

ESTRUCTURAS

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales – Especialidad Mecánica



TRABAJO FINAL: ANÁLISIS ESTRUCTURAL ESTÁTICO DE UNA GRÚA PARA MOTORES

Curso 2021/22

Álvaro Morales Sánchez - 18240

Jorge Calvo Arroyo - 17069

Antón Levytskyy - 17250

Índice

1	Introducción y breve resumen	1
2	Estructura	2
2.1	Geometría.....	2
2.2	Materiales	3
2.3	Perfil y sección de las barras.....	3
2.4	Condiciones de contorno	3
3	Acciones y comprobaciones incluidas en el estudio	4
3.1	Acciones.....	4
3.2	Comprobaciones.....	4
4	Modelado con elementos finitos del prototipo en su diseño final	5
4.1	Hipótesis de simplificación	5
4.2	Elementos de la geometría incluida en el CAD.....	6
4.3	Tecnología de elementos.....	7
4.4	Justificación de las ligaduras, condiciones de contorno y acciones	7
5	Resultados del proceso de optimización, modelo final	9
5.1	Importancia del tensor.....	12
6	Validación, limitaciones y sensibilidad de los resultados	14
6.1	Limitaciones del modelo	14
6.2	Sensibilidad de los resultados	15
7	Conclusiones.....	16
7.1	Planificación del trabajo	16

1 Introducción y breve resumen

El proyecto de modelado consiste en la generación de un informe que recoja el análisis estructural de un prototipo de estructura propuesto. En nuestro caso, se trata de una grúa plegable formada por barras de sección cuadrada de acero.

Presenta una geometría idónea para colocarse cerca de un automóvil, las patas se posicionen debajo y la pluma encima, pudiendo levantar con facilidad un elemento pesado del interior del vano motor.

Presenta apoyos móviles y un gato hidráulico para levantar el peso. Para la simulación estática es posible tomar las ruedas como apoyos y el gato como elemento rígido similar a las barras. En función del punto de anclaje entre el gato y la pluma, varía la carga máxima que es posible levantar.

Esto se puede deber tanto a las tensiones sobre las barras, que no pueden superar un umbral, a una deformación excesiva, o también al esfuerzo que recae sobre el cilindro hidráulico que tiene un límite para el correcto funcionamiento. El objetivo del estudio completo consistiría en calcular la carga máxima que se podría levantar en función del punto de anclaje del gato y el esfuerzo que este deberá soportar en cada caso. En nuestro caso, estudiaremos una única posición del anclaje. Completar el estudio requeriría realizar los mismos pasos cuantas veces se quiera. Para realizar una comparativa se debería tomar la pluma paralela al suelo en todas las simulaciones.

2 Estructura

2.1 Geometría

La estructura está formada por barras de perfil cuadrado con uniones de tipo soldadura o atornilladas. La viga superior se une al cuerpo de la estructura con una rótula, que permite el libre giro para elevar o bajar la carga. El cilindro hidráulico será simulado por una celosía que trabaja a compresión. Se podrá dimensionar el tamaño del cilindro para soportar los esfuerzos al subir y bajar la carga. Además de su posición o anclaje con la barra superior.



FIGURA 1 - ESQUEMA DE LA GRÚA DEL MODELO

Para una mejor comprensión de las partes mencionadas, y en las que focalizaremos el estudio, y poder comprender el estudio realizado se adjunta un esquema con las distintas partes de la estructura.

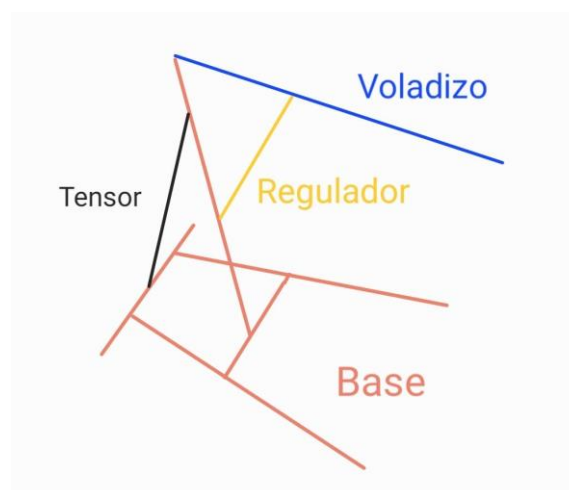


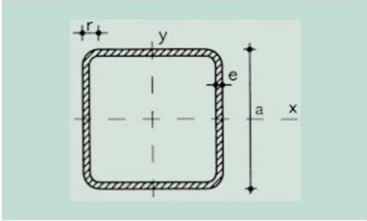
FIGURA 2 - ESQUEMA DE LAS PARTES RELEVANTES DE LA GRÚA

2.2 Materiales

Todos los elementos de la grúa están fabricados de acero estructural no aleado S275JR, que tiene como principal aplicación productos largos laminados en caliente y semielaborados, como es el caso de barras cuadradas. Admite muy bien la soldadura, sin precalentamiento ni tratamiento térmico posterior, por lo que es óptimo para elaborar los elementos de la estructura. Destaca por su versatilidad y economía.

2.3 Perfil y sección de las barras

El perfil escogido es el 80.5 hueco cuadrado. Sus dimensiones y espesores están normalizados en la serie de perfiles europeos.



r = Radio exterior de redondeo
 u = Perímetro
 A = Área de la sección
 S = Momento estático de media sección, respecto al eje X o Y
 I = Momento de inercia de la sección, respecto al eje X o Y
 $W = 2I : d$: Módulo resistente de la sección, respecto al eje X o Y
 $i = \sqrt{I : A}$: Radio de giro de la sección, respecto al eje X o Y
 It = Módulo de torsión de la sección

Perfil	Dimensiones				Términos de sección						Peso
	a mm	e mm	r mm	u mm	A cm ²	S cm ³	I cm ⁴	W cm ³	i cm	I_t cm ⁴	p kp/m
# 80.5	80	5	13	299	14,10	19,50	128,00	32,00	3,01	217,0	11,10 P

FIGURA 3 - GEOMETRÍA DEL PERFIL 80.5

La geometría ha sido diseñada en SpaceClaim para después ser importada y usada en el Model del proyecto en Workbench.

2.4 Condiciones de contorno

Se han tomado cuatro puntos de apoyo de la grúa, que coinciden con las ruedas sobre que se montan en la base, se han simulado como restricciones al movimiento en el eje perpendicular al suelo. También se ha fijado el movimiento en otros ejes para que el problema no tenga ningún movimiento ni giro libre.

Se fijan los 4 desplazamientos en Z. Después, se fija en X y en Y en una rueda, y en otra rueda contigua, el desplazamiento en Y. De esta manera, permitiremos los desplazamientos y deformaciones. Sin embargo, en este problema estos desplazamientos no son prácticamente relevantes.

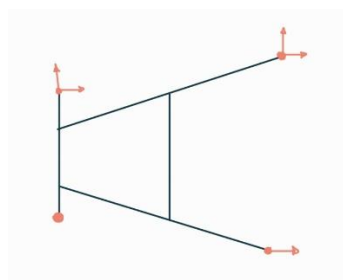


FIGURA 4 - EN ROJO, LOS GRADOS DE LIBERTAD QUE SE PERMITEN

3 Acciones y comprobaciones incluidas en el estudio

3.1 Acciones

La estructura objeto de estudio es usada en condiciones operativas comunes, con un rango de temperaturas entre 0 y 30 °C, y unas tensiones que se asemejan casi por completo a estáticas.

El apoyo de la grúa sobre el suelo se realiza sobre ruedas que permiten moverla fácilmente por el área de trabajo. En el caso estático, se pueden asemejar a restricciones de desplazamiento en el eje perpendicular al suelo.

Se simplifican las acciones como un caso estático con un motor colgando de su extremo, representando dicho peso con una carga puntual vertical proporcional a este. Con este caso, omitimos movimientos o giros de la estructura para evitar anomalías o esfuerzos cortantes en dirección horizontal que puedan afectar al verdadero propósito de la estructura.

3.2 Comprobaciones

Para espesores de entre 3 y 16 milímetros, el fabricante METINVEST proporciona un valor de límite elástico mínimo de 275 MPa, y un valor de Límite de resistencia de 410 MPa.

Para nuestro estudio se ha tomado un Estado Límite último de agotamiento por sollicitación normal (flexión, compresión y cortante), que es la más exigente debido a la posición y orientación de la carga.

4 Modelado con elementos finitos del prototipo en su diseño final

4.1 Hipótesis de simplificación

En nuestro caso omitiremos las ruedas, y su bloqueo lo simularemos con restricciones en los desplazamientos. Lo importante es la base, enlace y unión entre las distintas barras, las ruedas son una simple solución para poder mover la estructura por un taller.

La barra superior en voladizo puede variar su longitud, para ello se divide en dos partes. Una primera barra unida a la estructura, y una segunda con un perfil más pequeño capaz de moverse por el interior de la otra. Dependiendo de lo que sobresalga la segunda barra se ajustará la longitud. Fijada a partir de un pasador. En nuestro caso, emplearemos una única barra con una longitud fija.

El cilindro hidráulico en nuestro caso se simplifica por un regulador de forma cilíndrica constante. Este sería un amortiguador, pero no tenemos los conocimientos como para crearlo. Lo importante será ver que esfuerzo, axial, debe aguantar para poder elegir uno que se pueda incorporar en la estructura, a partir de fabricantes externos.

En el ejemplo comercial vemos que se incluyen dos tensores en la parte posterior, nosotros emplearemos únicamente uno. La principal utilidad de dichos tensores es soportar esfuerzos laterales u horizontales, como los que se dan al mover la estructura o si hay un pequeño balanceo del motor respecto de la estructura. Como estudiaremos el caso estático consideramos que esta simplificación es válida en esta situación.

Anteriormente vimos un ejemplo comercial de la estructura, y a continuación el modelo simplificado, con el que hemos trabajado.

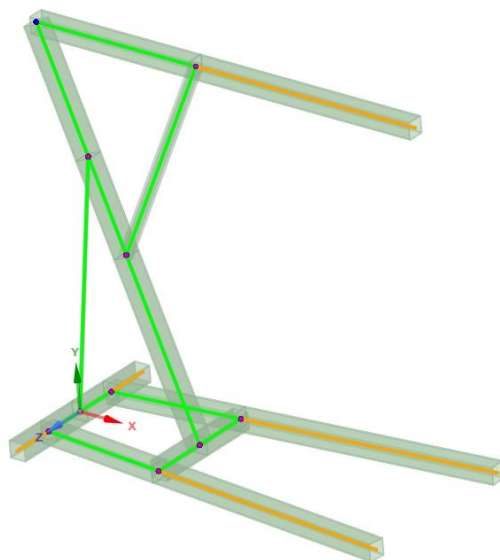


FIGURA 5 - MODELO EN SPACECLAIM DE LA ESTRUCTURA

Continuaremos con la nomenclatura adjuntada anteriormente (base, voladizo, regulador, tensor), para denominar los distintos elementos que conforman la estructura.

4.2 Elementos de la geometría incluida en el CAD

Inicialmente se crea la base con 4 rectas, dos paralelas y dos oblicuas que se cruzan y unen con las anteriores. Gracias a un plano auxiliar centrado y perpendicular a la base se crea otro sketch. De nuevo, empleando 4 rectas, se logra la forma deseada. Asegurándose de que todas las rectas están correctamente unidas, tanto las que comparten plano como las que unen la base con las verticales.

En el momento de pasar del SpaceClaim al modelo en el Mechanical, se creaban múltiples 'bodies' que dificultaban el análisis. Para solventar eso, dentro del SpaceClaim asignamos a los distintos elementos, materiales ficticios, para generar en el Mechanical únicamente 4 'bodies': Base, Tensor, Voladizo y Regulador.

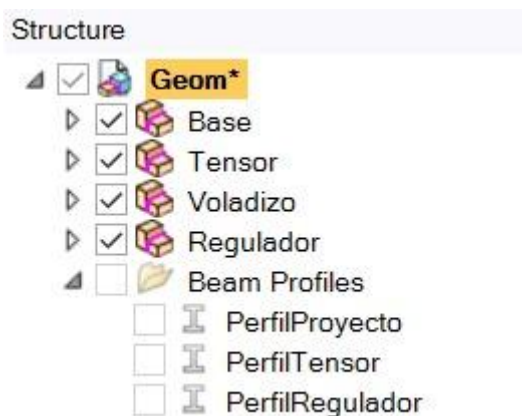


FIGURA 6 - ÁRBOL DE LA GEOMETRÍA EN SPACECLAIM

A los sketches anteriores, se le añaden distintos perfiles. Como observamos en el árbol anterior, dichos perfiles se dividen en: uno general, otro para el tensor y otro para el regulador. Todos ellos fueron creados desde cero en SpaceClaim. El general cumple con las dimensiones propias del perfil mencionado, perfil hueco cuadrado 80.5. Dicho perfil se adjunta a las componentes base y voladizo. Después se añaden otros dos distintos al tensor y al regulador. El perfil del tensor será rectangular y más estrecho que el anterior, y el del regulador circular.



FIGURA 7 - PERFIL RECTANGULAR 20 X 5 MM

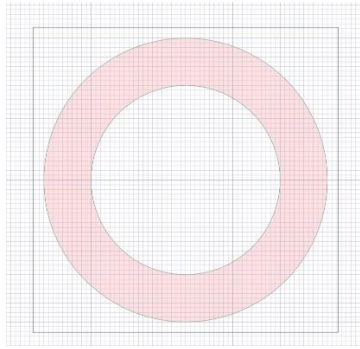


FIGURA 8 - PERFIL CIRCULAR ($\Phi_e = 60$ Y $\Phi_i = 40$ MM)

4.3 Tecnología de elementos

Para la modelización se toman como celosías el tensor y el regulador, siendo el resto de las barras vigas. Estas dos barras son auxiliares, se unen a la estructura para transmitir en ellas esfuerzos axiales, sin tener bloqueados los giros en sus extremos.

En el caso del amortiguador es fácil de ver, ya que este elemento está diseñado para soportar cargas axiales. Su unión con la estructura, observando la foto real, es una especie de unión roscada con un tornillo que a efectos prácticos dejaría libre al giro, similar a una rótula. Lo mismo sucede con las uniones del tensor. Además, como en este no se aplica ninguna carga deberá trabajar a tracción, cumpliendo una función similar a la de un cable.

Por el contrario, lo que hemos denominado en nuestro esquema como base, será un conjunto de barras soldadas donde el giro está bloqueado. Es por ello por lo que se modelizan como vigas, que transmiten todos los tipos de esfuerzos entre ellas.

Por último, la viga en voladizo, pese a unirse con la base a partir de una rótula tiene en su extremo aplicada un esfuerzo cortante, la carga puntual, y también se transmite esfuerzo en su unión con el regulador. Por eso, también se toma como una viga.

4.4 Justificación de las ligaduras, condiciones de contorno y acciones

Como se mencionó anteriormente, las ruedas no se incluyen. Pero se ponen en cuatro puntos, donde irían dichas ruedas, las condiciones de contorno. Ya que serían el contacto con el suelo, y el elemento que bloquease los desplazamientos. La justificación de estas condiciones de contorno ya se ha hecho en apartados anteriores.

El resto de las ligaduras vienen dadas por el 'Share Topology' del modelo, excepto la rótula que une el voladizo con la base. Para ello necesitamos quitarle un grado de libertad a dicha unión, el del giro en Z, mediante en la función 'End Release'.

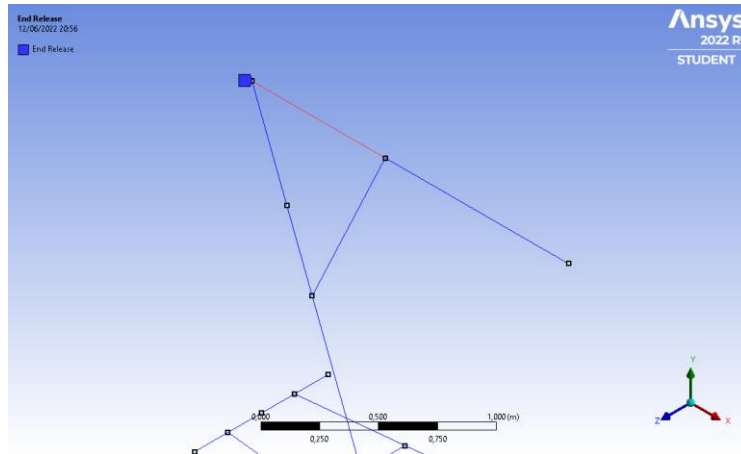


FIGURA 9 - FUNCIÓN END RELEASE

Como ya se mencionó, se emplea una carga puntual. El valor que tomará dicha carga será similar al peso del motor de un turismo comercial. Dichos motores pesan, con todos sus componentes incluido hasta caja de cambios, alrededor de los 400 kg. Para camiones pequeños y otros vehículos de transporte de cargas, dicho valor ronda los 700 kg. Para camiones más pesados se emplean grúas más específicas para altas cargas, por ello limitaremos nuestro estudio en los 800 kg. Colocando una carga puntual de 8000 N en el extremo del voladizo. El uso de carga puntual es bastante acertado, ya que la carga del motor se trasmite a estructura a partir de un cable o cadena, no dependiendo de la superficie.

Si el modelo cumpliera todos los requisitos que buscamos deberíamos observar en los resultados, que se analizaran posteriormente, cómo el regulador trabajaría a compresión y el tensor a tracción y cómo el momento flector a ambos lados de la rótula que une la base y el voladizo ha de ser nulo.

5 Resultados del proceso de optimización, modelo final

El proceso de optimización no es muy extenso, puesto que el trabajo se ha basado más en el análisis de una estructura en lugar de en el diseño. Se trataba de analizar la influencia del tensor, el estado de funcionamiento del regulador, la seguridad estática de la sección más demandada y el valor del estado límite último por deformación en el voladizo. Todo ello, variando el valor de la carga en el extremo de la pluma. Para las simulaciones que siguen en este apartado se usará un valor de la carga de 8000N, correspondiente a un motor de 800 kg, algo bastante sobredimensionado.

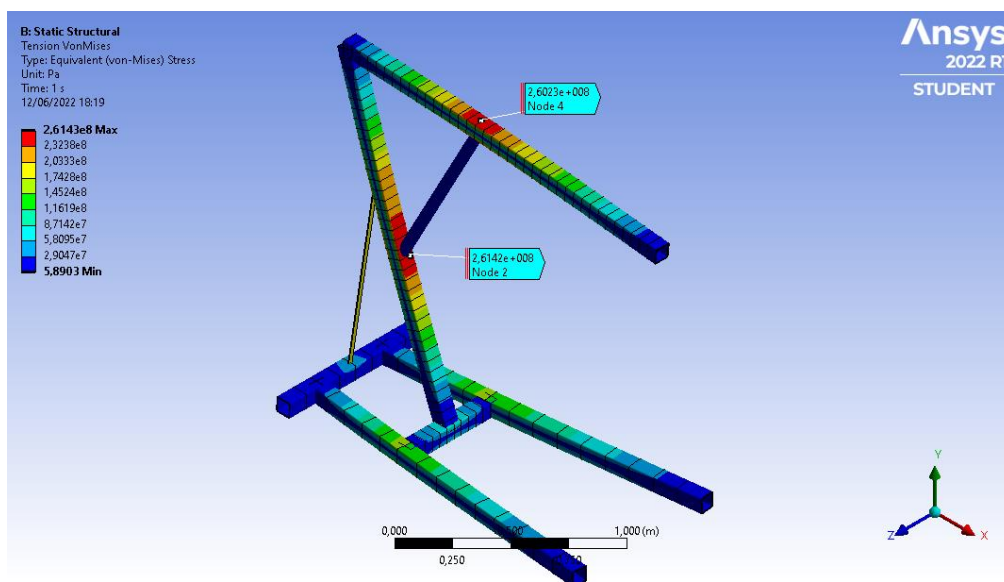


FIGURA 10 - TENSIONES DE VON MISES EN EL MODELO

Mediante la **tensión de Von Mises** obtenemos los valores en las secciones más solicitadas mostrados en la figura 10.

Estas secciones son las que mayor esfuerzo flector soportan, y tienen valores muy cercanos. Llamemos sección 1 a la de la barra central y sección 2 a la de la pluma.

$$\text{Sección 1} \rightarrow \sigma_{VM} = 261,42 \text{ MPa} \rightarrow S_{e1} = \frac{275 \text{ MPa}}{261,42 \text{ MPa}} \approx 1,05$$

$$\text{Sección 2} \rightarrow \sigma_{VM} = 260,23 \text{ MPa} \rightarrow S_{e2} = \frac{275 \text{ MPa}}{260,23 \text{ MPa}} \approx 1,06$$

Valores prácticamente iguales a uno, por lo que estamos trabajando con el estado límite elástico del material. Para esta posición de la grúa, el material impone la restricción de no poder levantar más de 8000 N. Para aumentar la seguridad a un valor razonable, habría que disminuir un poco ese valor.

Por otro lado, tendremos que comprobar el estado límite debido a la deformación admisible en el material, representando las **deformaciones en la dirección vertical**. Se muestran en la siguiente figura.

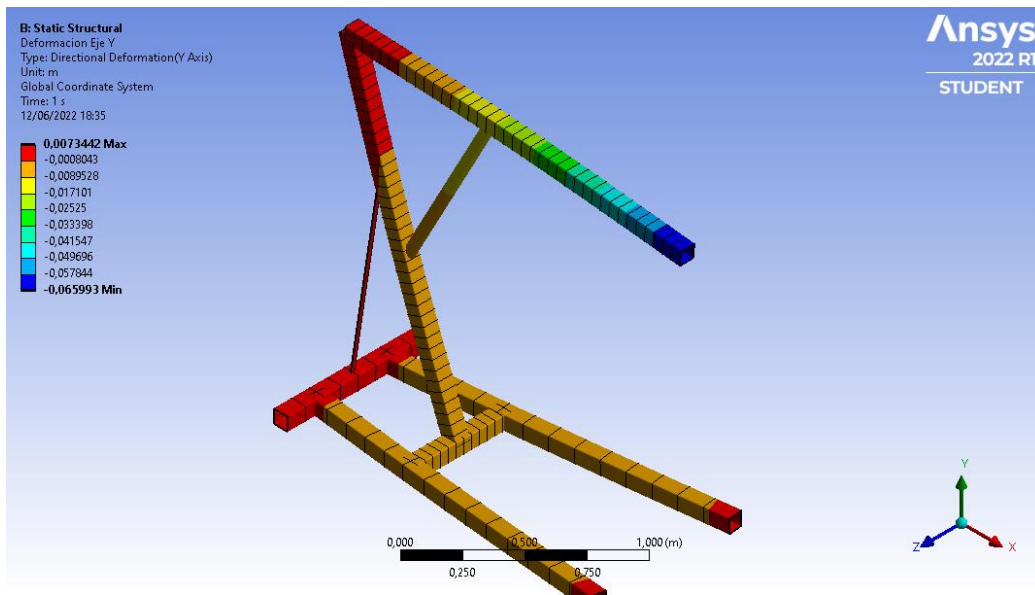


FIGURA 11 - DEFORMACIONES EN DIRECCIÓN Y

La deformación en el extremo de la pluma es de 6,6 cm. En este momento es cuando hay que interpretar si esa definición es admisible. Realmente 6 centímetros es MUY grande, pero si permite levantar y sacar el motor del anclaje del chasis, debería ser válido.

A continuación, se incluyen los **diagramas de esfuerzos** en las dos vigas principales de la siguiente forma:

Los sistemas de coordenadas locales de cada barra se han obtenido con los Elemental Triads.

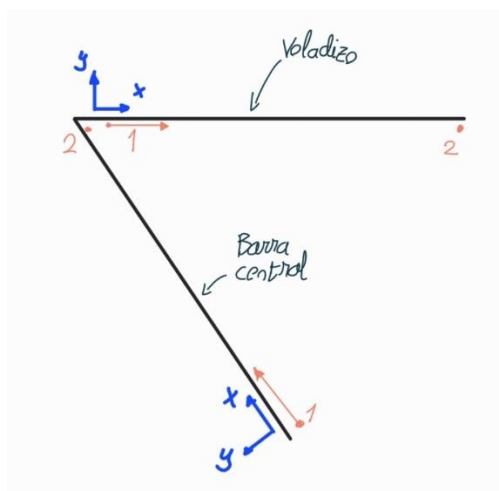


FIGURA 12 - PATH PARA LA REPRESENTACIÓN DE LOS ESFUERZOS

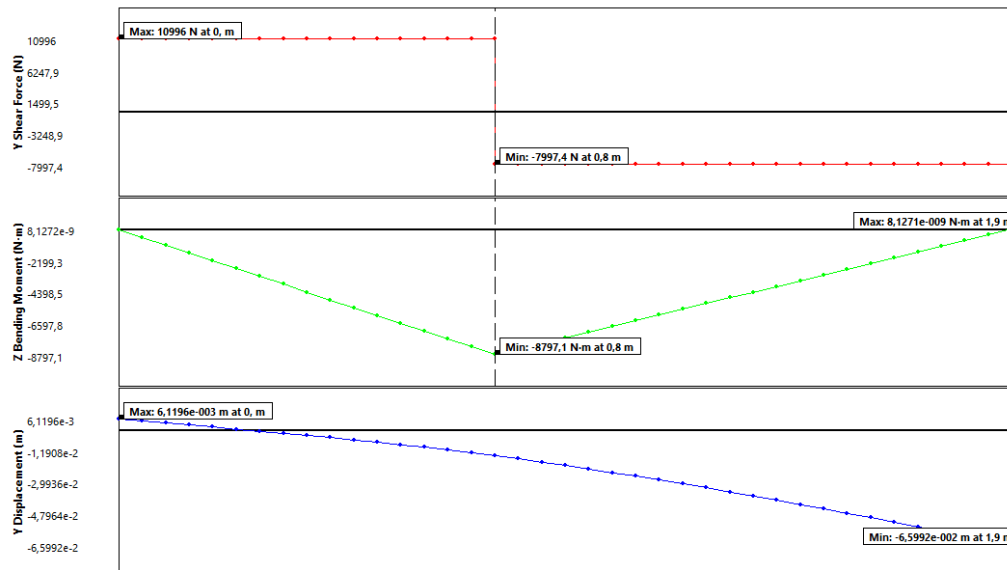


FIGURA 13 - DIAGRAMA DE ESFUERZOS DEL VOLADIZO

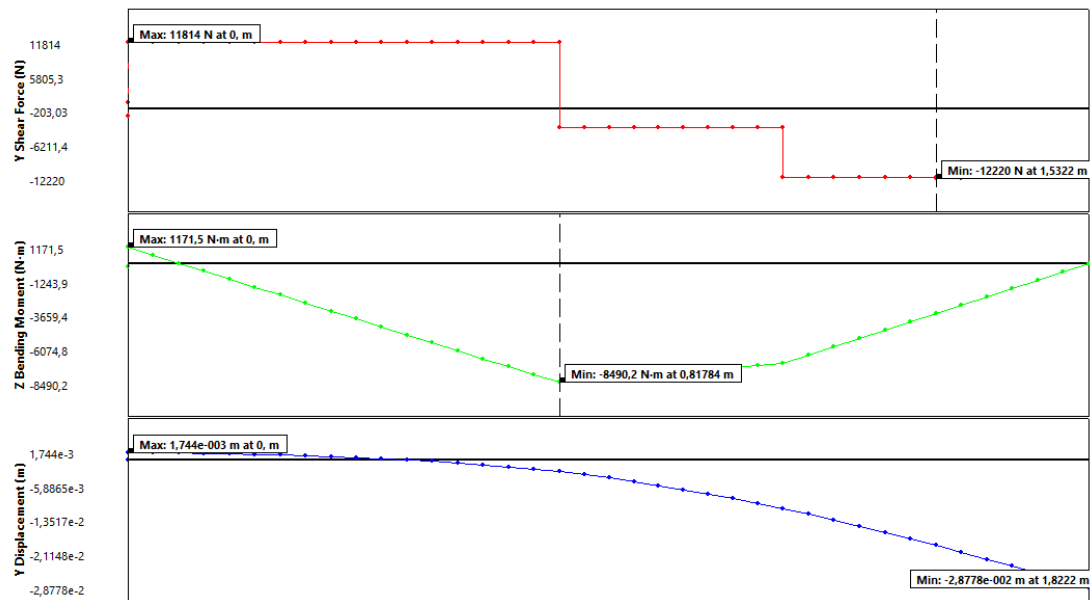


FIGURA 14 - DIAGRAMA DE ESFUERZOS DE LA VIGA CENTRAL

Por último, analizaremos los esfuerzos axiales en el sistema. Los esfuerzos axiales se mantienen constantes en cada barra entre apoyo y apoyo, lo cual concuerda con lo que cabría esperar. Los resultados realmente relevantes de esfuerzos axiales son los de las celosías: el regulador y el tensor.

Las tensiones en estos elementos son:

$$\text{Regulador} \rightarrow N = -20957 \text{ N (compresión)}$$

$$\text{Tensor} \rightarrow N = 18589 \text{ N (tracción)}$$

Mediante el esfuerzo de compresión, se podría comenzar a diseñar el cilindro neumático del regulador.

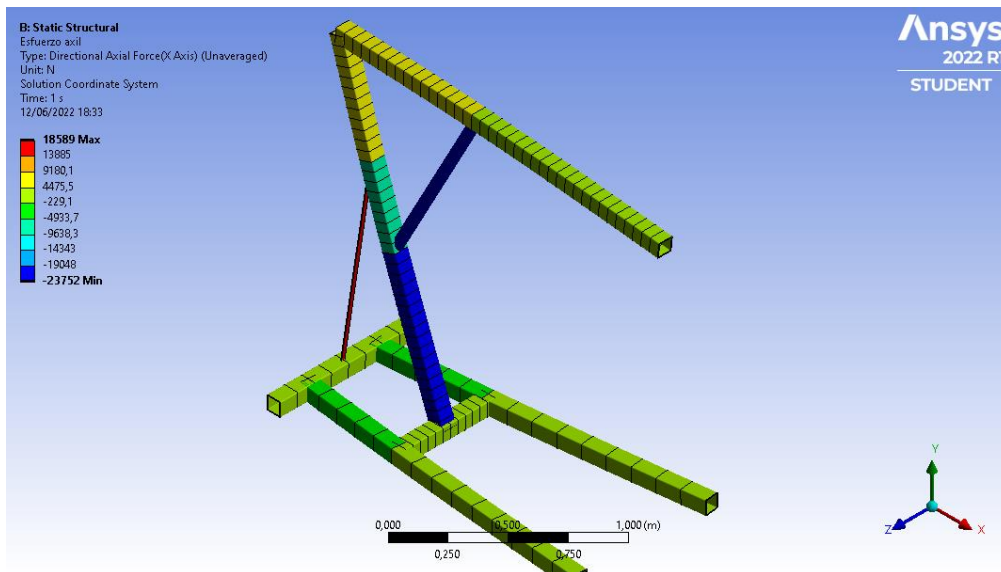


FIGURA 15 – ESFUERZOS AXIALES EN EL MODELO

5.1 Importancia del tensor

Se realiza otra simulación, suprimiendo el tensor.

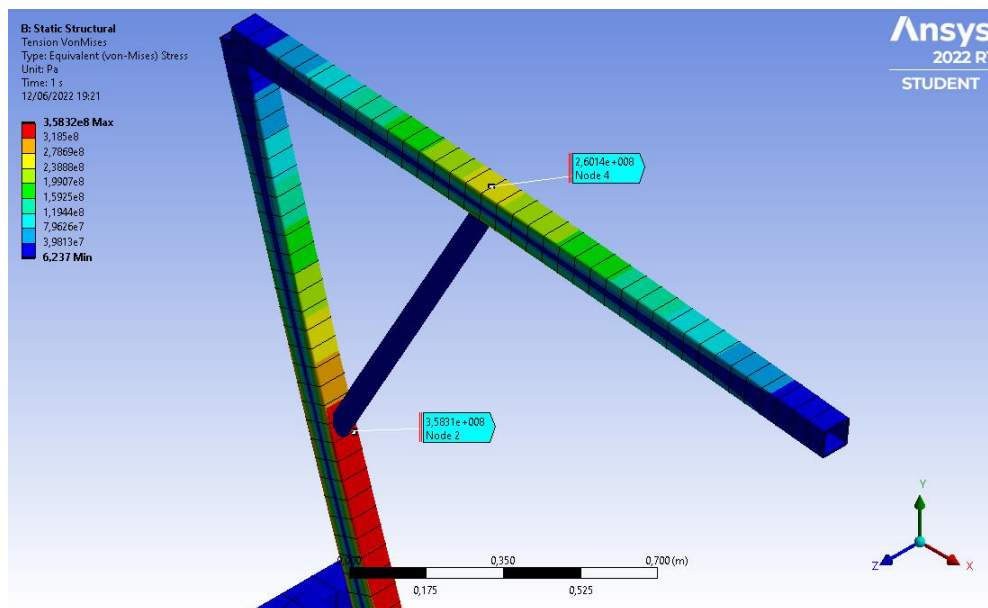


FIGURA 16 – TENSIONES DE VON MISES EN EL MODELO SIN TENSOR

$$\text{Sección 1} \rightarrow \sigma_{VM} = 358,31 \text{ MPa} \rightarrow S_{e1} = \frac{275 \text{ MPa}}{358,31 \text{ MPa}} \approx 0,77$$

$$\text{Sección 2} \rightarrow \sigma_{VM} = 260,14 \text{ MPa} \rightarrow S_{e2} = \frac{275 \text{ MPa}}{260,14 \text{ MPa}} \approx 1,06$$

La sección 2, la del voladizo, permanece con tensión constante. Sin embargo, en la sección 1 vemos un aumento notable de la tensión, desde 261,42 hasta 358,31 MPa. Un aumento del 37%. También aumenta la deformación del punto extremo de la pluma, que aumenta desde 6,6 cm hasta 10 cm.

Queda justificada la relevancia de tener ese tensor ahí. Es más, en prácticamente todas las grúas que están en el mercado se incluyen dos tensores en lugar de uno. En nuestra simulación se ha incluido un tensor en el plano medio, pero normalmente se incluyen 2 simétricos para aguantar también pequeños esfuerzos laterales por el balanceo del motor.

Para rigidizar el voladizo, también se podría añadir un tercer tensor, que son las dos barras en forma de triángulo que se ven en la siguiente figura.



FIGURA 17- EJEMPLO DE LOS 2 TENSORES LATERALES Y TENSOR DEL VOLADIZO

6 Validación, limitaciones y sensibilidad de los resultados

Con el objetivo de obtener unos resultados aproximados con los que validar que el modelado realizado es correcto, se ha planteado el cálculo analítico plano de la pluma (voladizo) de la grúa sobre el que se apoya la carga a levantar por la grúa.

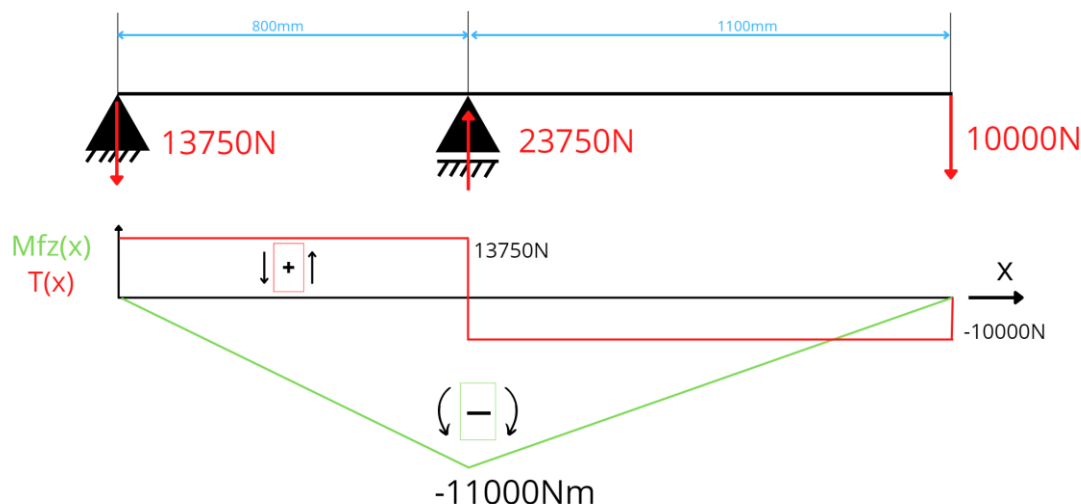


FIGURA 18 - ESFUERZOS EN EL VOLADIZO CALCULADOS A MANO

La unión del voladizo con la barra izquierda se realiza mediante una rotula para evitar la transmisión de momentos y permitir el libre giro de la articulación. Para comprobar la correcta implementación se comparan los resultados. En la simulación se ha tomado un peso de 1 tonelada obteniéndose un momento de 10996 Nm que coincide con el resultado analítico. Además, se observa un momento nulo en ambos extremos de la pluma.

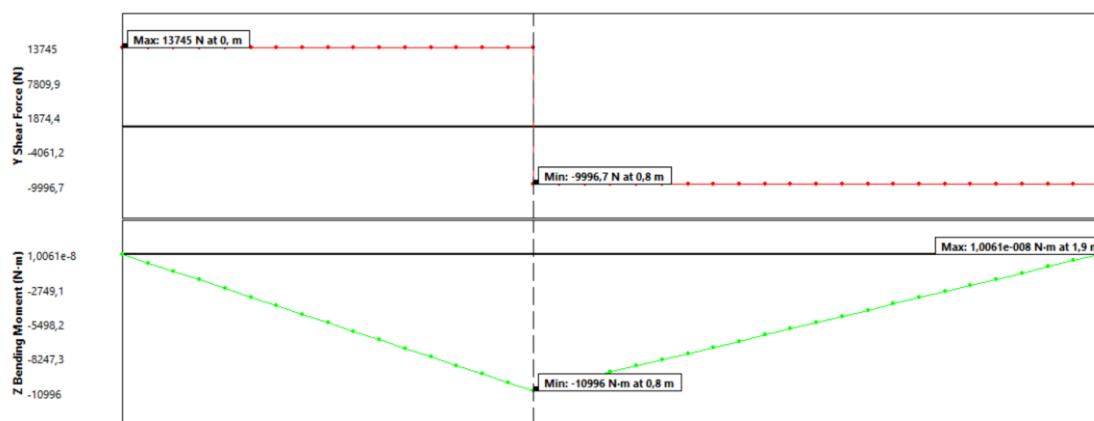


FIGURA 19 - ESFUERZOS EN EL VOLADIZO ANSYS

6.1 Limitaciones del modelo

Durante la simulación se observa una deformación muy grande de la pluma. En el modelo no se ha tenido en cuenta que la grúa comercial presenta dos perfiles, uno de menor tamaño situado dentro del otro, pudiendo moverse para extender o acortar el voladizo.



FIGURA 20 - VOLADIZO EXTENSIBLE

Gracias a que la pluma esta formada por dos barras de perfil cuadrado, se obtiene una mayor rigidez y menor deformación, que no se ha tenido en cuenta en la simulación.

También se debe comentar que el problema planteado es prácticamente bidimensional, pues se ha tomado la carga descendiente en el eje Y y la estructura es simétrica respecto al plano XY. Por tanto, cualquier variación de la fuerza por el balanceo de la carga u otras condiciones no estáticas, producirán esfuerzos y deformaciones muy distintas a las estudiadas.

6.2 Sensibilidad de los resultados

En el modelo estudiado, el tamaño de la malla y su forma no presentan gran importancia debido a que se trata de perfiles de sección cuadrada en todas las barras. Por otro lado, las celosías solo presentan comportamiento axil y no necesitan de mallado.

7 Conclusiones

En este apartado se tratarán y comentarán los aspectos más significativos que han surgido durante la elaboración de este proyecto.

Como inconveniente más destacado, debemos comentar las dificultades al plasmar el diseño en Workbench, lo que nos obligo a rehacer la geometría para solventar problemas en la continuidad de la estructura.

Las decisiones relacionadas con el tipo de elementos que se han usado para simular el comportamiento de los distintas barras y el tipo de uniones entre estas también han supuesto un elevado tiempo de trabajo en grupo. La elección de las condiciones de contorno, a pesar de no ser muy complejas, han sido motivo de controversia entre los integrantes, por lo que finalmente se hicieron pruebas con distintas combinaciones para escoger las más simples que modelaran correctamente el comportamiento real estático.

Cabe resaltar como novedad en el aprendizaje la implementación de elementos rótula en la estructura, con los que ha sido posible liberar el grado de libertad de giro que se ha deseado, en nuestro caso en el eje Z.

Más en general, el aprendizaje ha estado en modelar algo de 0, sin guion y sin 'prácticamente ayuda', ya que el profesor no te va a hacer el trabajo entero. Afrontar esta situación puede ser muy frustrante a veces, pero también gratificante otras.

7.1 Planificación del trabajo

El trabajo dio comienzo con una reunión online de 'brainstorming' para proponer posibles proyectos de modelado, que finalizó con la elaboración de un documento de propuestas que fue enviado para revisión.

En cuanto a la elaboración del proyecto en sí, la primera reunión fue presencial para tratar todos los aspectos del diseño. Los principales objetivos fueron tomar decisiones iniciales sobre el material, el perfil de la barra a usar, la decisión de las condiciones de contorno y el reparto del trabajo. En esa misma reunión, Álvaro comenzó preparando la geometría con ayuda de Jorge, mientras Antón reunía toda la información relevante y comenzaba a redactar el informe.

Tras realizar un par más de reuniones y consultando al profesor, se obtuvo un proyecto con resultados aceptables. Este primer modelo ya tenía implementadas ciertas decisiones y presentaba un comportamiento realista.

Sin embargo, tras ciertos problemas en la continuidad de la geometría y el mallado, Jorge y Antón realizaron de nuevo el modelo solventando todos los problemas. Mientras tanto Álvaro procedió a la elaboración final del informe, el cual fue terminado por todos los integrantes.

A continuación, se deja una tabla con los tiempos aproximados de trabajo:

Reunión 1:	4h
Reunión 2 y 3 (total):	4h
Trabajo individual Jorge:	7h
Trabajo individual Antón:	7h
Trabajo individual Álvaro:	5h
Total:	27h