas y puntuales demuestran que el nuevo diseño es seguro y eficiente, manteniendo su desempeño bajo las condiciones de uso esperadas.

6. Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado ha permitido analizar y optimizar diversas estructuras de soporte utilizadas en el sector retail, específicamente en HMY Yudigar. A través del uso de herramientas avanzadas de simulación como SolidEdge, se han realizado estudios detallados que han evaluado la integridad estructural y la eficiencia de materiales bajo diferentes condiciones de carga.

6.1. Principales Hallazgos

- **Eficiencia en Materiales:** En los casos estudiados, la reducción de espesores y la simplificación de diseños han demostrado ser estrategias efectivas para reducir costos sin comprometer la seguridad estructural. Estos cambios se realizaron sólo cuando el factor de seguridad inicial indicaba un margen suficiente, permitiendo que el diseño siguiese siendo fiable y seguro a pesar de no ser tan robusto como el original. Este enfoque ha sido validado en los estudios del Monorail y la Mesa de Apoyo, donde las tensiones y deformaciones se mantuvieron dentro de límites aceptables.

- **Simulación y Análisis:** Las simulaciones realizadas han proporcionado una visión detallada de cómo se comportan las estructuras bajo cargas específicas. La tensión máxima y los desplazamientos observados se mantuvieron dentro de límites aceptables, confirmando la viabilidad de los diseños optimizados.

- **Recomendaciones de Diseño:** Se recomienda continuar con la optimización de diseños, enfocándose en la reducción de puntos de alta tensión y la mejora de la distribución de cargas. Además, se sugiere realizar estudios adicionales de convergencia de mallas para validar aún más los resultados obtenidos.

Impacto y Futuro: Este TFG no solo ha proporcionado soluciones prácticas para la reducción de costos en la fabricación de estructuras, sino que también ha establecido un marco metodológico robusto para futuras investigaciones y optimizaciones en el diseño de mobiliario en HMY Yudigar.

Lecciones Aprendidas: Durante el desarrollo del proyecto, se han identificado áreas clave para la mejora continua en la simulación y análisis de estructuras. La experiencia adquirida servirá como base para proyectos futuros, promoviendo la innovación y la eficiencia en el diseño y fabricación de productos en HMY Yudigar.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Siemens Community - Simulation Optimization in Solid Edge

https://community.sw.siemens.com/s/article/simulation-optimization-in-solid-edge

https://solidedge.siemens.com/es/solutions/products/simulation/solid-edge-simulation

- Tutoriales en Youtube

https://www.youtube.com/watch?v=cN1WCHznRc0

https://www.youtube.com/watch?v=U-8Yn3MsFEw