



# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERIA INDUSTRIAL

## TRABAJO FIN DE MÁSTER

### *REDISEÑO DE BASTIDOR PARA CALIBRE DE CONTROL INDUSTRIAL*

<b>Estudiante</b>	<i>Infante Camarero, David</i>
<b>Director</b>	<i>Santamaría Manrique, Javier</i>
<b>Departamento</b>	<b><i>Ingeniería Mecánica</i></b>
<b>Curso académico</b>	<i>2021-2022</i>

*Bilbao, 24 de febrero de 2022*

## RESUMEN TRILINGUE

---

### RESUMEN

En el presente documento se procede a analizar y rediseñar un bastidor de un calibre de control industrial. Este calibre es una herramienta industrial que debe cumplir unas tolerancias dimensionales bastante ajustadas, por lo que el diseño del bastidor sobre el que va montado es una etapa que deberá ejecutarse de forma minuciosa para cumplir estas condiciones.

Inicialmente se tiene un modelo ya comercializado que sin embargo no cumple adecuadamente estas restricciones. A lo largo del proyecto se mostrarán los motivos por los que no se cumplen y se trabajará en el diseño y cálculo de un modelo alternativo propuesto finalmente como solución. Durante el proceso se muestran los problemas estructurales que van surgiendo y se detallan los pasos dados para tratar de solucionarlos. Para la conclusión de los resultados se han utilizado alternativamente dos softwares de cálculo y diseño: Ansys Workbench y Solid Edge.

Este trabajo se contextualiza dentro de mi periodo de prácticas de máster en un fabricante de utillajes del sector industrial; más concretamente en el ámbito productivo. Se trata de un problema real al que aún no se ha encontrado solución.

### ABSTRACT

In this paper we proceed to analyze and redesign a frame of an industrial control caliper. This caliper is an industrial tool that must meet fairly tight dimensional tolerances, so the design of the frame on which it is mounted is a step that must be correctly executed to meet these conditions.

Initially, there is an already commercialized model that, however, do not meet these restrictions. Throughout the project we will show the reasons why they are not fulfilled and we will work on the design and calculation of an alternative model finally proposed as a solution. During the process, the structural issues are shown and the steps taken to try to solve them are detailed. For the conclusion of the results, two calculation and design softwares have been used alternatively: Ansys Workbench and Solid Edge.

This work is contextualized within my master internship in a tooling manufacturer in the industrial sector; more specifically in the production area. It is a real problem to which no solution has been found yet.

### LABURPENA

Dokumentu honetan kontrol industrialaren kalibreko marko bat aztertzen eta birdiseinatzen hasiko gara. Neurgailu hau dimentsio-perdoia nahiko estuak bete behar dituen tresna industrial da, beraz, muntatuta dagoen markoaren diseinua baldintza horiek betetzeko arretaz egin beharreko etapa da.

Hasiera batean, dagoeneko merkaturatuta dagoen eredu bat dago, ordea, murrizketa horiek behar bezala betetzen ez dituenak. Proiektuan zehar, betetzen ez diren arazoak azalduko dira eta azkenean irtenbide gisa proposatutako eredu alternatibo baten diseinua eta kalkulua landuko da. Prozesuan zehar, sortzen diren egitura-arazoak erakusten dira eta horiek

konpontzen saiatzeko emandako pausoak zehazten dira. Emaitzak amaitzeko, bi kalkulu eta diseinu software erabili dira txandaka: Ansys Workbench eta Solid Edge.

Lan hau nire masterreko praktika-aldiaren barruan kokatzen da industria sektoreko erreminta fabrikatzaile batean; zehatzago, arlo produktiboan. Hau benetako arazoa da, eta oraindik irtenbiderik aurkitu ez zaion.

# INDICE

---

RESUMEN TRILINGUE .....	2
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. CONTEXTO.....	12
2.1 MOLDES.....	13
2.2 CUNAS .....	16
2.3 CALIBRES DE CONTROL.....	19
3. OBJETIVOS .....	26
4. ALCANCE.....	27
5. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO .....	28
6. ANALISIS DE REQUERIMIENTOS .....	29
6.1 FUNCIONES.....	29
6.2 REQUERIMIENTOS EN CUANTO A DIMENSIONES .....	30
6.3 REQUERIMIENTOS EN CUANTO A DEFORMACIONES .....	31
6.4 REQUERIMIENTOS EN CUANTO A COSTE .....	32
7. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.....	33
7.1 CUESTIONES PREVIAS.....	33
7.1.1 Ajuste de maquetas.....	33
7.1.2 Tolerancia de maquetas.....	35
7.1.3 Cálculo de elementos finitos .....	35
7.2 ALTERNATIVAS .....	37
7.2.1 Modelo de bastidor 1 .....	37
7.2.2 Modelo de bastidor 2 .....	41
7.2.3 Modelo de bastidor 3 .....	45
7.2.4 Modelo de bastidor 4 .....	49
7.2.5 Conclusiones del análisis de los 4 bastidores.....	54
8. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA .....	56
8.1 INTRODUCCIÓN.....	56
8.2 ETAPAS DE DISEÑO.....	57
8.2.1 Bastidor superior .....	58
8.2.2 Soportes INA.....	69
8.2.3 Ejes .....	71
8.2.4 Bastidor inferior .....	74

8.2.5	Nervios .....	76
8.2.6	Resultados de la etapa de diseño.....	79
8.3	ETAPA DE CÁLCULO .....	80
9.	DESCRIPCIÓN DE PROCEDIMIENTOS Y FASES .....	109
9.1	PROCEDIMIENTOS .....	109
9.1.1	Uniones flexibles .....	111
9.1.2	Deformación en los pilares.....	118
9.1.3	Flexión bastidor (debido al peso propio) .....	120
9.2	FASES DEL DESARROLLO DEL TRABAJO .....	122
9.2.1	Descripción de las fases.....	123
9.2.2	Diagrama de Gantt .....	126
10.	ASPECTOS ECONÓMICOS .....	127
10.1	DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO .....	127
10.2	ANÁLISIS DE RENTABILIDAD .....	128
11.	CONCLUSIONES .....	129
12.	REFERENCIAS .....	130

## INDICE DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 1- Peso del sector manufacturero español (Caixabank 2021). .....	9
Ilustración 2- Calibre de control en la sala de metrología. ....	11
Ilustración 3- Molde AUDI A436 cerrado. ....	13
Ilustración 4- Detalle de punzón neumático. ....	13
Ilustración 5- Detalle de proyecto I+D+I en una placa hembra. ....	14
Ilustración 6- Detalle de cazoleta y sistema de guiado. ....	15
Ilustración 7- Cuna FORD DBL. ....	16
Ilustración 8- Detalle centradores CPS. ....	17
Ilustración 9- Detalle pisadores (rojo) y sistemas neumático y eléctrico (azul). ....	18
Ilustración 10- Detalle mecanizado en cuna. ....	18
Ilustración 11- Techos dispuestos sobre maqueta. ....	19
Ilustración 12- Centrador 4W. ....	20
Ilustración 13- Centrador 2W. ....	20
Ilustración 14- Detalle trazo azul sobre afloramientos y reglillas. ....	21
Ilustración 15- Reloj de volumen sobre afloramiento y reglillas. ....	22
Ilustración 16- Reloj de longitud (1) sobre calibrador. ....	22
Ilustración 17- Detalle calces de insertos. ....	23
Ilustración 18- Maqueta HD04 en sala de metrología. ....	24
Ilustración 19- Maqueta HD02 en sala de metrología en posición HD02. ....	25
Ilustración 20- Detalle cáncamos y paso de palas. ....	29
Ilustración 21- Agarre bastidor HD04 para eslingas de tela. ....	30
Ilustración 22- Referenciación de maqueta en posición HD02. ....	31
Ilustración 23- Detalle soldadura del bastidor. ....	32
Ilustración 24- Vista superior de maqueta 0382-00. ....	33
Ilustración 25- Croquis modelo de bastidor 1. ....	37
Ilustración 26- Cálculo de elementos finitos modelo 1 (1). ....	38
Ilustración 27- Cálculo de elementos finitos modelo 1 (2). ....	39
Ilustración 28- Flexión del modelo 1 (3). ....	39
Ilustración 29- Cálculo de elementos finitos modelo 1 (4). ....	40
Ilustración 30- Croquis modelo de bastidor 2. ....	41
Ilustración 31- Cálculo de elementos finitos modelo 2 (1). ....	42
Ilustración 32- Cálculo de elementos finitos modelo 2 (2). ....	43
Ilustración 33- Cálculo de elementos finitos modelo 2 (3). ....	44
Ilustración 34- Croquis modelo de bastidor 3. ....	45
Ilustración 35- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (1). ....	46
Ilustración 36- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (2). ....	47
Ilustración 37- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (3). ....	47
Ilustración 38- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (4). ....	48
Ilustración 39- Croquis modelo de bastidor 4. ....	49
Ilustración 40- Cálculo de elementos finitos modelo 4 (1). ....	50
Ilustración 41- Cálculo de elementos finitos modelo 4 (2). ....	51
Ilustración 42- Flexión del modelo 4 (3). ....	51
Ilustración 43- Cálculo de elementos finitos modelo 4 (4). ....	52
Ilustración 44- Gráfico deformaciones. ....	54

Ilustración 45- Gráfica ratio deformación/peso.....	55
Ilustración 46- Problemas estructurales y módulos asociados.....	57
Ilustración 47- Bastidor superior montado con el resto de módulos.....	58
Ilustración 48- Refuerzos cerchados en modificación 0 de bastidor superior.....	60
Ilustración 49- Modificación 1 bastidor superior.....	61
Ilustración 50- Modificación 2 bastidor superior.....	62
Ilustración 51- Modificación 3 bastidor superior.....	63
Ilustración 52- Modificación 4 bastidor superior.....	64
Ilustración 53- Modificación 5 bastidor superior.....	65
Ilustración 54- Modificación 6 bastidor superior.....	66
Ilustración 55- Modificación 7 bastidor superior.....	67
Ilustración 56- Modificación 8 bastidor superior.....	67
Ilustración 57- Modificación 1 soporte INA.....	69
Ilustración 58- Modificación 2 soporte INA.....	70
Ilustración 59- Modificación 0 eje 1.....	71
Ilustración 60- Modificación 0 eje 2.....	71
Ilustración 61- Modificación 1 eje 2.....	72
Ilustración 62- Modificación 1 eje 1.....	72
Ilustración 63- Modificación 2 eje 1.....	73
Ilustración 64- Modificación 2 eje 2.....	73
Ilustración 65- Modificación 0 bastidor inferior.....	74
Ilustración 66- Modificación 1 bastidor inferior.....	75
Ilustración 67- Modificación 2 bastidor inferior.....	76
Ilustración 68- Disposición de los nervios sobre la placa base.....	77
Ilustración 69- Modificación 0 nervios.....	77
Ilustración 70- Modificación 1 nervios.....	78
Ilustración 71- Ejemplos de imágenes de cálculos MEF realizados.....	80
Ilustración 72- Cálculo de elementos finitos modificación 1 (1).....	81
Ilustración 73- Cálculo de elementos finitos modificación 1 (2).....	82
Ilustración 74- Cálculo de elementos finitos modificación 1 (3).....	82
Ilustración 75- Cálculo de elementos finitos modificación 1 (4).....	83
Ilustración 76- Cálculo de elementos finitos modificación 2 (1).....	84
Ilustración 77- Cálculo de elementos finitos modificación 2 (2).....	84
Ilustración 78- Cálculo de elementos finitos modificación 2 (3).....	85
Ilustración 79- Cálculo de elementos finitos modificación 2 (4).....	85
Ilustración 80- Cálculo de elementos finitos modificación 2 (5).....	86
Ilustración 81- Cálculo de elementos finitos modificación 3 (1).....	87
Ilustración 82- Cálculo de elementos finitos modificación 3 (2).....	88
Ilustración 83- Cálculo de elementos finitos modificación 3 (3).....	88
Ilustración 84- Cálculo de elementos finitos modificación 3 (4).....	89
Ilustración 85- Cálculo de elementos finitos modificación 4 (1).....	90
Ilustración 86- Cálculo de elementos finitos modificación 4 (2).....	90
Ilustración 87- Cálculo de elementos finitos modificación 4 (3).....	91
Ilustración 88- Cálculo de elementos finitos modificación 4 (4).....	91
Ilustración 89- Cálculo de elementos finitos modificación 5 (1).....	92
Ilustración 90- Cálculo de elementos finitos modificación 5 (2).....	93
Ilustración 91- Cálculo de elementos finitos modificación 5 (3).....	93

Ilustración 92- Cálculo de elementos finitos modificación 5 (4).....	94
Ilustración 93- Cálculo de elementos finitos modificación 6 (1).....	95
Ilustración 94- Cálculo de elementos finitos modificación 6 (2).....	96
Ilustración 95- Cálculo de elementos finitos modificación 6 (3).....	96
Ilustración 96- Cálculo de elementos finitos modificación 6 (4).....	97
Ilustración 97- Cálculo de elementos finitos modificación 7 (1).....	98
Ilustración 98- Cálculo de elementos finitos modificación 7 (2).....	99
Ilustración 99- Cálculo de elementos finitos modificación 7 (3).....	99
Ilustración 100- Cálculo de elementos finitos modificación 7 (4).....	100
Ilustración 101- Cálculo de elementos finitos modificación 7 (5).....	100
Ilustración 102- Cálculo de elementos finitos modificación 8 (1).....	101
Ilustración 103- Cálculo de elementos finitos modificación 8 (2).....	102
Ilustración 104- Cálculo de elementos finitos modificación 8 (3).....	102
Ilustración 105- Cálculo de elementos finitos modificación 9 (1).....	103
Ilustración 106- Cálculo de elementos finitos modificación 9 (2).....	104
Ilustración 107- Cálculo de elementos finitos modificación 9 (3).....	104
Ilustración 108- Cálculo de elementos finitos modificación 10 (1).....	105
Ilustración 109- Cálculo de elementos finitos modificación 10 (2).....	106
Ilustración 110- Cálculo de elementos finitos modificación 10 (3).....	106
Ilustración 111- Cálculo de elementos finitos modificación 10 (4).....	107
Ilustración 112- Cálculo de elementos finitos modificación 10 (5).....	107
Ilustración 113- Evolución de la deformación en los diseños. ....	108
Ilustración 114- Croquis pórtico biempotrado (2). ....	109
Ilustración 115- Croquis pórtico biempotrado (1). ....	109
Ilustración 116- Fuentes de deformación. ....	110
Ilustración 117- Dependencia 1. ....	110
Ilustración 118- Dependencia 2. ....	111
Ilustración 119- Dependencia 3. ....	111
Ilustración 120- Ensamble soporte INA y eje. ....	113
Ilustración 121- Contacto esfera-plano.....	114
Ilustración 122- Contacto cilindro-cilindro.....	114
Ilustración 123- Entorno con bastidor superior. ....	116
Ilustración 124- Croquis momentos flectores.....	117
Ilustración 125- Deformación lado de la ventana.....	118
Ilustración 126- Esquema barra biempotrada .....	120

## 1. INTRODUCCIÓN

La distribución a nivel mundial de la actividad industrial ha experimentado un profundo cambio en las últimas décadas. Se observa un proceso de desindustrialización en prácticamente la totalidad de los países desarrollados. A nivel internacional, el proceso de industrialización se encuentra ampliamente estudiado y presenta un patrón que se repite en la mayoría de los países. Primeramente, se encuentra una etapa de aumento de la proporción de empleo en el total, así como una contribución del sector al valor añadido bruto (VAB) de la economía. Posteriormente llega la desindustrialización; este terreno ganado comienza a reducirse en favor de los servicios. Al mejorar la productividad, el empleo suele descender más rápidamente que la contribución económica. De esta manera la industria tiende a asociarse a mayores salarios medios [1].

Este proceso de desindustrialización se explica por varios factores, entre los que destacan las ganancias derivadas del proceso tecnológico, la deslocalización de gran parte de la producción y la subcontratación de determinados servicios que anteriormente eran realizados por las propias empresas y ahora pasan a ser contabilizados en el sector servicios.

En España, así como en Europa en general, tal y como se aprecia en la Ilustración 1- Peso del sector manufacturero español. este proceso se dio sobre todo en la década del 2000. En 2018 (pre-COVID19), el sector manufacturero en España se situó en el entorno del 11.25% del PIB [3], manteniéndose prácticamente constante desde 2014.

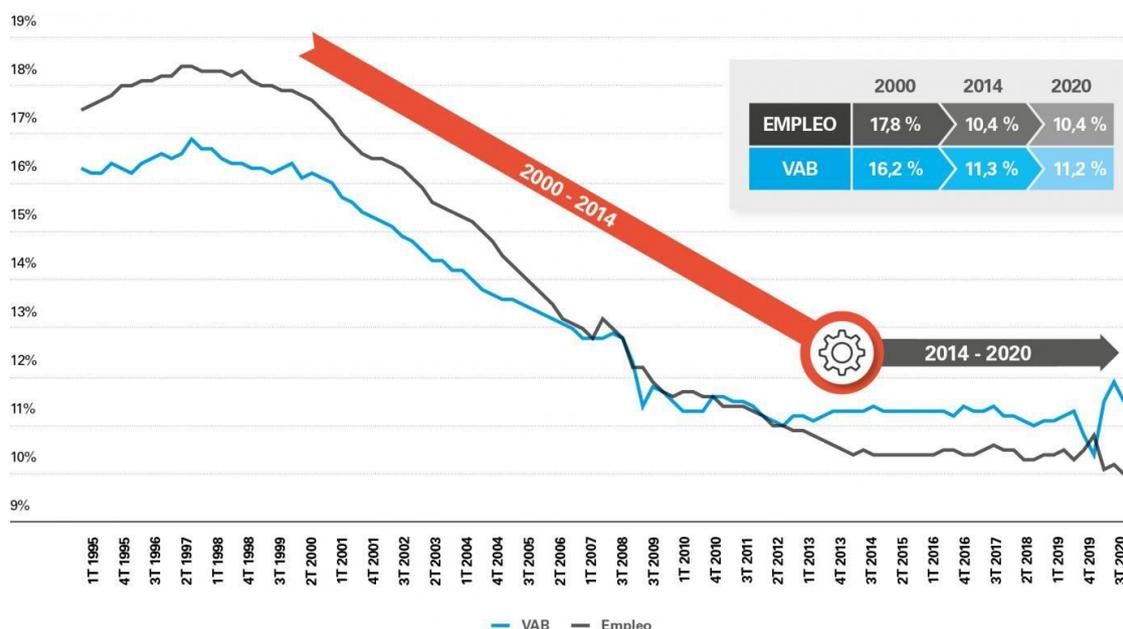


Ilustración 1- Peso del sector manufacturero español [2].

A pesar de haber perdido peso respecto al resto de sectores en estas dos últimas décadas, sigue suponiendo un gran valor dentro del conjunto económico. Actualmente el sector industrial desempeña un papel fundamental en el progreso tecnológico, debido al efecto que provoca difundiendo la tecnología a otros sectores de actividad y, en general, a toda la sociedad.

En ocasiones este sector se sume en un ritmo frenético de intensidad productiva. Una carrera a contrarreloj para poder producir y generar dentro de plazos ajustados; aquí el valor lo genera

el trabajo logístico y de organización, maximizar los beneficios con los recursos que hay disponibles. En estas circunstancias apenas queda tiempo para preocuparse por los pequeños imprevistos; se evita la ingeniería de mucho detalle, que suele ser costosa y habitualmente más lenta, apostándose por soluciones más rápidas y que den un rendimiento inmediato. La filosofía de trabajo en estos casos se resume en sacar el proyecto adelante en el menor tiempo posible.

Siendo ésta la metodología dominante, en el camino van quedando muchos problemas por resolver que tarde o temprano hay que hacer frente con una ingeniería de más nivel. Este trabajo se centrará en uno de ellos y tratará de encontrar una solución siguiendo los criterios que priman en este sector; simplicidad e inmediatez productiva y economía.

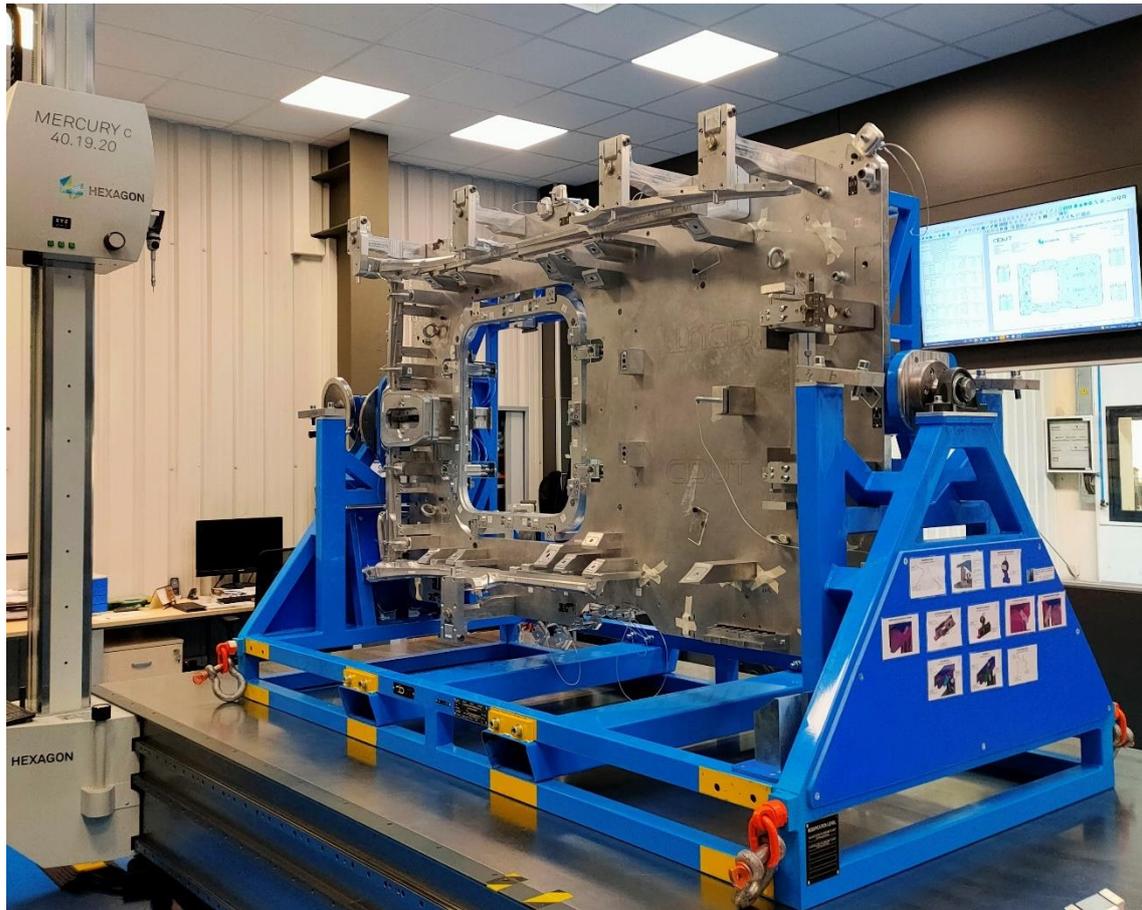
En las siguientes páginas se detalla la propuesta de diseño de un bastidor real para la empresa CIDUT- *technical tools* [4], un fabricante de utillajes dónde se han llevado a cabo las prácticas extracurriculares que conducen a este TFM. CIDUT se sitúa dentro del sector manufacturero, más concretamente dentro del automovilístico. Se trata de una empresa burgalesa enfocada en la gestión integral de proyectos de utillaje; diseñan, desarrollan y ejecutan proyectos personalizados aportando valor en el proceso productivo.

Estos proyectos están, en su mayoría, destinados a la producción de interiores de techo. Habitualmente los utillajes comercializados van montados sobre un bastidor de acero. Este bastidor sirve de soporte, en ocasiones rigidiza, protege su integridad y facilita el transporte.

Este Proyecto de Fin de Máster gira en torno a un modelo de bastidor para un tipo de proyecto concreto. El bastidor deberá reunir unas condiciones concretas y ser solución de una propuesta clientelar, hasta ahora insatisfecha, o al menos no satisfecha de manera definitiva. Es aquí donde tiene cabida este trabajo, en el diseño de dicha estructura.

Los modelos que se han estado comercializando hasta el momento son diseños fruto de la intuición y el ensayo-error. Se han diseñado y analizado hasta cuatro modelos de bastidor diferentes. Uno tras otro introduce modificaciones y cambios en la estructura, acercándose a una solución que garantice sus estándares de calidad; sin embargo, ninguno de ellos ha llegado a someterse a un estudio de deformaciones. Esto complica la etapa de diseño y deja abierto un problema molesto que reduce el margen de maniobra en el proceso productivo. Por ello se ve como algo necesario introducir un estudio más minucioso de cara a futuro.

Cuando hablamos de deformaciones hablamos de una magnitud que finalmente influirá en la calidad del producto que sale al mercado; el bastidor objeto de estudio tendrá como función principal servir de esqueleto y soportar la instrumentación que llevará encima, un calibre de control. Este calibre está fuertemente condicionado por las solicitudes clientelares; en el área de metrología se le exige una precisión de 0.15 milímetros. En la Ilustración 2- Calibre de control en la sala de metrología. se aprecia este proceso de medición. Si ya es complejo efectuar una fabricación y un montaje con una tolerancia tan ajustada, la deformación que pueda permitir el bastidor se torna un asunto de estudio.



**Ilustración 2- Calibre de control en la sala de metrología.**

En cuanto a la estructura del trabajo, en primer lugar, figura una memoria en la que se recogen cuestiones que afectan directamente a la razón de ser del proyecto, se abordan objetivos, alcance del trabajo y beneficios que aporta. Asimismo, se exponen y comentan los estudios de tensiones y deformaciones de los bastidores modelizados hasta ahora y se propone una solución más trabajada.

Una vez definida la solución adoptada se plantea la metodología que se llevará a cabo. Se describe la evolución del trabajo según sus fases, así como los resultados obtenidos. Se aporta información técnica que ayuda a materializar la propuesta. Igualmente se detallan los aspectos económicos. Se aporta un pequeño presupuesto y se justifica la viabilidad del proyecto.

Por último, se encuentran unas conclusiones que resumirán en términos generales los aspectos más importantes anteriormente tratados.

## 2. CONTEXTO

---

Grupo Antolín [5] es un proveedor global de soluciones tecnológicas para el interior del automóvil. Se trata de un entramado empresarial con más de 27.000 empleados repartidos a lo largo de 26 países. Entre sus productos se encuentran techos, puertas y revestimientos, *cockpoints*, sistemas de iluminación, sistemas electrónicos y sistemas integrados en general.

En este entramado se encuentra CIDUT que, a su vez, es una empresa enfocada en la gestión de proyectos de utillaje en aluminio para la fabricación de techos del interior del automóvil. Desarrollan proyectos personalizados, desde el diseño CAD y la gestión del mecanizado en CAM en la zona de oficina, el posterior montaje en la zona de taller hasta la etapa de verificación y medida en el área de metrología. Aquí es dónde llevé a cabo mis prácticas académicas, alternando trabajo entre el departamento de calidad y el departamento de diseño.

Su producción se basa principalmente en tres tipos de producto: moldes para el termoconformado, útiles *waterjet* (para corte por agua) y útiles de control. Estas tres soluciones se venden en conjunto para cada modelo de techo. Si bien la filosofía y el funcionamiento de cada útil es el mismo en casi todos los proyectos, cada uno es diferente al resto en cada caso. Las solicitudes del cliente los hacen únicos y exigen una atención personalizada en cada etapa de su creación. A continuación, se comentará más en profundidad los tres tipos de productos antes comentados.

## 2.1 MOLDES

Los moldes son el utillaje utilizado en la primera etapa de fabricación de los techos. Como se ve en la Ilustración 3- Molde AUDI A436 cerrado., constan de dos partes, una superior o macho, y una inferior o hembra. Su función es conseguir que el techo adquiera la forma indicada. El proceso en este caso es bastante intuitivo.



Ilustración 3- Molde AUDI A436 cerrado.

Primero, una lámina en bruto de fibras poliméricas se introduce en su interior. Un sistema de tensado, de formas muy variadas según el proyecto en el que se esté trabajando, asegura que el bruto no adquiera arrugas durante el proceso de prensado. Se introduce deslizando sobre unos soportes colocados en los extremos y después es fijado mecánicamente sobre el perímetro del macho a través de unos pinchos o tenedores. Estos pinchos se enclavan sobre el techo immobilizando e impidiendo su contracción una vez que el molde comienza a cerrarse.

Una vez asegurada la firmeza del bruto, el molde se cierra y comienza el proceso de termoconformado. Ambas caras, macho y hembra, se encuentran a una temperatura superior a 150°C, transmitiendo calor y reblandeciendo así el bruto del techo. Este proceso de calentamiento se produce haciendo circular un fluido calentador a través del molde. Conforme comienza a cerrarse, la lámina va haciendo contacto con ambas caras y va reproduciendo la geometría de las superficies: asideros, consola, pilares, iluminación... etc. Pasado un tiempo, aproximadamente 10 o 20 segundos, el termoconformado termina y puede decirse que el bruto polimérico ya ha adquirido la forma geométrica que se desea.



Ilustración 4- Detalle de punzón neumático.

Después de este conformado, y con el molde solidario aún, se mecanizan agujeros en el propio techo (uno o dos según el proyecto). La función de estos agujeros es poder centrar la pieza en las siguientes operaciones. Servirán para colocarla sobre los siguientes utillajes con precisión y poder ejecutar las operaciones correctamente. Se activan unos punzones neumáticos situados en la parte interna de la hembra que impactan sobre una sufridera colocada en el macho. En la Ilustración 4- Detalle de punzón neumático. Requieren de su propio sistema neumático, alternativo al sistema de calentamiento. Suele poder apreciarse a simple vista puesto que muchas veces los cables por los que circula el fluido, siempre aire, se disponen por algunas zonas del perímetro del molde.

Los techos que se vayan a fabricar pasarán por dos operaciones además de este conformado; corte y verificación. Hay que tener en cuenta que son operaciones de igual importancia que ésta primera, puesto que de ellas también depende la consecución de una calidad adecuada en cuanto a medidas y tolerancias. Posteriormente, cuna y maqueta, dispondrán de un piecerío que encajará en el interior de los agujeros punzonados durante la etapa de moldeo, situando el techo para su manipulación. De ahí la necesidad de conseguir un sistema de centrado del techo lo más preciso posible.

Por último, una vez terminadas todas las operaciones, a través de un muelle se activan unos émbolos que despegan el techo de las superficies del molde. Se extrae y se dispone para la posterior operación de corte.

El proyecto de fabricación del molde se ejecuta de manera integral en CIDUT. A partir de un macizo de aluminio en bruto se mecaniza en la zona de producción en fresadoras puente y centros de mecanizado propios. Posteriormente es trasladado a la llamada zona de taller, donde se pule, se limpia y se coloca todo el piecerío que requiere. Este piecerío es comprado por encargo previamente a empresas suministradoras que rodean CIDUT.



**Ilustración 5- Detalle de proyecto I+D+I en una placa hembra.**

Como se ve, un molde posee un trasfondo algo más profundo de lo que se podría pensar en un principio. Incluso dentro de este campo se llevan a cabo tareas de desarrollo en la morfología o superficie. Un ejemplo de ello es la Ilustración 5- Detalle de proyecto I+D+I en una placa hembra. Más allá de lo expuesto, quedan por comentar algunas características de carácter más secundario.

El macho y la hembra se acoplan entre ellas a través de cuatro sistemas de guiado. Según el tipo de proyecto y los deseos del cliente puede variar, aunque el funcionamiento siempre suele ser el mismo. El macho lleva montadas las llamadas columnas, mientras que la hembra posee su negativo, unos soportes en los que van montadas las cachas. Ambos tipos de pieza están fabricados en acero.

Cuando ambas caras del molde van a acoplarse, el primer contacto se da entre columnas y cachas. Las columnas van deslizando verticalmente sobre las cachas, centrando y posicionando correctamente el macho sobre la hembra. El juego entre columna y cacha es muy limitado, por lo que la operación de montaje y la verificación del piecerío una vez comprado es vital.

Ambas partes constan también de 14 o 16 topes que permiten dejar el espaciado necesario para conformar correctamente el techo. Sobre 4 de estos topes se colocan las conocidas como cazoletas (Ilustración 6- Detalle de cazoleta y sistema de guiado. Estas cazoletas son un paralelepípedo en acero unidas a los topes mediante unas bisagras. Cuando el molde se cierra en taller las cazoletas se colocan entre los topes del macho y la hembra, dejando un espaciado de seguridad. Cuando el molde llega a su lugar de trabajo, simplemente son retiradas e ignoradas. Se trata de un mecanismo simple para no forzar demasiado el molde durante los periodos de no funcionamiento, sobre todo en la etapa de transporte.



Ilustración 6- Detalle de cazoleta y sistema de guiado.

Otro apartado interesante es el sistema de calentamiento. Para poder alcanzar los 150°C requeridos para la operación, dependiendo del proyecto se utilizan aceite o vapor como fluidos calentadores. Este fluido se hace correr a través de un serpentín mecanizado en el interior del molde. En caso de que hablemos de vapor, además del circuito de calentamiento se mecanizarán unos agujeros y se colocará en la superficie un piecerío llamado alcachofines que ayudarán a regular y liberar presión en caso de que fuera necesario.

Hay que tener en cuenta que hablamos de metros de agujero para poder formar el serpentín, conducto por el que viaja el fluido calentador. Para poder mecanizar estos agujeros hay que recurrir a herramientas particulares. El bruto de aluminio es trasladado a una empresa especializada en taladrado situada en Álava antes de comenzar a trabajar sobre él.

## 2.2 CUNAS

Una vez conformado y establecida la forma del techo, el siguiente paso es la operación de corte; hay que definir el contorno y las secciones interiores del techo. Normalmente se suele emplear el corte por agua, aunque puede darse también el corte láser. Para esta operación se diseñan estos útiles, que popularmente se denominan cunas. Como se puede ver en la siguiente imagen (Ilustración 7- Cuna FORD DBL. el tamaño es parecido al del molde, pero de peso significativamente menor, puesto que, aunque a simple vista pudiera parecer un bloque macizo de aluminio en realidad se trata de una superficie colocada sobre unos apoyos y cerrada lateralmente por un carrozado. El proyecto de las cunas también se ejecuta íntegramente en CIDUT; tanto la placa base como la superficie se mecaniza allí, así como el montaje y la gestión de calidad.

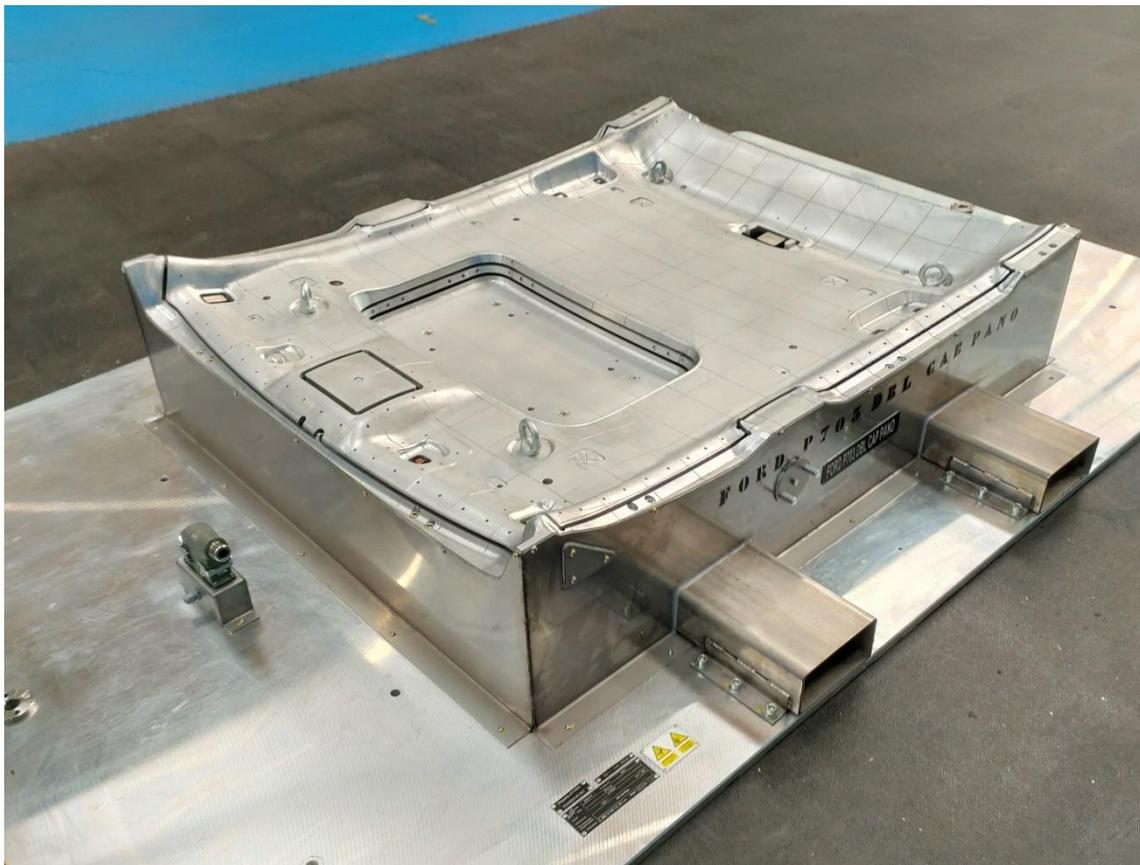


Ilustración 7- Cuna FORD DBL.

Este tipo de mecanismos de corte son especialmente útiles a al ahora de tratar estos materiales poliméricos. Se viene imponiendo esta tecnología por varias ventajas.

Primero, por su versatilidad; en este tipo de proyectos de techo los cortes son siempre irregulares dependiendo totalmente de su contorno. Por otro lado, si bien la producción puede ser de largas tiradas, lo habitual es que haya constantes modificaciones en los proyectos incluso a lo largo de su ejecución, por lo que para los cortes por agua y láser este grado de imprevisibilidad no supone problemas.

Segundo, por su forma de funcionamiento. El corte por agua es un tipo de corte en frío. Esto supone un beneficio, ya que después del termoconformado es preferible que no haya

transferencias de calor hacia el polímero. En el caso de que el techo fuera a ser revestido, no habría problema con su posible influencia sobre la tela de la cara vista.

Años atrás se fabricaban proyectos de utillaje mucho más variados, para cualquier sector industrial, pero con el paso de los años CIDUT fue especializándose en el automovilístico y más concretamente en el campo de soluciones para techos, área en la que se impone el uso del corte por agua. Aunque para el caso de utillajes industriales en general sí que había una alternancia entre un estilo y otro, incluso llegando a tener más importancia el corte por láser, lo cierto es que actualmente todas las cunas que se emiten están pensadas para trabajar con agua.

El funcionamiento de la cuna es algo menos conocido e intuitivo que el del molde, aunque no más complejo. Se trata de un utillaje que sirve únicamente como emplazamiento y dotación para la operación de corte. El techo conformado se coloca sobre la superficie de aluminio, se orienta gracias al sistema de centrado. Un correcto punzonado garantiza que ahora el corte tome las distancias correctas dentro de la geometría. De otra manera los techos podrían no resultar simétricos, quedar torcidos, o simplemente no encajar bien posteriormente sobre la carrocería del vehículo. Los llamados CPS (*Centralizing part system*) y los centradores laterales, piecerío muy preciso, tienen la función de centrar y colocar el techo en su emplazamiento. Mientras que los CPS sujetan la superficie del techo, los laterales o *waterjet*, se sitúan en la parte del bruto sobrante. Se sigue hablando de una tolerancia exigida de 0.2 milímetros en estos casos.



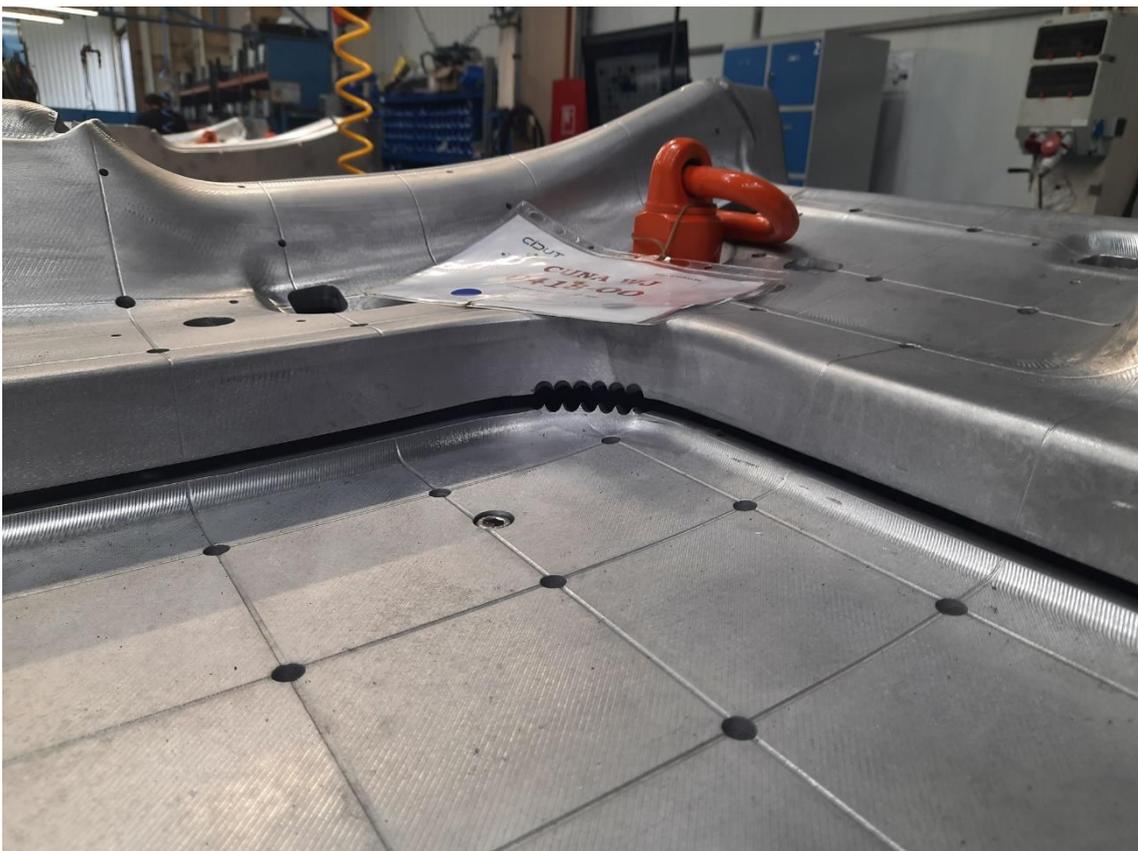
Ilustración 8- Detalle centradores CPS.

Después de centrarlo, se activan unos pisadores colocados a los lados de la cuna. Se trata de unas chapas de acero con la misma forma de la parte de la cuna en la que harán contacto. Estas chapas van acopladas directamente a un servomotor que es activado a través de un sistema neumático. Este sistema neumático a su vez, es alimentado con un compresor que a su vez está alimentado con un sistema eléctrico. El cableado correspondiente a estos dos sistemas (ejemplo en ilustración 9- Detalle pisadores (rojo) y sistemas neumático y eléctrico (azul)), como en el caso de los moldes, va colocado a lo largo del perímetro de la cuna y puede apreciarse a simple vista. Su función es ejercer presión sobre el techo para que éste no se mueva verticalmente durante la operación de corte, ya que el chorro a presión va a incidir en esta misma dirección. El servomotor colocado en un extremo actúa de bisagra y hace girar la chapa hacia el utillaje, colocando la parte del pisador encima. Si bien es cierto que este sistema de fijación suele ser habitual en las cunas que se fabrican, es una solicitud de cliente y puede darse el caso de que haya proyectos de utillaje en los que no se necesite montar.



**Ilustración 9- Detalle pisadores (rojo) y sistemas neumático y eléctrico (azul).**

Una vez colocado y asegurado el techo, se da comienzo a la operación de corte, previa programación de la máquina y referenciado de la cuna. Este tipo de corte permite un alto nivel de detalle que muchas veces es requerido por el cliente: esquinas, zona del asidero, consola, dibujos, etc. En la Ilustración 10- Detalle mecanizado en cuna. puede apreciarse un detalle de este tipo. El chorro va recorriendo todos aquellos contornos del aluminio, seccionando el techo del bruto restante. Una vez finalizada la operación, simplemente se retira el techo ya terminado y dispuesto para su verificación.

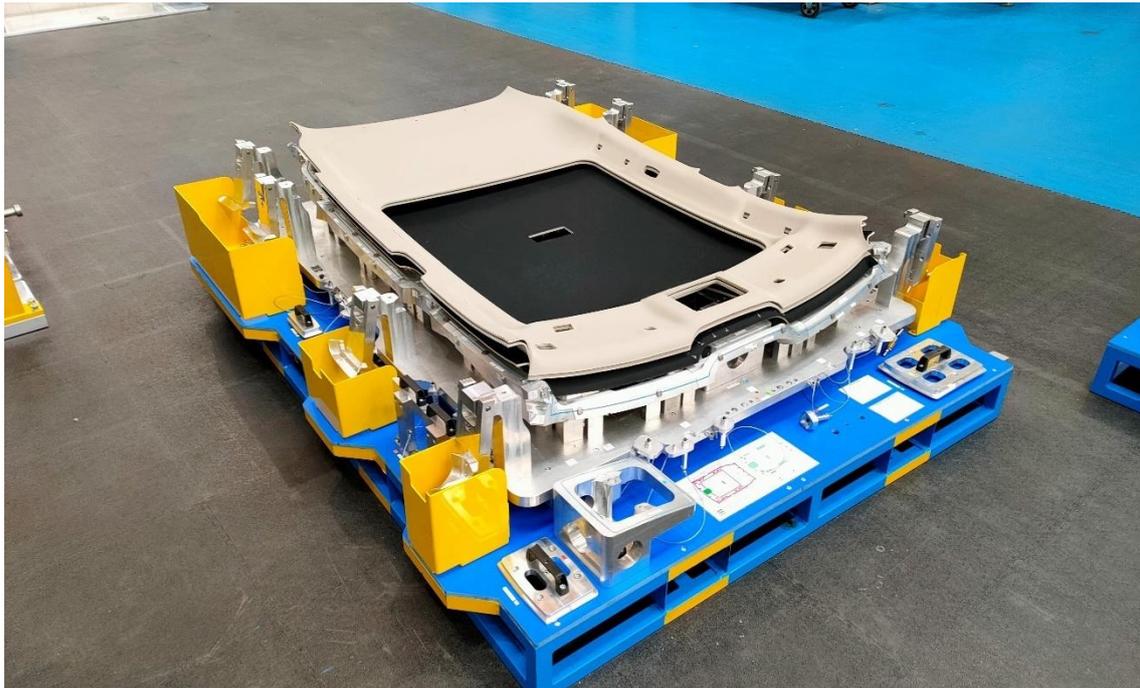


**Ilustración 10- Detalle mecanizado en cuna.**

El interior de la cuna, como ya se ha comentado, es hueco. Colocadas en la base tiene un conjunto de chapas llamadas deflectoras que van a parar a la superficie de los agujeros de la cuna, impidiendo que el material que se corta del techo vaya a parar al interior. Se pueden apreciar sobre todo en las zonas de la consola y los asideros.

## 2.3 CALIBRES DE CONTROL

Los calibres de control son conocidos a nivel interno como maquetas. Después de las operaciones de conformado y corte, el techo ya está casi listo para ser montado; queda únicamente su revisión. Puesto que las operaciones anteriores son totalmente independientes, no es absurdo pensar que podrían surgir disconformidades entre una y otra; no estar bien situado el corte respecto del conformado o viceversa, una mala ejecución de uno de los dos procesos, o simplemente un imprevisto que repercute en la integridad del producto. Independientemente de ello, es necesario que en todo proceso de fabricación se lleve a cabo una evaluación final. Es aquí donde entran en juego estos calibres de control.



**Ilustración 11- Techos dispuestos sobre maqueta.**

Si bien no aporta ninguna operación que modifique su forma, asegura que el techo cumplirá las dimensiones especificadas por el cliente. Se trata de un elemento para poder revisar el techo a nivel dimensional; como se puede ver en la Ilustración 11- Techos dispuestos sobre maqueta. el techo es colocado encima para poder verificar sus medidas. Su morfología se basa en una placa de aluminio, maciza o aligerada, sobre la que se colocan una serie de piezas de aluminio llamadas postizos y afloramientos que simulan los contornos y fijaciones del techo del vehículo. Estos postizos son encargados a empresas externas, especializadas en mecanizados de precisión de piecerío pequeño. Aunque en apariencia el techo interior de un vehículo no es un elemento que aporte mucho valor al producto del coche en general, las exigencias clientelares son absurdamente elevadas. Se habla de tolerancias exigidas de 0.15 milímetros en cada uno de los insertos, y 0.05 milímetros en dos insertos en concreto (centradores 2W, Ilustración 13- Centrador 2W. y 4W, Ilustración 12- Centrador 4W.) que hacen de centrado durante esta etapa. Como es lógico en estas circunstancias el valor que se aporta a este utillaje viene sobre todo en su ajuste y medida. Si bien el diseño corre de parte de estas empresas externas, éste es otro de los motivos por los que CIDUT no se encarga de mecanizar y producir todos estos insertos y se centra en la puesta a punto.



Ilustración 12- Centrador 4W.



Ilustración 13- Centrador 2W.

Estos postizos que lleva montados tratan de simular todos los elementos constructivos de la carrocería de un vehículo, así como algunas geometrías complicadas que puede necesitar el techo. Comunes a todas las maquetas suelen ser los afloramientos del volumen, colocados a lo largo de todo el perímetro del coche, los postizos de los asideros, normalmente cuatro u ocho en función del tipo de vehículo, el postizo delantero de la consola, que simula el emplazamiento de todo el sistema interior de iluminación del vehículo, y los abatibles, seis u ocho pilares que se colocan en la parte externa de la placa, y que llevan acoplados unos insertos que aseguran el techo para su comprobación. Más allá de estos elementos, cada proyecto de coche puede requerir postizos de geometrías diferentes, por ejemplo, postizos que simulen el contorno de una posible ventana interior, insertos para simular la luz interior trasera, el emplazamiento del cinturón de seguridad o en general cualquier especificación.

Su funcionamiento se asemeja al de un calibre pasa-no pasa. Habitualmente todos los afloramientos que encajan en el borde del techo llevan mecanizado un surco en el que va pintado un trazo de color azul como el de la Ilustración 14- Detalle trazo azul sobre afloramientos y reglillas.. Este trazo es una de las partes clave de la maqueta. Define el límite donde debe encontrarse la periferia de nuestro techo, de tal manera que una vez se coloca encima de la maqueta, su contorno debe estar a la altura de este trazo. Si sobresale o queda corto por alguna zona, puede apreciarse de un primer contacto visual; en ese caso el producto no será apto. Para una primera inspección visual, el trazo también lleva insertado en cada afloramiento del volumen, dos reglillas que miden en milímetros en dirección perpendicular. De este modo se puede generar una primera idea de la desviación que tiene esa parte del contorno.

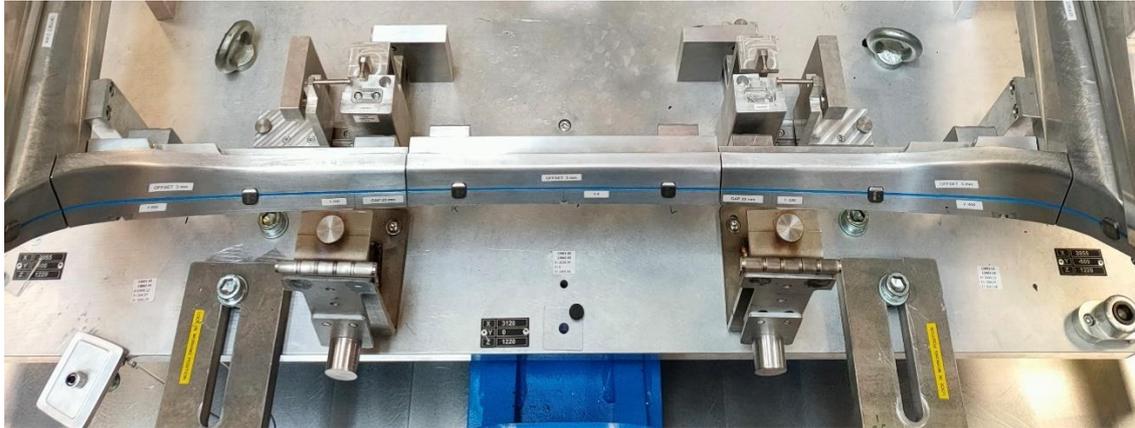


Ilustración 14- Detalle trazo azul sobre afloramientos y reglillas.

Adicionalmente, en cada zona definida por cliente se situarán unos relojes comparadores, que medirán con más precisión la desviación del techo. Estos relojes se colocan en puntos concretos, en emplazamientos que están preparados para alojarlos. Están dispuestos sobre soportes diseñados por CIDUT con morfologías diferentes según la dirección o el lugar en el que vayan a tomar la medida. Como se puede ver en la imagen, el afloramiento lleva practicado una cajera. Sobre esta cajera va colocado el soporte del reloj y un dispositivo digital que registra la medida. Gracias a este dispositivo se recogen todas las medidas y se envían digitalmente a un ordenador para poder compararlas con la medida que registra un reloj principal o patrón que actúa sobre una pieza alternativa o calibrador.

Existen varios tipos de reloj en función de la zona a medir. En principio su funcionamiento es el mismo, pero su emplazamiento y dimensión a medir son diferentes. Se pueden colocar relojes de longitud, de volumen, *rear retainer*, etc. En las imágenes siguientes (Ilustración 15- Reloj de volumen sobre afloramiento y reglillas. e Ilustración 16- Reloj de longitud (1) sobre calibrador.) se pueden apreciar dos ejemplos. Estos relojes son comprados externamente a empresas del campo de la metrología y enviados a un laboratorio para ser calibrados antes de su montaje. En algunas maquetas puede llegar a haber hasta 20 o 30 relojes comparadores que permiten hacer una valoración cuantitativa final de las dimensiones del techo.

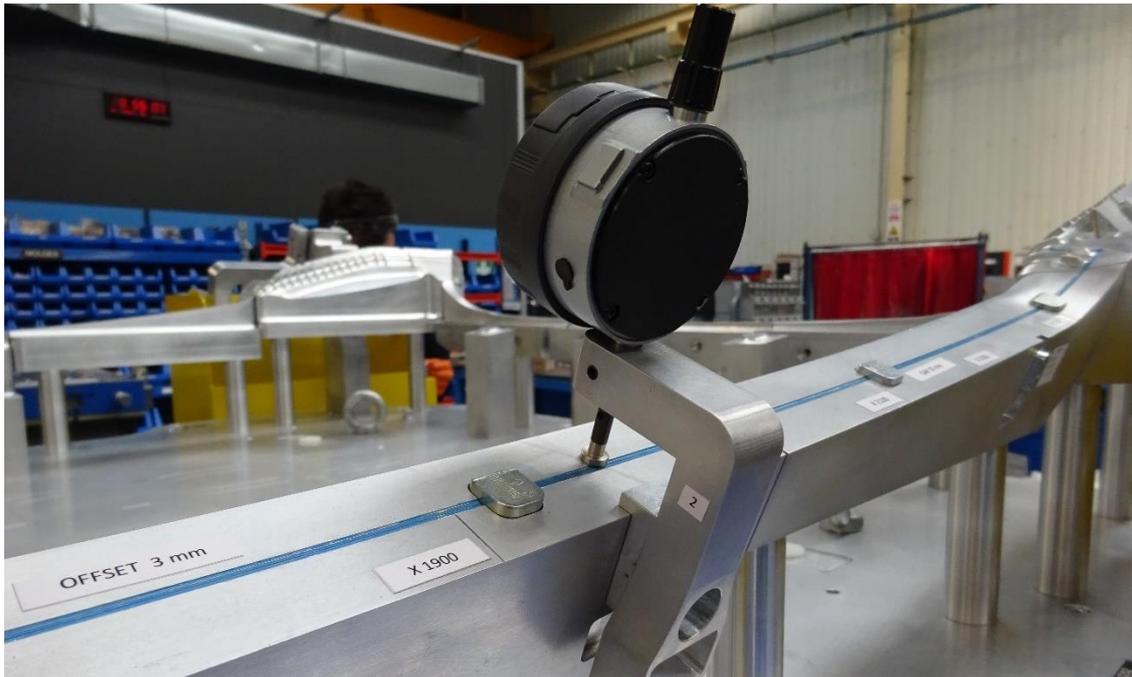


Ilustración 15- Reloj de volumen sobre afloramiento y reglillas.

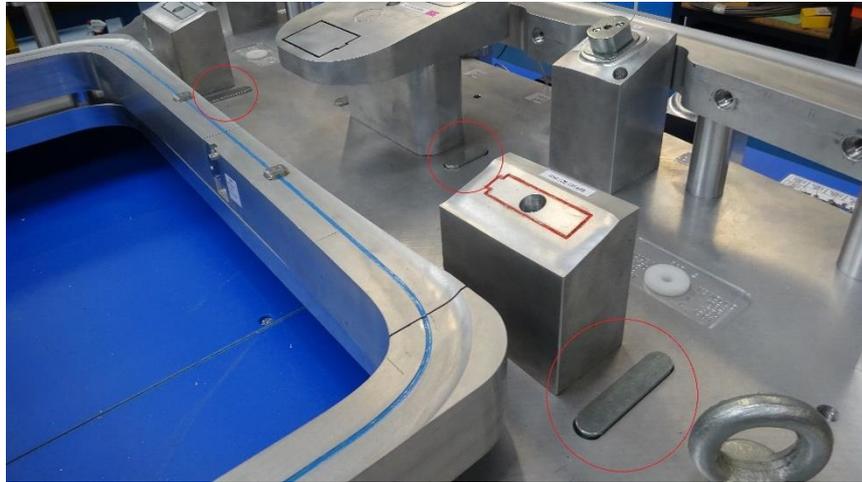


Ilustración 16- Reloj de longitud (1) sobre calibrador.

El techo se coloca encima del calibre, encajando perfectamente sobre él. Una vez colocado, los abatibles de los extremos sujetan el techo contra los afloramientos. Se suelen diseñar ocho abatibles simétricos; cuatro a cada lado de la maqueta. Una vez asegurado el techo puede comenzar la etapa de medida.

En ocasiones, la maqueta requiere poder comprobar dos techos del mismo modelo, pero de dimensiones diferentes. En estos casos, la maqueta se diseña para poder ajustar aquellos

postizos que se necesite. Habitualmente lo que se hace es mecanizar unas cajas debajo de cada pieza para poder calzarla o descalzarla con una chaveta según se necesite (Ilustración 17- Detalle calces de insertos.). De este modo se regula su altura. En el caso de los afloramientos que simulan la periferia de la ventana, se suele incorporar un sistema neumático que alimenta unos émbolos lineales. Estos cilindros elevan toda la estructura, normalmente en concordancia con el resto de calces.



**Ilustración 17- Detalle calces de insertos.**

Todas estas maquetas van montadas sobre un bastidor de acero. Este bastidor es encargado a una empresa externa que trabaja habitualmente con estos materiales. Normalmente para su diseño se hace uso de perfiles rectangulares que van soldándose entre sí hasta formar un entramado que rigidiza la estructura. Protege y facilita la movilidad del calibre permitiendo su transporte

Hasta ahora se han comentado las características comunes de todas las maquetas en cuanto a funcionamiento y morfología. Sin embargo, según el proyecto la forma y disposición puede tener otras peculiaridades. Una de estas peculiaridades es la posición de la maqueta. La evolución del mercado del automóvil ha ido haciendo cada vez más exigentes las solicitudes pedidas en sus subcontrataciones. En ocasiones estas solicitudes podría decirse que tienen casi un motivo romántico, puesto que no aportan ningún valor al producto en cuestiones de calidad o confort. En cualquier siguen siendo cuestiones a tener en cuenta que reportan un beneficio a la organización. Los diseños se pliegan sobre estas peticiones adaptándose a deseos cada vez más exigentes. Se habla principalmente de dos cuestiones:

En primer lugar, la evolución en las tolerancias de estas maquetas. Actualmente como ya se ha comentado, se considera 0,15 milímetros de margen de desviación en la medida, llegando a ser de 0.05 en las brochas de centrado. Como es evidente, un mal cuidado de la maqueta, un transporte efectuado sin mucho cuidado o en general cualquier circunstancia desafortunada puede sacar el producto de tolerancia; en ocasiones estamos hablando de dos o hasta tres uniones atornilladas de elementos. Esta tolerancia ha ido haciéndose cada vez más restrictiva con el paso de los años, llegando hasta un punto casi absurdo. Pese a todo, amenaza con seguir disminuyendo cada vez más.

En segundo lugar, la posición en la que se comprueba el techo. Podría decirse que esta cuestión viene motivada por un deseo casi romántico. El cliente quiere ejecutar la evaluación en la posición real del techo. Para ello en ocasiones exige que el bastidor coloque el techo boca abajo,

o directamente que el bastidor sea giratorio y permita su comprobación en las dos posiciones, arriba y abajo.

En el primer caso hablamos de las maquetas con el pronombre HD04 como la de la Ilustración 18- Maqueta HD04 en sala de metrología.. Esta nomenclatura indica que el techo se colocará boca abajo directamente. El bastidor se sujeta sobre cuatro apoyos conteniendo todos sus afloramientos e insertos apuntando hacia la superficie del suelo. En esta posición incluso se han llegado a incorporar sistemas de iluminación sobre la maqueta para poder simular como da lugar sobre el propio techo y poder analizar donde se producen las sombras. Si bien es cierto que esta posición no incluye demasiados problemas durante la etapa de montaje o medición, podría pensarse que pese a todo puede dar más problemas que beneficios durante la etapa de evaluación, puesto que la sujeción del techo se hace más complicada, la comprobación es menos confortable, etc.



**Ilustración 18- Maqueta HD04 en sala de metrología.**

En el segundo caso hablamos de las maquetas con pronombre HD02. Estas maquetas requieren poder comprobar el techo en dos posiciones: boca arriba y boca abajo. Evidentemente para cumplir esta petición, no hay otra alternativa que conseguir que la maqueta efectúe un giro sobre uno de sus ejes. Para ello deberán diseñarse dos bastidores, uno superior que se acople directamente a ella, como en el resto de maquetas y otro inferior que se acople a este primero y permita su giro. Esto lleva a una situación en la que el primer bastidor, el superior, estará biapoyado a través de dos ejes dispuestos en sus extremos. Por una cuestión de tamaños, se elige su eje longitudinal para girar sobre él tal y como se ve en la Ilustración 19- Maqueta HD02 en sala de metrología en posición HD02.. Hablamos de una distancia entre apoyos de al menos dos metros, por lo que es habitual que simplemente la propia flexión saque a la maqueta de la tolerancia exigida. Esto conduce a diseños muy robustos sobre todo del bastidor superior, que es el que rigidiza la maqueta.



Ilustración 19- Maqueta HD02 en sala de metrología en posición HD02.

### 3. OBJETIVOS

---

El objetivo principal del proyecto es diseñar un modelo de bastidor que mejore los que se han estado utilizando hasta este momento. Afirmar que se ha alcanzado supone cumplir por un lado la condición de obtener unas deformaciones relativas menores en la placa base, y por otro lado la condición de modelizar un bastidor económicamente más barato.

Su consecución viene condicionada por una manera de proceder y unos criterios para determinar que se ha alcanzado la solución más adecuada. De él se extraen a su vez dos condiciones que deben darse para llegar a cumplirlo.

→ Para justificar el aspecto de las deformaciones se llevará a cabo un estudio de elementos finitos, analizando el grado de flexión que alcanzan los tres modelos anteriores y la nueva propuesta. Como se ha comentado anteriormente, los antiguos modelos seguían un método experimental, de ensayo y error. La etapa de diseño estará respaldada por criterios de diseño que darán sentido a su morfología. La reducción de deformaciones aportará valor al producto, ya que se trata de solicitudes de cliente y lo dotarán de más fiabilidad.

→ En el aspecto económico influirá la simplicidad del conjunto. Incluyendo menos cantidad de acero, menores cordones de soldadura, así como geometrías simples, se obtendrá un presupuesto más ajustado. La simplicidad afectará económicamente al conjunto; un diseño sencillo se traduce en una fabricación más cómoda y por tanto más barata. Si bien el coste económico es un factor importante a la hora de decidirse por un modelo u otro, en este proyecto se le dará una mayor importancia a la calidad del producto. Un correcto comportamiento estructural primará por encima de condicionantes económicos.

Paralelo a esto encontramos un objetivo secundario; una cuestión más bien personal. Después de la etapa de iniciación profesional haciendo prácticas, cumplimentar este trabajo supone un complemento a mis tareas hasta ahora. En esta línea dar sentido a lo que he venido haciendo hasta ahora y supone una buena forma de cerrar esta etapa; es por ello un objetivo personal. Se trata de un proyecto realista en un entorno tangible con el que he tenido el gusto de relacionarme. Proponer un estudio en esta línea y aportar una alternativa nacida de mi creatividad supone para mí una gran satisfacción.

## 4. ALCANCE

---

La intencionalidad del trabajo es el estudio de los cuatro bastidores existentes y la proposición de diseño de uno que los mejore.

Primero se efectuará un análisis de estos modelos, observando la evolución en su forma. Se analizarán las modificaciones, observando y atendiendo a cómo van afectando al estudio. Este análisis incluirá tensiones y deformaciones. Serán comentados, razonando la evolución y extrayendo aquellas soluciones que realmente van aportando valor al diseño.

Después llegará la etapa de crear, en base a criterios de diseño, un nuevo bastidor. Una vez proyectado, se analizará, comprobará y evaluará la mejora. Posteriormente se traducirá a términos económicos y se hará otra comparativa con los que se han venido utilizando hasta ahora.

Durante las etapas de cálculo, se hará uso del método de los elementos finitos a través del software ANSYS. Cabe destacar que los modelos CAD de calibres de control que se proyectan pesan mucho a nivel informático; este archivo contiene información de absolutamente todos los elementos constitutivos, aunque estructuralmente no sea necesario tenerlos en cuenta. Se tendrá que reducir el volumen del ensamble a aquellos elementos que realmente puedan intervenir en la deformación del bastidor; más adelante se detallarán las formas de aligerar este ensamble. De este modo se ahorrará tiempo de computación y se ganará fluidez en el transcurso del proyecto. No se incluirán en ningún caso cargas externas, únicamente la acción del peso propio.

Durante la etapa de diseño se hará uso del software Solid Edge [6]. Si bien es cierto que el diseño se elaborará en base a ciertos criterios, se intentarán mantener algunas características de la línea en la que se venía tratando hasta el momento, por ejemplo, la forma de los perfiles; de este modo el modelo no se alejará demasiado del tipo de producto que habitualmente se utiliza. Previsiblemente esto influirá positivamente en el proceso de fabricación; si por ejemplo no se cambian los espesores y se mantienen geometrías simples se tendrá un proceso de fabricación sencillo. Si bien se reciclarán los componentes que no requieran de modificaciones, en todas aquellas piezas nuevas se ha partido de cero para su creación.

## 5. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

---

Se pretende exponer un estudio del funcionamiento estructural de cuatro bastidores diseño fruto de la experimentación y la intuición, y un quinto que supondrá la solución final, previo diseño en CAD bajo criterios estructurales. Tras este desarrollo se obtienen los siguientes beneficios:

→ Gracias al estudio de los tres primeros bastidores, se proporcionará una idea sólida de la situación en la que se encuentran los calibres ya producidos. Se podrá valorar cualitativamente y de manera más precisa su situación. Por otro lado, se podrá apreciar cuáles son sus vulnerabilidades y así poder corregirlas. Siempre es positivo tener cierto nivel de control sobre el producto; llegado el caso podría haber alguna modificación de un proyecto anteriormente emitido, algo bastante habitual, y ser de ayuda.

→ Con el diseño del modelo definitivo de bastidor, se aporta una solución fiable creada en base a criterios estructurales, y no a la experimentación y al ensayo y error como se venía haciendo. Supone una justificación en un apartado del proceso productivo que hasta ahora no existía. Por otro lado, también acaba con un problema latente que no estaba del todo solucionado.

→ El bastidor será más robusto ante la flexión, lo que significa que se obtendrán menos deformaciones relativas en la maqueta y por tanto más calidad en el producto final. Como ya se ha comentado, el cliente exige una precisión de 0.15 milímetros en la medida, por lo que se trabaja con tolerancias muy pequeñas. Con menores deformaciones el montaje se simplifica y en general se acortan tiempos en la producción y puesta a punto de la maqueta, lo que desahoga el flujo de utillajes en el proceso productivo.

→ Previsiblemente habrá un ahorro económico. El hecho de utilizar menos cantidad de acero y con menores cordones de soldadura, supone un menor coste del bastidor. Pese a todo a priori es complicado saber el nivel.

→ Satisfacción personal. Como se ha comentado antes, la elaboración de este proyecto, aportando una solución nacida de mi propia creatividad supone para mí un reto. Por otro lado, también me satisface poder ayudar de manera independiente a optimizar el proceso de producción y dar sentido así a lo que he aprendido durante el tiempo que he estado en CIDUT.

## 6. ANALISIS DE REQUERIMIENTOS

A continuación, se discutirán las funciones que debe cumplir un calibre de control y más en concreto su bastidor. Seguidamente se hablará de sus requerimientos en cuando a dimensiones, deformaciones y coste que terminarán por limitar y acotar el desarrollo de su diseño. Como es lógico, es importante dejar clara las jerarquías tanto de las funciones como de los requerimientos para más tarde poder abordar la etapa diseño de forma eficaz.

### 6.1 FUNCIONES

La función de las maquetas es clara: permitir la verificación final, a nivel dimensional, de la morfología de un techo de automóvil. En ocasiones esta maqueta debe permitir la verificación en dos posiciones por lo que deberá llevar un soporte que permita su movimiento. Otras veces la verificación se lleva a cabo en una única posición, bien sea boca arriba o bien boca abajo. En cualquier caso, siempre se requiere de una estructura que la sujete y facilite tanto el proceso de verificación como su manipulación. Aquí se introduce el concepto de bastidor: estructura metálica, habitualmente en acero, capaz de fijar la maqueta.

La función del bastidor es dar este soporte a la maqueta. Debe situarse por debajo, atornillado a ella de manera solidaria, sin holguras. La posición en la que el cliente quiera llevar a cabo la comprobación dimensional determinará su forma. El caso concreto del estudio se trata de una maqueta HD02 giratoria, por lo que debe permitir su movimiento sobre el eje longitudinal a la vez que la sujeta y la rigidiza impidiendo una flexión excesiva. No hay un estándar para las formas, sino que corre a cuenta de la imaginación y la experiencia. Los proyectos en los que trabaja CIDUT son lo suficientemente personalizados como para no poder estandarizarse. Si bien las soluciones están algo acotadas por el tipo de producto, hay un nivel de detalle bastante profundo hasta donde el cliente puede decidir. En cuanto a funcionalidad, se encuentra también la movilidad. El bastidor también debe ser una herramienta para poder mover con facilidad la maqueta. De ahí que se coloquen pasos de palas (transpaletas) y cáncamos (puente grúa) en la parte inferior. En las Ilustración 20- Detalle cáncamos y paso de palas. y Ilustración 21- Agarre bastidor HD04 para eslingas de tela. se puede observar estos instrumentos de sujeción.



Ilustración 20- Detalle cáncamos y paso de palas.



**Ilustración 21- Agarre bastidor HD04 para eslingas de tela.**

En ambos casos podemos decir que se prioriza primero la calidad del producto; su no deformación en el momento de ser utilizado. Por otro lado, sumidos en un entorno productivo y frenético, se debe buscar un máximo de beneficio en la venta de la maqueta. Se conseguirá este objetivo buscando una distribución eficiente del material, yendo más allá de la forma de trabajo intuitiva y experimental que se ha utilizado hasta ahora.

## 6.2 REQUERIMIENTOS EN CUANTO A DIMENSIONES

Evidentemente la dimensión de la maqueta condiciona la del bastidor. A su vez, la altura de la parte fija condiciona en cierto modo la anchura de la parte móvil, puesto que en nuestro caso el bastidor ha de poder efectuar un giro de 180º sin problemas. Se aprecian un montón de agujeros en la placa base del calibre. Sobre estos agujeros irán montados posteriormente un montón de postizos que en ocasiones requieren de manipulación posterior. La tornillería del bastidor, así como sus apoyos no deben cubrir ni interferir con la de estos insertos, algo a tener en cuenta sobre todo en el momento de definir la forma de la maqueta y los calces del bastidor.

Las dimensiones de los ejes y el bastidor inferior también han de ir en consonancia. Si el eje va soldado solidariamente al bastidor rotativo, necesitará de un espacio a su alrededor para poder moverse, al igual que él. La maqueta no deja de ser un ensamble en el que todos sus elementos han de encajar de forma planificada, sin interferir entre ellos.

Durante la etapa de diseño experimental y prueba, se pasan por modelos de diferentes formas y dimensiones, con la tendencia de hacerse progresivamente más anchos y robustos, pero siempre condicionados por estas circunstancias. Finalmente se detiene este proceso con un bastidor superior cerchado, y un inferior con columnas de refuerzo. Si bien el requisito de poder girar se cumple, este último modelo es bastante más compacto y pesado que los anteriores, encareciendo sumamente su precio.

### 6.3 REQUERIMIENTOS EN CUANTO A DEFORMACIONES

El calibre es un elemento al que se le exige alta precisión. Posee un alto nivel de detalle tanto en la ejecución como en la planificación del proyecto. Así se le exige, puesto que, a la hora de verificarlo en la sala de metrología, ha de resultar con una desviación menor de 0.15 milímetros. Esta desviación viene dada como la diferencia entre los puntos del modelo CAD y la medida experimental que se lleva a cabo con una máquina de medir por coordenadas. La maqueta es colocada sobre una mesa de acero, referenciada respecto a la máquina, y posteriormente medida a través de la toma de contactos con un palpador. Cada uno de estos contactos se identifica dentro del CAD con un punto teórico gracias a la referenciación previa (Ilustración 22- Referenciación de maqueta en posición HD02.). La desviación será la diferencia entre las coordenadas de este punto teórico y el punto palpado experimentalmente. Esta diferencia es la que debe ser menor de 0.15 milímetros.

Como se observa, tanto los afloramientos e insertos como su montaje y ajuste conlleva un gran trabajo. Utilizar un bastidor adecuado es importante para poder evitar esta flexión y por tanto la inmediata salida de tolerancia. Este es sobre todo el motivo por el que se analizarán los gradientes de deformaciones. Posteriormente se encuentran resultados que indican una evolución pronunciada de deformaciones a lo largo de la placa base de la maqueta. Este gradiente vendrá indicado a través de la distancia a la que se produzcan los cambios de colores dentro del croquis de ANSYS. Cuanto más corta sea, más rápido cambiarán los colores y más rápido evolucionará el error. El objetivo es suavizar este cambio lo máximo posible o directamente eliminarlo.

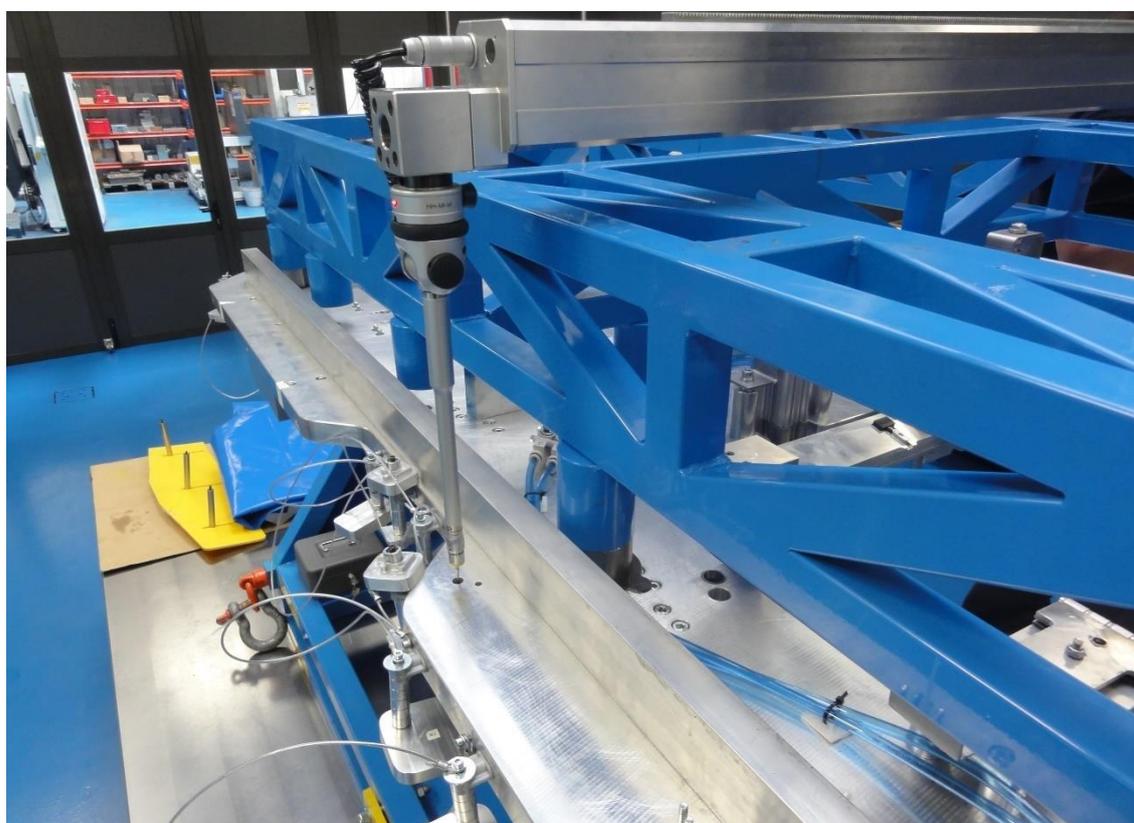


Ilustración 22- Referenciación de maqueta en posición HD02.

Se puede concluir que, en cuanto a este apartado de requerimientos, el objetivo es obtener un bastidor que impida a toda costa la flexión de la maqueta en un contexto en el que se exigen tolerancias muy ajustadas.

#### 6.4 REQUERIMIENTOS EN CUANTO A COSTE

Ya se ha hablado antes de la forma de trabajo de CIDUT y de muchas empresas dentro del campo de producción y fabricación industrial. Su objetivo es sacar la máxima cantidad de trabajo al precio más ajustado posible. La ingeniería de detalle queda relegada a un segundo plano en favor de la planificación logística y la capacidad de reacción e improvisación. En este contexto cada precio, cada hora de trabajo y cada operación importan.

El precio del bastidor vendrá dado por tres aspectos: la cantidad de material usado, la cantidad de operaciones de soldadura empleada, y en general el proceso de fabricación que se ha llevado a cabo hasta materializar la forma de los elementos que se están utilizando. A la hora de diseñar, para la parte del bastidor lo haremos siempre con perfiles huecos rectangulares y para la zona de los ejes con geometrías muy simples por lo que este último aspecto podremos obviarlo. A continuación, se puede ver un detalle de este tipo de soldaduras (Ilustración 23- Detalle soldadura del bastidor).

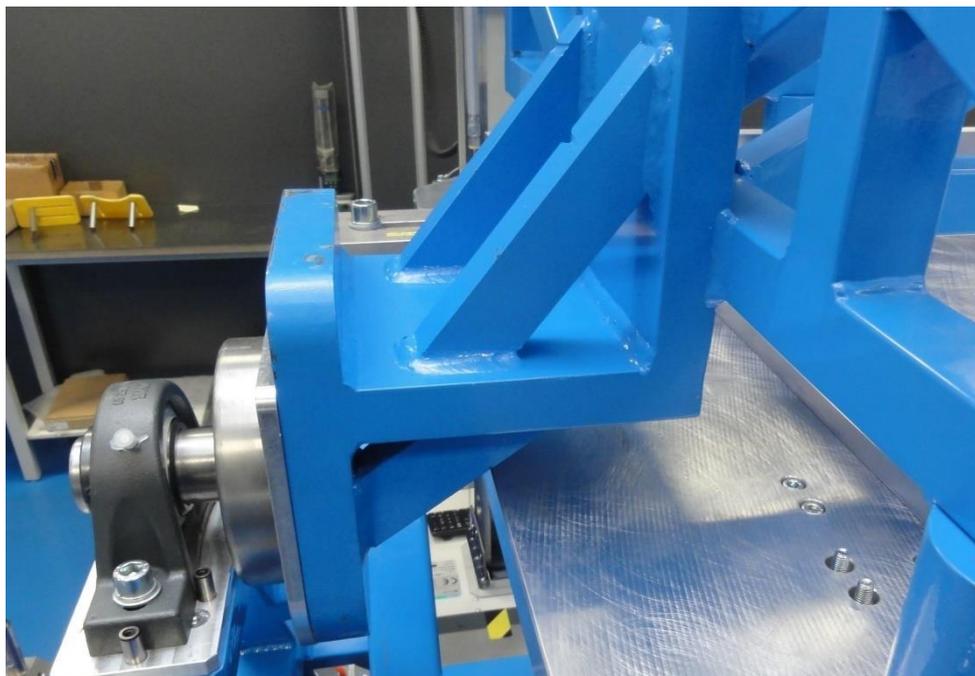


Ilustración 23- Detalle soldadura del bastidor.

## 7. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

### 7.1 CUESTIONES PREVIAS

Ya se ha comentado con anterioridad el problema que ha de salvar el diseño del bastidor HD02; la flexión excesiva de la maqueta, herramienta que exige trabajar dentro de una tolerancia menor a 0.15 milímetros y en determinados puntos, 0.05 milímetros.

Inicialmente este problema se infravaloró y se intentó solucionar sin estudios previos, confiando en que un diseño intuitivo permitiera la verificación de la maqueta dentro de tolerancia. El resultado final han sido cuatro modelos de bastidor diferentes, cada cual más robusto que el anterior; observándose se pueden apreciar cambios que van haciendo el bastidor más pesado. La evolución del proceso se resume en ir introduciendo progresivamente refuerzos para intentar rigidizar toda la estructura. Estos refuerzos se han dispuesto utilizando como criterio una vaga intuición sobre el comportamiento de la estructura; intuición que a la hora de la verdad ha sido poco acertada. Finalmente, geométricamente se encuentra un modelo que no tiene nada que ver con él que se parte por primera vez.

#### 7.1.1 Ajuste de maquetas

Es habitual que las maquetas tengan una forma muy parecida. Sobre una placa base, con o sin ventana, se van montando diferentes piezas e insertos como puede verse en toda la periferia de la maqueta 0382-00 (Ilustración 24- Vista superior de maqueta 0382-00. Según el proyecto la cantidad de uniones y elementos varía, pero lo habitual es encontrarse con un gran número. Evidentemente, cuantas más uniones mecánicas haya en el diseño, menor precisión y calidad se tendrá en el producto final, así como una vida útil más corta, pues más holguras e imperfecciones irán apareciendo y abriéndose paso con el tiempo. Estos diseños suelen ser impuestos por el cliente de tal manera que realmente admiten un escaso margen de maniobra o mejora. Por este motivo la capacidad correctiva tiene mucha importancia.



Ilustración 24- Vista superior de maqueta 0382-00

Prácticamente en todos los proyectos de maquetas encontramos puntos o zonas fuera de tolerancia; bien por montaje, por fabricación o por otras circunstancias siempre suele haber partes a corregir. Algunas superficies quedarán por encima y otras por debajo de la marca teórica; la manera de salvar estos errores y solucionarlo es ir progresivamente colocando calces o haciendo mecanizados. En la producción de la maqueta se aporta valor sobre todo en la etapa de ajuste puesto que es un proceso lento y trabajoso que requiere la verificación de prácticamente todas las uniones en el piecerío. Colocar calces suele ser un proceso significativamente más sencillo, pero en el caso de ser necesario un mecanizado, conlleva detrás un trabajo de detección de la zona a corregir, comunicar e indicar a la parte de taller la corrección, un breve análisis de cuál es la zona y el método para mecanizar, y ejecutar la modificación. El ajuste es un proceso largo, en el que pueden tenerse tiempos de espera no planificados en parte por el carácter imprevisible del problema. En ocasiones se ha llegado a necesitar hasta varias jornadas para poder completar la verificación de una maqueta.

Como se ha dicho, este proceso se lleva a cabo de manera iterativa, a través de dos etapas alternativas: medida y ajuste. En la etapa de medida poco a poco se van palpando puntos, comprobando todas las desviaciones e inclinaciones. La etapa de ajuste trata de corregir todas las partes que van ensambladas de forma atornillada y tienen una desviación inaceptable. En función de si la zona comprobada queda por debajo o por encima de lo marcado en el fichero CAD, la idea es ir colocando calces o eliminando material siguiendo las medidas tomadas en la fase anterior. Evidentemente, lo bien que este inicialmente montada y fabricada la maqueta ahorrará o no trabajo, pero siempre seremos capaces de sacar adelante el producto siguiendo esta mecánica.

Es importante que se haya comentado todo esto, puesto que ahora se puede apreciar que realmente es trata de un problema abierto. Un bastidor con una flexión excesiva no es un problema insalvable, sólo una circunstancia que añade carga de trabajo a la etapa de ajuste. Habrá desviación en la mayoría de los afloramientos y una menor calidad en el producto final como consecuencia de todas las modificaciones. Previsiblemente el calibre tendrá también una menor vida útil puesto que estas circunstancias no serán las mejores. A pesar de ello está claro que entregar un producto de calidad supone trabajar con la mayor exactitud posible en todos los aspectos, incluido el diseño del bastidor.

Los dos modelos que van a verse a continuación se han dado por buenos pese a que ninguno de los dos cumple las tolerancias que se exigen. Simplemente se ha optado por no seguir empleando tiempo en esta tarea de diseño y se ha asumido que posteriormente aparecerán errores en el proceso de montaje.

### 7.1.2 Tolerancia de maquetas

Constantemente se habla de 0.15 y 0.05 milímetros de tolerancia. El objetivo de este apartado es definir correctamente de qué medida se habla para que quede claro cuáles son las restricciones del problema.

La fabricación de una de estas maquetas comienza en un programa CAD. Multitud de archivos referentes a cada sólido que incorpora el calibre son ensamblados y fusionados en uno solo. Este archivo reúne toda la información que se necesita para fabricar y montar correctamente el producto en cuanto a dimensiones y morfología. Se trata de un archivo perfecto que aloja información de carácter teórico.

Durante la fase de producción, se compra por encargo a empresas externas casi todo el piecerío del ensamble. Sorprendentemente, los acabados que se consiguen son extraordinariamente acertados; en maquetas HD01 en algunas uniones no se necesita una tarea de ajuste si son correctamente ejecutadas. En cualquier caso, todos estos elementos que han sido encargados deben ser montarlos sobre la placa base o incluso sobre ellos mismos, unos en otros. Constantemente se ven uniones mecánicas que inevitablemente van introduciendo cada vez más error y desviación. Finalmente se obtendrá una maqueta terminada con unas dimensiones reales, diferentes a las teóricas. Es aquí donde se da el concepto de tolerancia; en la disconformidad entre medidas reales y teóricas.

De cara al estudio es también importante ver que es un parámetro que nace y muere dentro de la propia maqueta; no tiene sentido por ejemplo hablar de tolerancia del bastidor. El bastidor simplemente tendrá la tarea de evitar la deformación, pero no de calibrar. Posteriormente en los análisis se verá que el programa de elementos finitos facilita una deformación máxima del conjunto bastidor- maqueta. Sin embargo, y pese a que también sea una medida relevante, no es este el nivel de desviación que interesa. Los dos parámetros que interesan son en conjunto la deformación máxima y la deformación mínima que se dan en la maqueta. Estos dos niveles de deformación se deberán visualizar de manera específica sobre el programa. Si bien es relevante que la deformación máxima no sea alta, indicativo de un bastidor con una buena morfología y forma de trabajar, el parámetro que verdaderamente interesa es la resta de estos picos; una deformación relativa que se da en la maqueta. Si esta deformación relativa es menor que el límite de 0.15 milímetros de tolerancia, se tendrá una solución acertada.

### 7.1.3 Cálculo de elementos finitos

Durante el proyecto se han utilizado el programa de diseño Solid Edge y el programa de elementos finitos ANSYS workbench [7]. Sobre ambos se importa un CAD que en los siguientes cuatro casos se trata directamente del CAD comercial. Este archivo traducido a formato Solid Edge incluía un ensamblaje principal que constaba de alrededor de 450 archivos referentes a todo el piecerío ocupando el conjunto cerca de 1 GB.

Para poder abordar el problema, se ha aligerado el CAD cargado en el software puesto que es un archivo de trabajo directamente y el nivel de detalle era especialmente alto. Las consideraciones en cuanto a los pesos del piecerío de los afloramientos, postizos, abatibles y consola, se han introducido como cargas puntuales. El resto de los elementos se han considerado lo suficientemente ligeros como para no influir en el comportamiento del estudio.

Con el fin de acortar tiempos, se ha buscado acotar y condicionar el mallado controlando la cantidad de nodos y elementos. Las mallas han sido diferentes en cada caso, pero siempre se ha

intentado utilizar aproximadamente una cantidad de elementos cercana a 100.000. Al ser una geometría complicada, el volumen de elementos se ha controlado con el tamaño de elemento (en el entorno de 0.03 metros) y sin utilizar métodos adaptativos, ya que por la existencia de multitud de agujeros en la placa base la cantidad de elementos se disparaba.

El nivel de detalle que interesa tampoco es especialmente alto. El cálculo de tensiones interesa más a nivel cualitativo, y en cuanto al cálculo de deformaciones, la información que buscamos también es de carácter más bien global, ya que se trabaja buscando controlar la deformación relativa.

El conjunto del que se hablará está formado principalmente por cuatro partes. La maqueta, el bastidor inferior, el bastidor superior y los ejes. La maqueta se representará como una placa base con cargas puntuales que simularán los elementos montados encima. Inmediatamente debajo tenemos el bastidor superior; hace de soporte, girando con ella y rigidizándola. La maqueta es capaz de rotar longitudinalmente girando sobre estos ejes. Finalmente se encuentra el bastidor inferior, la única parte fija que da soporte a todo el resto de la estructura.

## 7.2 ALTERNATIVAS

A continuación, se van a exponer los cuatro bastidores mencionados anteriormente. Se comentará su forma y los cambios que van sufriendo. Se verán visualizados en cada caso los resultados en cuanto a tensiones y deformaciones justificándose, o no, su validez y mostrándose el problema [8] que supone el aumento de peso suspendido en la evolución del modelo.

Véase, de cara a la posterior etapa de diseño, que existe una especificación de cliente importante que implica dejar libre la zona inferior de la ventana. La parte del bastidor superior deberá respetar este hueco.

### 7.2.1 Modelo de bastidor 1

Se trata del modelo más ligero y también el más sencillo de los cuatro. Se planteó inicialmente como solución para el proyecto de maqueta 0382-00. En la siguiente imagen (Ilustración 25- Croquis modelo de bastidor 1.) podemos ver un croquis de este modelo.

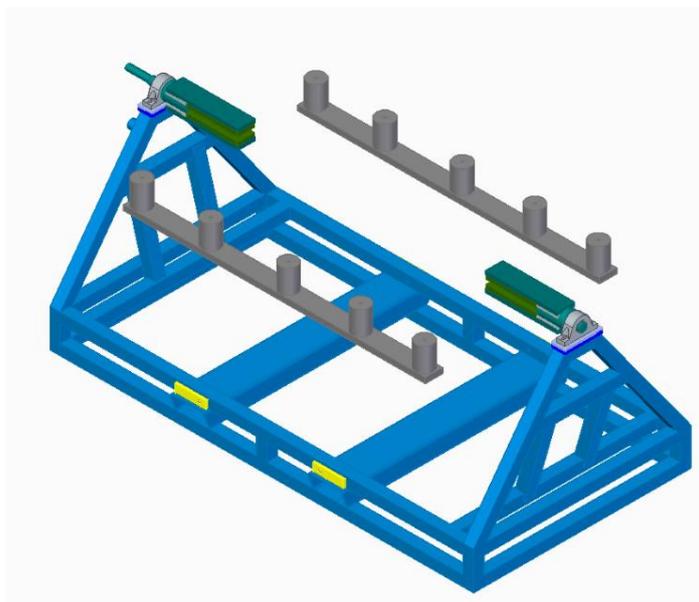


Ilustración 25- Croquis modelo de bastidor 1.

En cuanto a la morfología, se encuentran perfiles huecos en acero soldados entre sí dando soporte al bastidor superior rotativo. Dos apoyos que emergen de la base formando un triángulo permiten el apoyo de dos ejes que transmitirán las cargas. Se encuentran reforzados por cuatro pilares inclinados que tratan de evitar su flexión. En la zona inferior lleva incorporadas dos chapas que harán de paso de palas para poder mover la maqueta con una transpaleta.

En cuanto a la zona superior, no existe bastidor al uso. El calibre lleva acoplado en su parte inferior unos refuerzos que tratan de rigidizar la estructura. Lleva dispuestos dos, uno a cada lado de la ventana. Cinco macizos de aluminio a cada lado comunican la maqueta con una lámina también de aluminio. Estos nervios responden a la necesidad principal de aportar inercia al eje longitudinal de la maqueta, sin embargo, no llegan a ser suficientes; los macizos no aportan rigidez y la lámina es previsiblemente muy estrecha como para solucionar el problema.

Los apoyos de la maqueta sobre el bastidor inferior se dan a través de dos ejes de acero. Estos dos ejes continúan a través de unas pletinas y calces de aluminio que hacen de agarradera a la propia placa de la maqueta. Todas las uniones son atornilladas.

Este modelo tiene un peso asociado de unos 272 kilogramos, sin contar la maqueta.

En cuanto al comportamiento del calibre, podemos ver que se deforma muy por encima del límite tolerable; en este caso la estructura no es capaz de impedir la flexión. Se tienen unos valores de 0.73 milímetros de deformación máxima y 0.14 de deformación mínima respecto al modelo CAD. Esto da como resultado una deformación relativa de 0.59 milímetros. En las siguientes dos imágenes se aporta una vista en isométrico de todo el bastidor, y una en planta de la placa base (Ilustración 26- Cálculo de elementos finitos modelo 1 (1). e Ilustración 27- Cálculo de elementos finitos modelo 1 (2).).

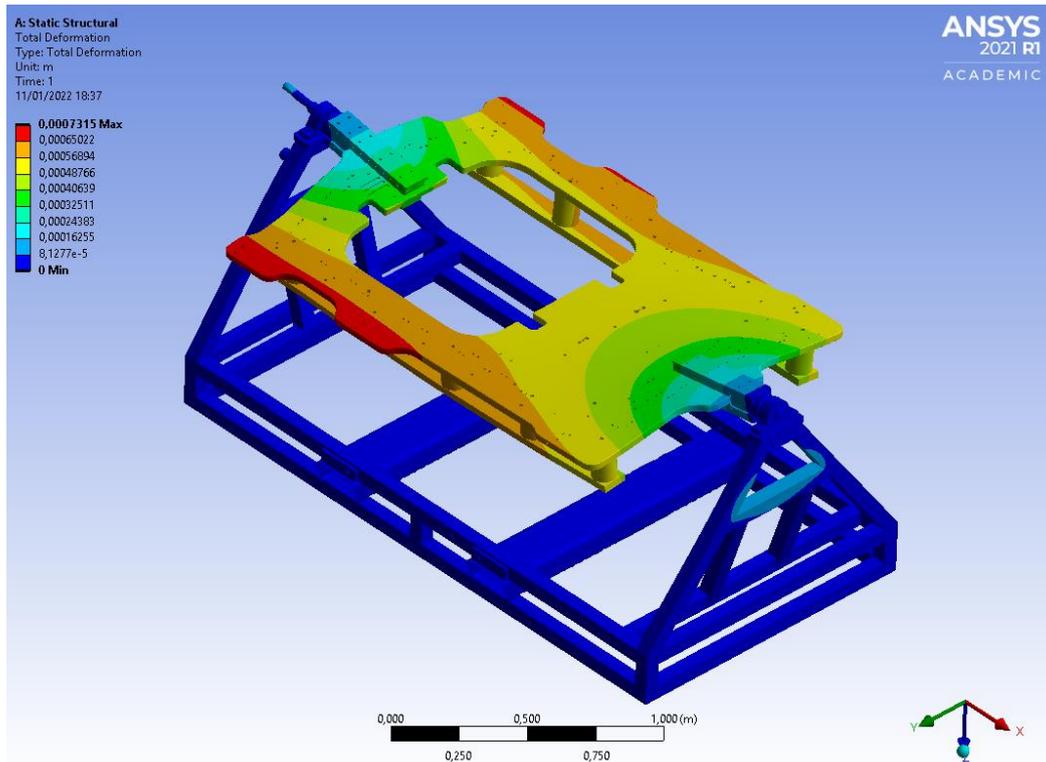


Ilustración 26- Cálculo de elementos finitos modelo 1 (1).

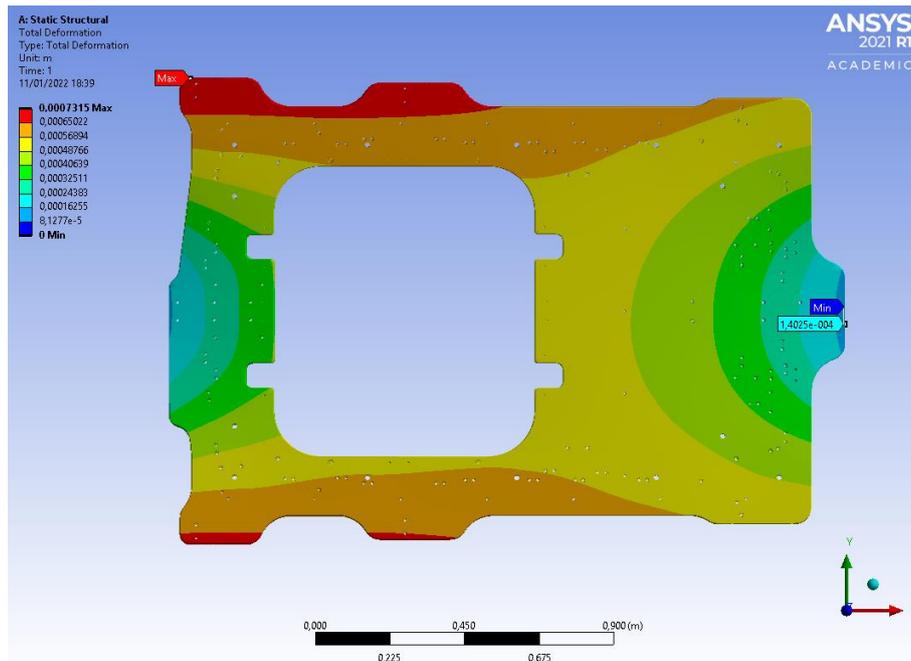


Ilustración 27- Cálculo de elementos finitos modelo 1 (2).

Se va a aportar ahora otra vista de la flexión (Ilustración 28- Flexión del modelo 1 (3).) que será clave para entender dónde se va a encontrar un fallo importante en el diseño.

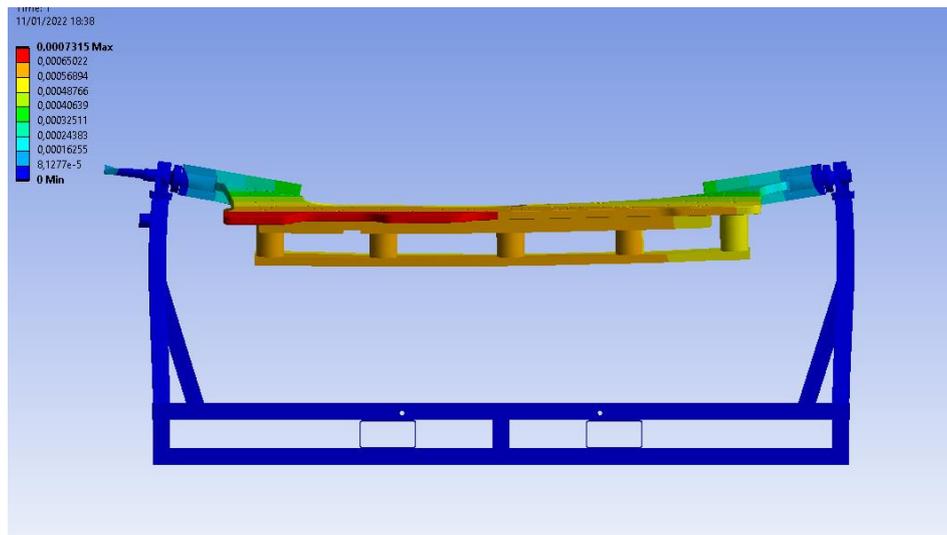


Ilustración 28- Flexión del modelo 1 (3).

Si bien es el modelo más ligero de los cuatro, los ejes llegan al apoyo igualmente con cierta inclinación, algo que influye negativamente en la estructura. Más adelante esta circunstancia se evaluará como un problema importante en el proceso de diseño.

También es importante comentar la evolución de las deformaciones a lo largo de la placa base. Una peculiaridad muy importante de esta evolución es su carácter circular. Visualmente se aprecia que tiene sus epicentros en la zona de los apoyos y evoluciona de forma pronunciada hacia el interior de la placa. Esto se debe al tipo de unión que se ha pensado. Evidentemente, no es nada favorable forzar un apoyo directamente sobre la maqueta, más si va a ser de esta naturaleza, una especie de apoyo puntual. Todo el peso de la placa en dirección transversal

también flectará, dando esta forma circular a la evolución de las deformaciones. Lo que se consigue de esta manera es minimizar el efecto de los rigidizadores que hemos dispuesto, puesto que estos trabajan en dirección longitudinal y no transversal, y aumentar las deformaciones relativas a lo largo del calibre. La zona de mayor desviación se encuentra a la altura de la ventana, donde más debilidad hay. Es necesario o bien corregir el tipo de apoyo o bien rigidizar la estructura en esta dirección.

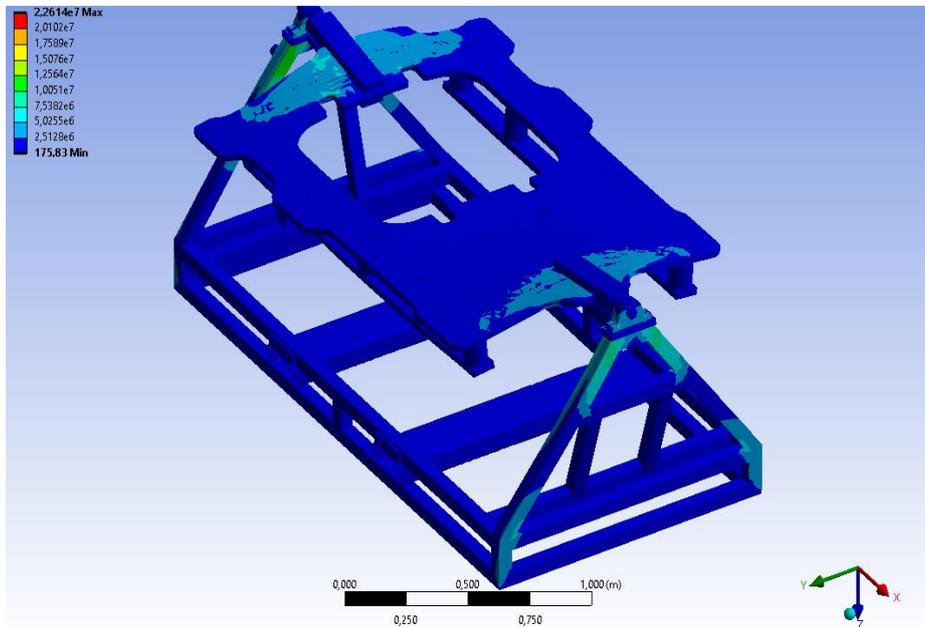


Ilustración 29- Cálculo de elementos finitos modelo 1 (4).

Se presenta también la distribución general de las tensiones en el conjunto (Ilustración 29- Cálculo de elementos finitos modelo 1 (4)). En este caso no es tan interesante el valor de tensión máxima sino en general su reparto en la estructura. De aquí se pueden extraer varias conclusiones interesantes; también razones por las cuales el modelo se puede considerar inválido. La primera es el estado tensional de la placa base; se muestra un mapeado de color sobre todo en el entorno de los apoyos. Es evidente que, siendo un elemento de control, someterlo a concentración de tensiones tan pronunciadas no es nada positivo. La segunda razón es la ausencia de estas concentraciones en los rigidizadores que caracterizan el modelo. Se ven exclusivamente de color azul oscuro, lo que indica que no están sometidos a un nivel de tensión severo por lo que no trabajan a nivel estructural. Esto los convierte en inútiles ya que en principio no están cumpliendo la función para la que estaban pensados.

Aunque no se haya prestado especial atención al valor de la tensión máxima, sí que tiene relevancia su ubicación. En este caso se encuentra en la unión del soporte del bastidor inferior con uno de los ejes. En esta unión de carácter cilíndrico encontramos una pronunciada concentración de tensiones, algo que era en cierto modo previsible, pero que a la vez implica la existencia de un margen de mejora en esta unión mecánica. Estas concentraciones tan altas no son deseables, y por norma general habrá que trabajar en un diseño que intente minimizarlas lo máximo posible.

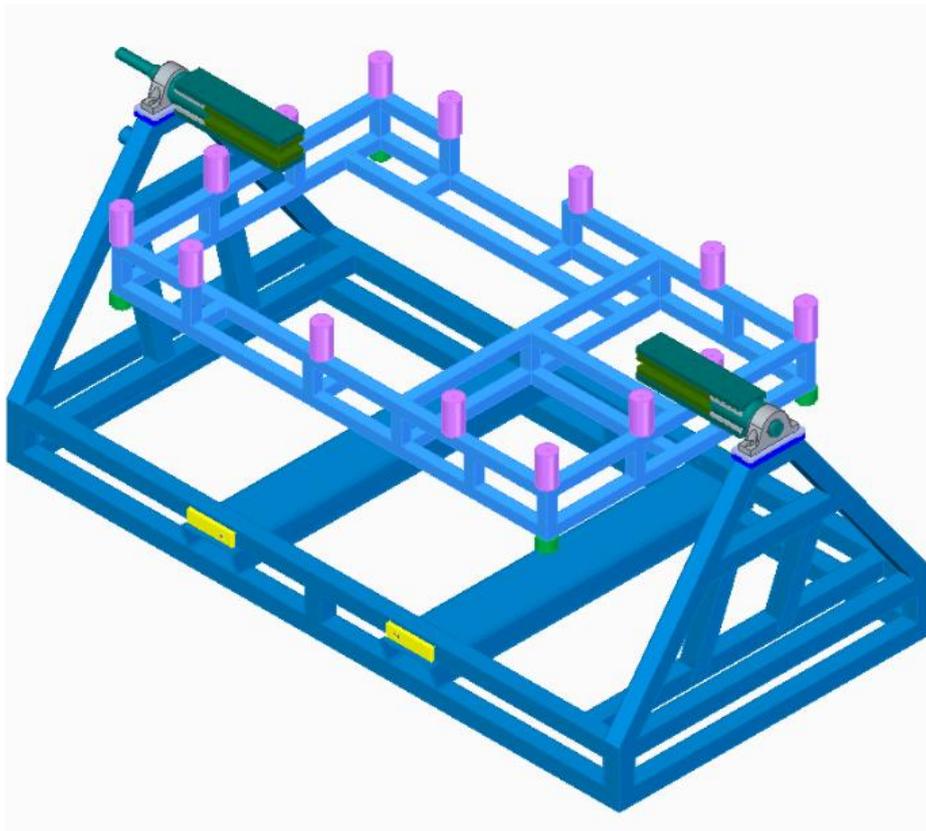
Se aprecia también, sobre todo en el estudio de deformaciones, cierta asimetría. Esto obedece simplemente a la asimetría geométrica que posee la maqueta. A simple vista puede pasar

desapercibida, pero si se observa con algo de detenimiento, en la parte del lado de la ventana se ve que el contorno no es exactamente igual a ambos lados.

Evidentemente superamos por mucho el límite de tolerancia que nos habíamos propuesto. Contextualizando un poco la situación, para detectar este problema no fue necesario ningún estudio. La simple observación y la absurda medida en el departamento de metrología como resultado fueron suficientes para considerarlo inválido. En ese momento se procedió al diseño del bastidor numero dos que presentaremos a continuación. La consecuencia fue el retraso del proyecto de este utillaje puesto que era un problema no previsto y que se presentó casi en la última etapa de producción.

### 7.2.2 Modelo de bastidor 2

En este caso se mejorarán los resultados anteriores tanto en desviación máxima como en relativa; aun así, veremos que siguen siendo todavía insuficientes. En la siguiente imagen (Ilustración 30- Croquis modelo de bastidor 2.) podemos ver un croquis de este modelo.



**Ilustración 30- Croquis modelo de bastidor 2.**

En la morfología del bastidor inferior no hay cambios reseñables. El modelo es exactamente el mismo que en el caso anterior. Las únicas diferencias se darán en los resultados del cálculo. Al disponer de más peso esta vez, encontraremos tensiones y deformaciones algo mayores, aunque el cambio será prácticamente imperceptible.

En cuanto a la zona superior rotativa, sí que se producen cambios importantes. El primero es que, ahora si nos encontramos con un bastidor al uso. Al igual que en el caso anterior, también está formado por barras huecas y rectas de sección rectangular. El modelo se basa en barras soldadas formando dos rectángulos colocados sobre la periferia de la maqueta. Sobre ellos van colocados unos tacos en aluminio que hacen las veces de apoyo; su unión con la maqueta se da

a través de tornillos. En dirección longitudinal y con buen criterio se han introducido dos perfiles de refuerzo un el interior de la ventana; incompresiblemente y pese a todo, se elimina un perfil a la altura de la ventana justo en la zona más débil de la estructura y donde más inercia se requiere. En general el incremento del nivel de rigidez hace disminuir las deformaciones a lo largo de la maqueta. Como se ha comentado, el hueco de la ventana se respeta, dejando libre el espacio inferior.

La unión con los ejes es directamente a la maqueta, tal y como antes. Las pletinas intermedias siguen siendo en acero y sus uniones siguen siendo atornilladas. En este apartado tampoco ha cambiado nada. En las siguientes dos imágenes se aporta una vista en isométrico de todo el bastidor, y una en planta de la placa base (Ilustración 31- Cálculo de elementos finitos modelo 2 (1). e Ilustración 32- Cálculo de elementos finitos modelo 2 (2).).

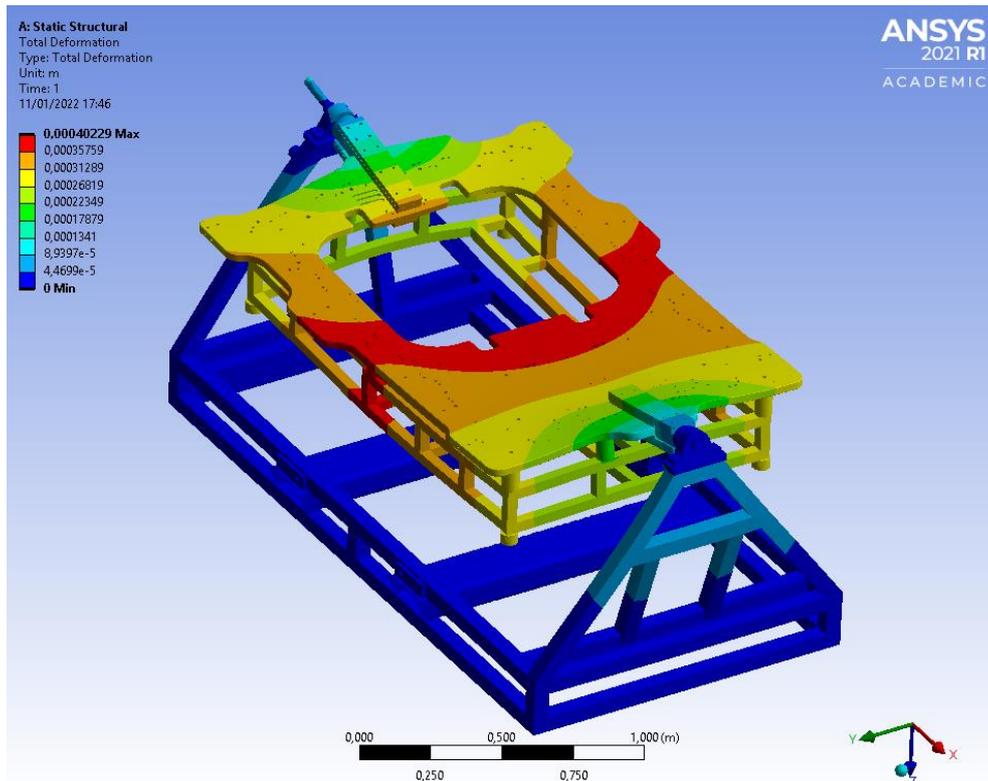
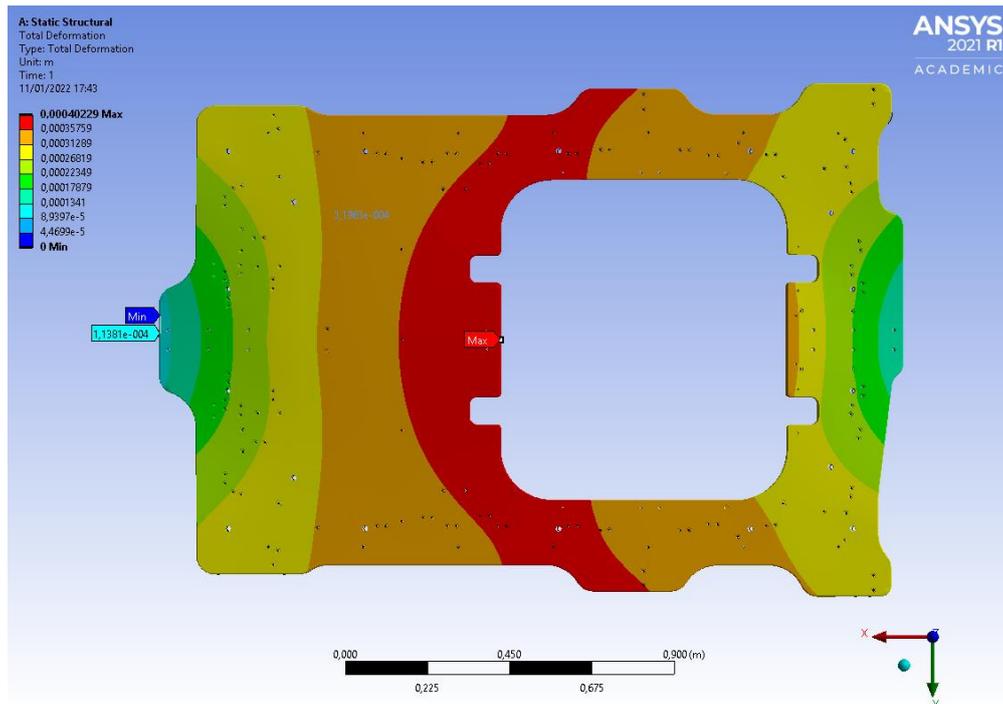


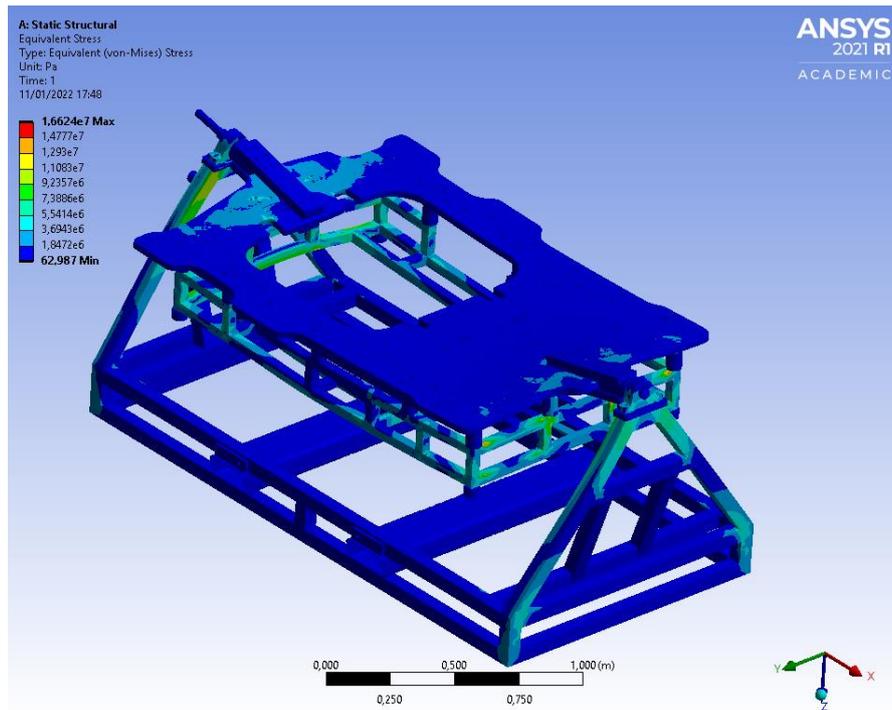
Ilustración 31- Cálculo de elementos finitos modelo 2 (1).



**Ilustración 32- Cálculo de elementos finitos modelo 2 (2).**

En cuanto al estudio de deformaciones existen varias novedades. La primera es que se ha pasado de 0.75 milímetros a 0.35 de desviación máxima, mientras que la desviación mínima se sitúa en 0.11. Si bien es un cambio muy positivo, por otro lado, existe el inconveniente de que la deformación relativa sigue siendo elevada: 0.24 milímetros.

Vuelve a aparecer una evolución de la deformación con carácter circular. El motivo es el mismo; la naturaleza de los apoyos y la falta de rigidez en la dirección transversal. Todo este fenómeno gira en torno a la existencia de las agarraderas que permiten el giro del calibre. Vuelve a suponer un apoyo puntal en el modelo, por lo que el gradiente de deformaciones sigue evolucionando rápidamente en la zona; sigue siendo una cuestión a corregir. A nivel estructural se traduce en una unión ineficiente muy alejada del empotramiento perfecto que se está buscando. La solución más adecuada es hacer la unión directamente a través del bastidor, algo que será corregido a partir del siguiente modelo.



**Ilustración 33- Cálculo de elementos finitos modelo 2 (3).**

Visualizando ahora el cálculo de tensiones (Ilustración 33- Cálculo de elementos finitos modelo 2 (3).) se aprecia cualitativamente el nivel de optimización del modelo. Para empezar, vuelve a llamar la atención que la placa base esté sometida a tensiones, algo que no debería ocurrir, pero previsible por el tipo de apoyo. En cuanto al bastidor superior existe alternancia de colores azules y e incluso algunos verdes lo que significa que la mayoría de las barras trabajan en mayor o menor medida, algo muy positivo que implica que no hay zonas prescindibles.

Si se atiende ahora al bastidor inferior, se ve que la peor parte se encuentra en la zona de los pilares. Estas barras están sometidas a una flexión intensa puesto que tienen que soportar el resto del peso del conjunto maqueta-bastidor. Se puede apreciar una analogía con el caso anterior, viendo afectadas por las concentraciones de tensiones prácticamente las mismas zonas y en una medida muy similar.

Por último, es importante que la máxima tensión se encuentre en la unión del eje con el soporte; sigue indicando un margen de mejora en esta zona. Posteriormente nuestra particular etapa de diseño se centrará específicamente en esta parte para explicar la manera de optimizarla.

### 7.2.3 Modelo de bastidor 3

Tras dos modelos fallidos, se empiezan a identificar cada vez más claramente los puntos a corregir en el diseño. La línea en la que se trabaja es aportar cada vez más material en aquellas zonas intuitivamente más débiles, principalmente en esta nueva etapa se destina, no sin mal criterio, a aportar inercia a los ejes de flexión.

Hasta el momento, parece que los puntos a corregir son a priori, dos. El primero se centra en el tipo de apoyo; pese a que hasta ahora encontramos zonas de alta deformación en su entorno, lo que en realidad se está buscando es una unión rígida. La unión atornillada directamente a la placa base supone transmitir esfuerzos a esta superficie, sometiéndola a un estado tensional indeseable. La manera de solucionar esto es apoyar la placa directamente sobre el bastidor superior, dejando que éste realice todo el trabajo estructural; esto implica una unión del eje directamente al bastidor dejando la placa totalmente libre. El segundo punto es directamente la rigidez a lo largo del eje longitudinal. En el modelo anterior se aprecia un bastidor superior con un buen reparto de cargas; las tensiones afectan a toda la geometría, haciéndola trabajar soportando el peso suspendido. Si bien es un buen punto de partida, se necesita algo más de inercia para solucionar este problema. En la siguiente imagen podemos ver la disposición de este modelo (Ilustración 34- Croquis modelo de bastidor 3.).

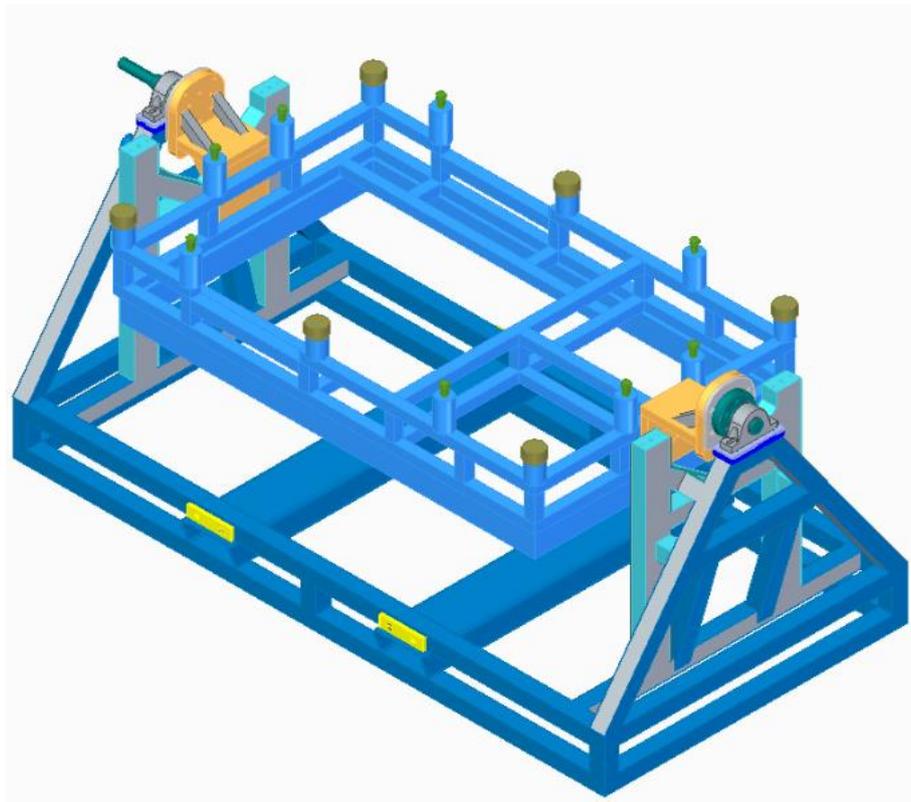


Ilustración 34- Croquis modelo de bastidor 3.

En este caso el modelo nuevo se centra en corregir estos dos apartados. Si se atiende primero a la zona inferior, se aprecian algunos cambios. Se introducen dos robustos pilares de refuerzo, también huecos, para evitar la flexión en los apoyos. De esta manera se intenta corregir la posición inclinada en la que parte el eje. Lamentablemente esta inclinación se sigue dando igualmente en parte por el aumento de peso del bastidor superior, escapando su causa de la flexión de los pilares. La solución sigue siendo rigidizar la unión.

La parte rotativa es similar al caso anterior, con la peculiaridad de que se ha introducido debajo de los perfiles, un perfil aún más grande. Sigue manteniendo la sección rectangular, pero se alarga en altura, multiplicando la inercia. El resultado es evidente: un incremento de peso y rigidez. Se puede ver que estamos ante unos niveles de deformaciones relativas más bajos, una noticia muy positiva.

El cambio más importante lo encontramos en la zona de los ejes. Se eliminan los agarres de los dos primeros modelos y se sustituyen por unas pletinas de acero que se sueldan directamente al bastidor. Las pletinas están reforzadas con unos nervios que impiden una deformación excesiva. Son novedades importantes puesto que de esta manera se ha frenado la pronunciada evolución de las deformaciones que se tenía en el caso anterior. Haciendo la unión directamente soldada al bastidor se ha logrado también rigidez en el eje transversal. En las siguientes dos imágenes se aporta una vista en isométrico de todo el bastidor, y una en planta de la placa base (Ilustración 35- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (1). e Ilustración 36- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (2).).

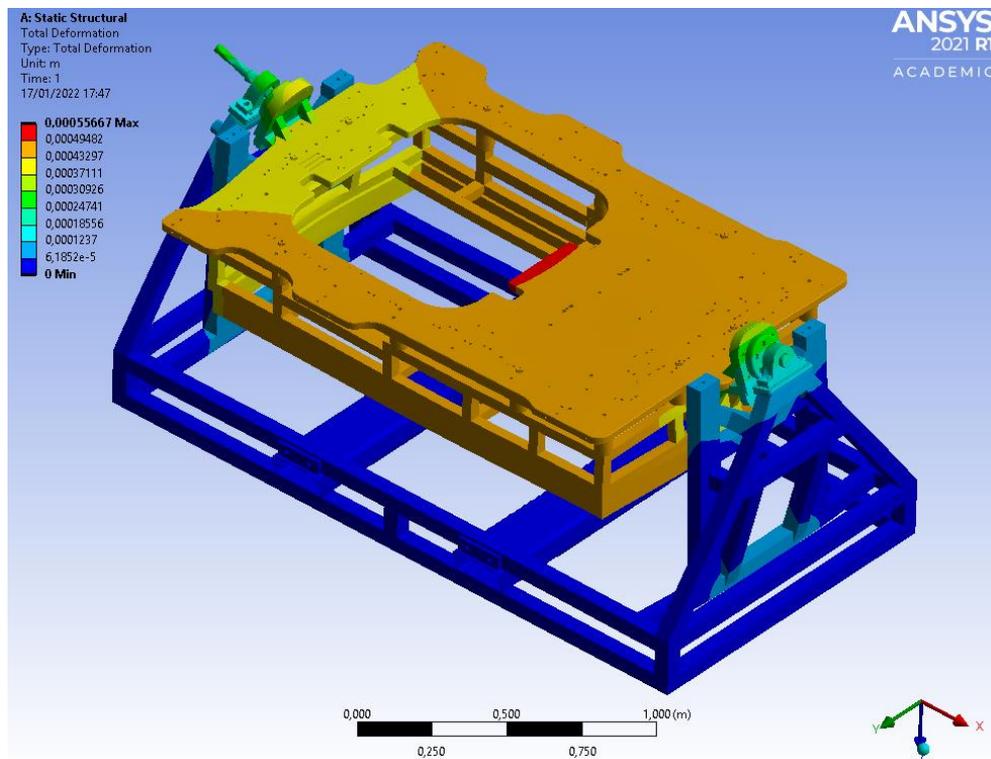


Ilustración 35- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (1).

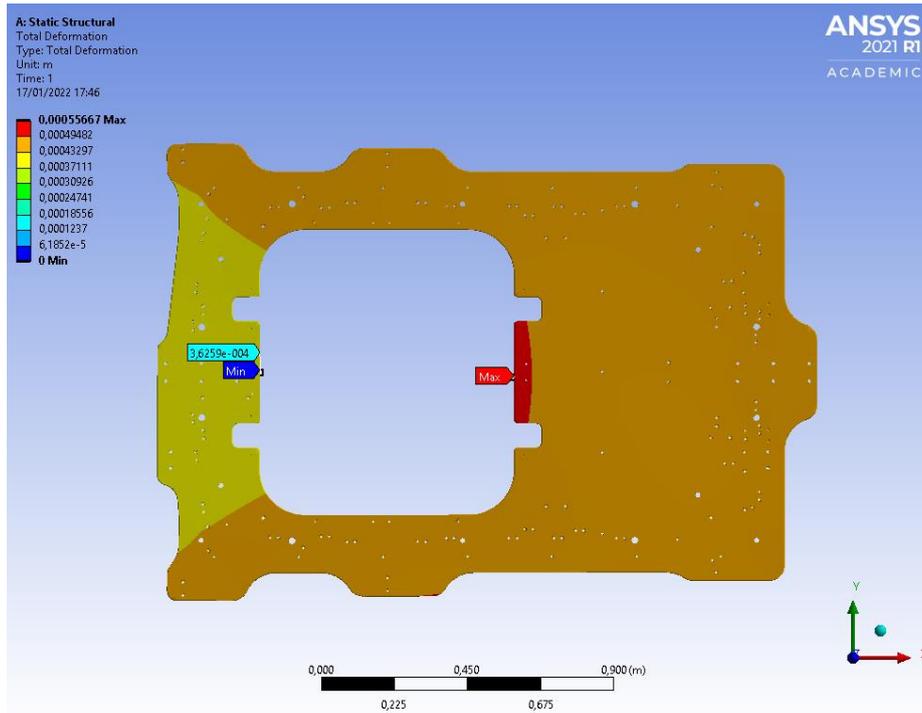


Ilustración 36- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (2).

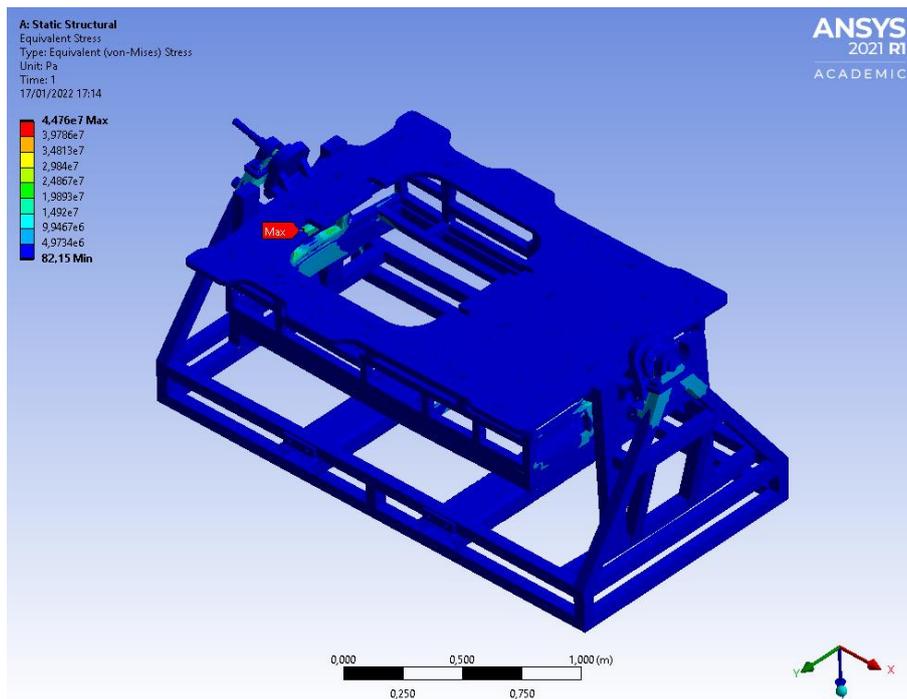
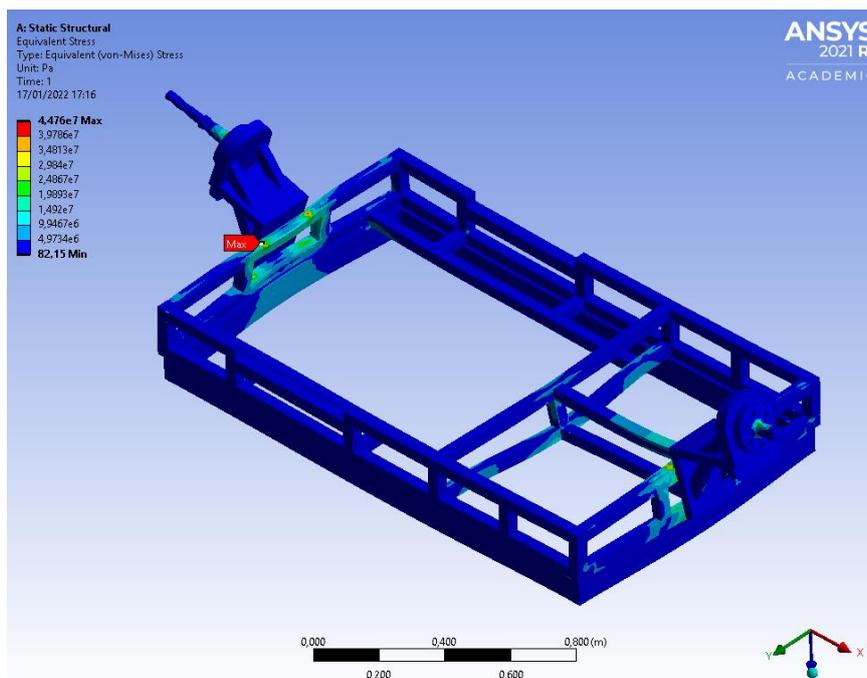


Ilustración 37- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (3).



**Ilustración 38- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (4).**

Si se atiende a los niveles de tensión (Ilustración 37- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (3). e Ilustración 38- Cálculo de elementos finitos modelo 3 (4).), se ven números muy parecidos al modelo anterior. Lo primero que llama la atención es que las barras dispuestas longitudinalmente apenas cambian de color por lo que prácticamente no están trabajando. En cambio, se aprecia ahora la tensión máxima en el bastidor superior, en el entorno de su unión con el eje de la ventana, indicativo de unión ineficiente dentro de un modelo que estructuralmente no realiza una gran labor.

Este bastidor es significativamente más pesado que los dos anteriores. Como era de esperar en estas circunstancias, se obtienen resultados algo mejores sobre todo en el nivel de flexión de la maqueta, que, si bien en los modelos anteriores poseía un gradiente pronunciado en los niveles de deformación, ahora se hace más suave.

El inconveniente de este bastidor respecto al anterior podría decirse que es únicamente el aumento de peso. Se emplean 160 kilos más en el bastidor superior que anteriormente; un 135% más que en el caso anterior. Evidentemente esto incrementa su precio. Los niveles de deformación máxima siguen siendo bastante altos, de 0.56 milímetros. Sin embargo, la deformación mínima es también bastante alta, de 0.36, lo que da como resultado una deformación relativa de 0.2 milímetros. Estos resultados, en comparación con el resto, son bastante más prometedores. A pesar de ello, se encuentra una deformación máxima bastante alta, una deformación relativa fuera de tolerancia aún y una estructura que se verá que a nivel tensional no trabaja eficientemente.

Llegados a este punto el proyecto había sufrido un amplio retraso. Presionados por los plazos de entrega y las solicitudes de cliente se cerró la etapa de diseño y se dio por buena esta solución para el conjunto bastidor- maqueta. Fueron tres intentos hasta llegar a la solución del bastidor que supusieron un retraso y una pérdida económica extra. Este es un ejemplo fehaciente de la dinámica de este sector industrial. Muchas veces, sobre todo ante problemas de carácter imprevisto, se adoptan medidas de urgencia. Es un proceso estresante en el que muchas veces quedan tareas sin hacer, problemas sin resolver y procesos sin cerrar.

#### 7.2.4 Modelo de bastidor 4

Se ha acaba de comentar que el cierre del proyecto anterior se da con el modelo número tres. Ahora se verá un nuevo diseño, solución para un nuevo proyecto; en este caso se verá el del 0411-00. Se trata de una maqueta algo más grande y de diferente forma, pero que también debe poder trabajar en posición HD02. Como se ve, los proyectos en cierto modo se repiten, quedando pendiente el diseño de un bastidor que garantice unos buenos resultados ante esta particular solicitud. Ante estas circunstancias y la oportunidad de crear un diseño nuevo, se opta por encargar esta estructura, significativamente más robusta y pesada. En la siguiente imagen (Ilustración 39- Croquis modelo de bastidor 4.) se puede apreciar la disposición del modelo.

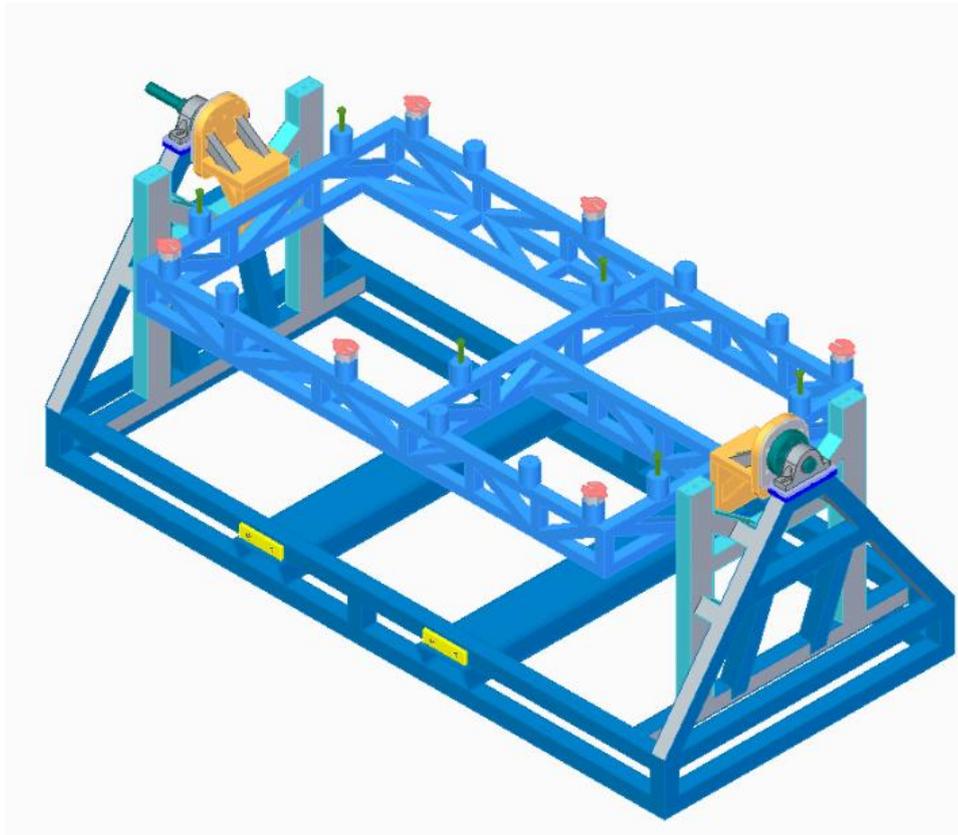


Ilustración 39- Croquis modelo de bastidor 4.

Aunque a simple vista se haga más difícil apreciarlo, lo primero que hay que comentar es la diferencia en las dimensiones de la placa base, así como algún pequeño detalle en la morfología. Pese a tener una forma muy parecida, similares alas y forma de la ventana, se verá una maqueta algo más larga, de unos 2450 milímetros; esto conlleva aún más luz a salvar, agrandando aún más si cabe el problema.

Si se observan los cambios respecto al anterior, se ven diferencias únicamente en la zona rotativa. Se aprecia una solución a través de cerchas de sección igual al resto de barras. Estas cerchas se colocan a través de toda la periferia del conjunto, y a modo de refuerzo en la zona de la ventana, formando triángulos alternativos. La unión del eje es también soldada a este bastidor, como se vio en el caso anterior.

En cuanto al resto del modelo, no hay cambios significativos. Tanto la zona inferior fija como la parte de los ejes y el apoyo siguen siendo iguales que en el modelo anterior salvando la diferencia de longitud antes comentada. Los ensamblajes del CAD han sido prácticamente reciclados. La lectura es que únicamente se achaca el incorrecto comportamiento a la rigidez del bastidor superior, desatendiendo el cuidado de los empotramientos.

Aparentemente este cerchado hace al conjunto mucho más rígido, pero por el contrario introducen gran cantidad de peso que hará aumentar la flexión. Se aprecia un compromiso entre peso y rigidez en torno al que girará el problema. El objetivo es reforzar aquellas zonas que sean más débiles sin comprometer en exceso la carga suspendida. Ahora se verán los niveles de tensión (Ilustración 40- Cálculo de elementos finitos modelo 4 (1). e Ilustración 41- Cálculo de elementos finitos modelo 4 (2).) y deformaciones que hay en este caso.

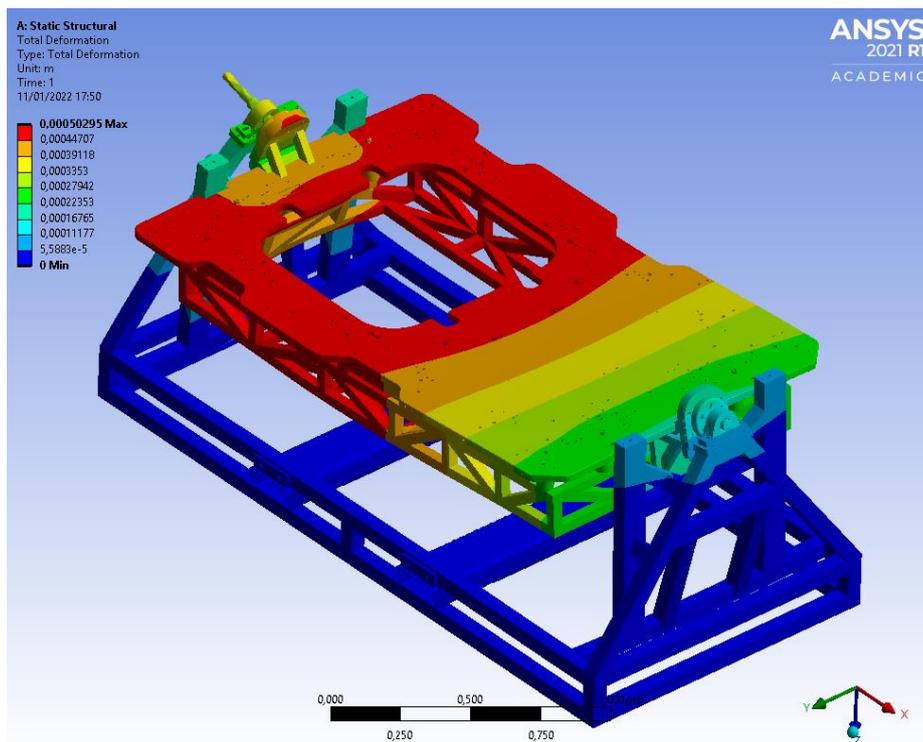


Ilustración 40- Cálculo de elementos finitos modelo 4 (1).

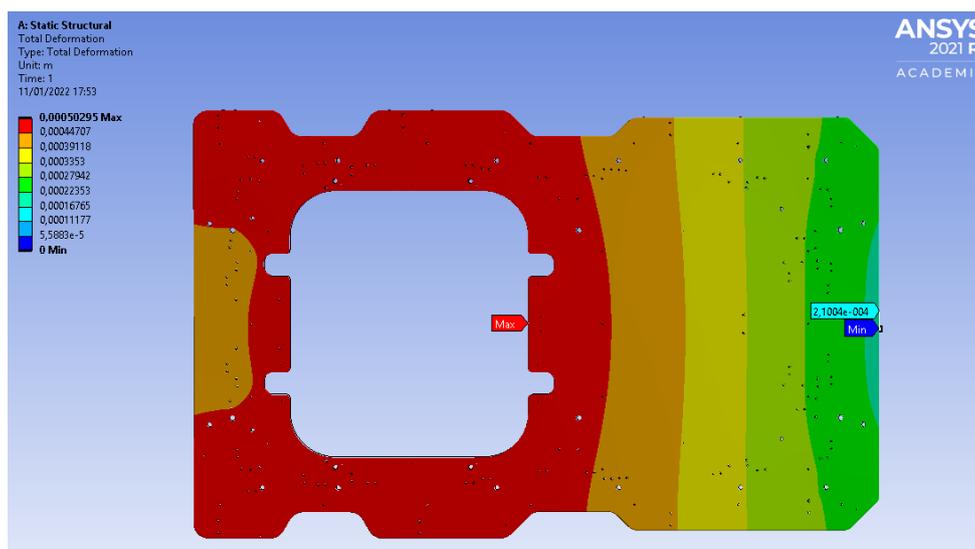


Ilustración 41- Cálculo de elementos finitos modelo 4 (2).

Si atendemos a los resultados del cálculo, se confirma que haber introducido demasiado peso a lo largo de la luz que se está salvando es contraproducente para el modelo. La deformación máxima se sitúa en 0.50 milímetros mientras que la mínima se encuentra en 0.21. Como resultado, la relativa es de 0.29, ambas por encima de los niveles anteriores. El diagrama es totalmente simétrico.

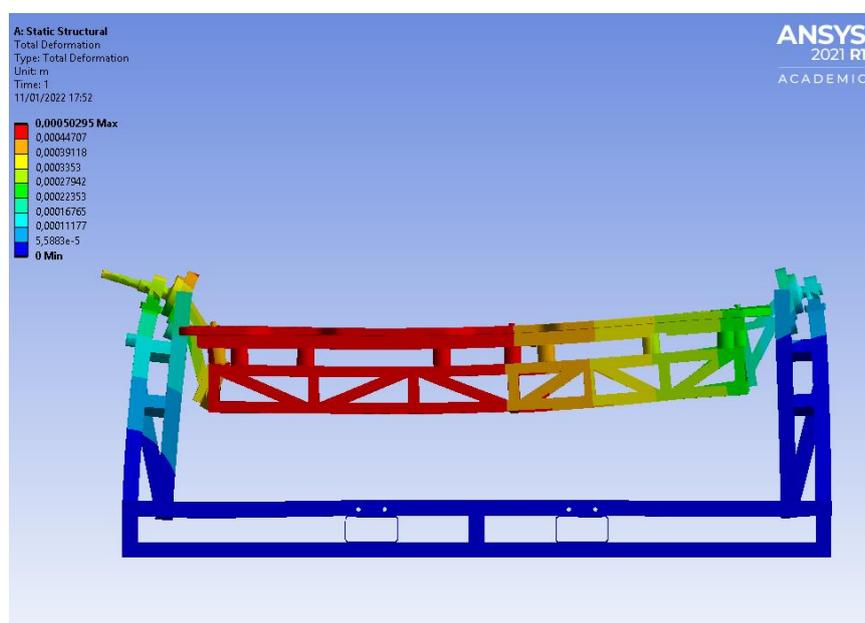


Ilustración 42- Flexión del modelo 4 (3).

Es importante ver esta imagen de perfil (Ilustración 42- Flexión del modelo 4 (3).) para poder comentar un par de aspectos importantes sobre todo a nivel cualitativo. La primera es que se encuentra una clara diferencia entre la zona de la ventana y la zona maciza. El hecho de colocar un refuerzo en la zona maciza hace pesar esta parte mucho más y aumenta claramente las deformaciones del bastidor. Hay que tener en cuenta que esta vez el peso suspendido, el del bastidor superior, son casi 200 kilogramos. En estas condiciones, la flexión es significativa. La

segunda cuestión que comentar es la inclinación con la que parten ambos ejes antes de unirse con el bastidor; hay mayor flexibilidad en la unión entre las partes superior e inferior. El apoyo del eje es incapaz de mantenerlo recto, lo que provoca que las deformaciones evolucionen rápidamente a través del eje. Por otro lado, la unión soldada con la zona rotativa está sometida a altos niveles de tensión; aquí se encuentra la zona de máximos.

Se comentarán ahora los volúmenes de tensión que nos encontramos y su disposición.

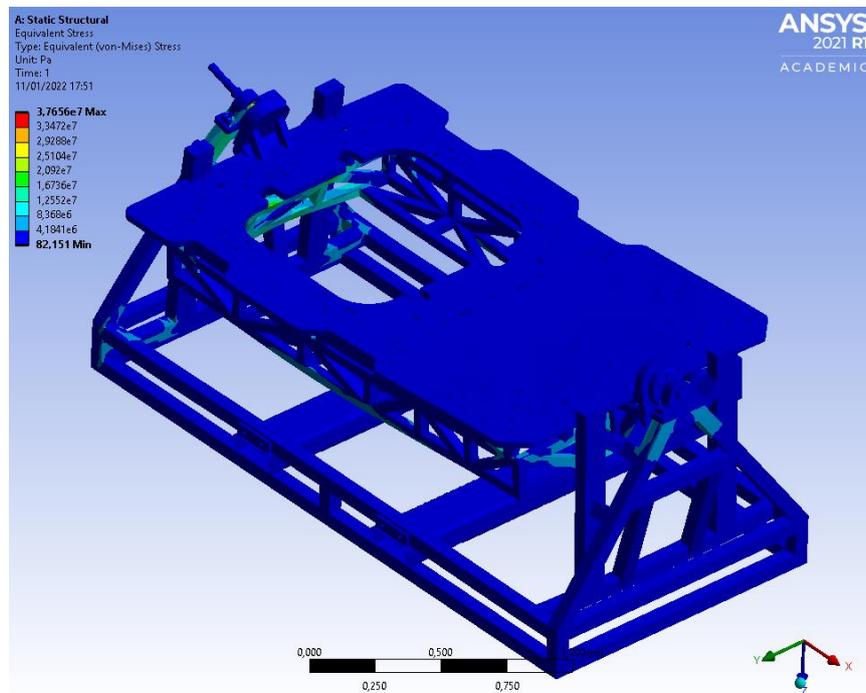


Ilustración 43- Cálculo de elementos finitos modelo 4 (4).

Lo que primero llama la atención del cálculo de tensión (Ilustración 43- Cálculo de elementos finitos modelo 4 (4).) es la ausencia de tensión en la placa base. Esta circunstancia era necesaria desde el primer momento, puesto que la maqueta no debe soportar ningún trabajo estructural. El motivo es el cambio de la parte de los ejes. El apoyo sobre el que reposa todo el peso suspendido se suelda directamente al bastidor superior, dejando descansar la placa base apoyándola de forma simple, algo muy positivo.

Lo siguiente que llama la atención es la monotonía cromática, tanto en el cerchado que se acaba de introducir como en los refuerzos de los pilares del bastidor inferior. Todo este material introducido con el objetivo de aumentar la rigidez no está dispuesto de manera adecuada. Se introduce peso que no aporta trabajo estructural, aumentando el peso suspendido y por tanto las deformaciones. Es conveniente una reflexión en este sentido.

La zona de máximos se vuelve a situar una vez más en el eje de la ventana sobre la que se apoya el bastidor superior. El aumento de las cargas eleva esta tensión máxima hasta los 37.6 MPa.

A pesar de que el diagrama de deformaciones si parece simétrico, no sucede lo mismo en el de tensiones. Esta disconformidad se debe en parte a la forma en la que se ha colocado el cerchado. Al tener una estructura simétrica, lo normal es pensar también en un cerchado simétrico; sin embargo, no encontramos esta analogía. Los motivos no son del todo claros, la única razón podría ser dar continuidad al cordón de cerchas que se va disponiendo.



Por último, viendo el bastidor en conjunto, se observa que la mayor parte de las tensiones las concentran las zonas delantera y trasera. Ya se ha visto que en esta zona incluso se encuentra el pico de tensión máximo. La parte cerchada apenas trabaja, por lo que se considera un peso inútil.

## 7.2.5 Conclusiones del análisis de los 4 bastidores

Para finalizar, se van a comentar por último los cuatro resultados en conjunto.

La morfología del bastidor ha quedado clara. Los cuatro modelos constan de un bastidor inferior fijo que hace de soporte de uno superior capaz de girar sobre su eje longitudinal dándole la vuelta a la maqueta que lleva acoplada encima. Vemos que en general dominan las barras en acero, huecas y rectas de sección rectangular. A lo largo de la evolución del conjunto principalmente se van colocando nuevos refuerzos en forma de estas barras intentando aportar más rigidez al sistema. Esta idea queda perfectamente ilustrada en el último modelo, donde se decide un diseño colocando cerchas estilo Warren a lo largo de todo el bastidor.

El hueco de la ventana es respetado siempre. La zona del bastidor superior evita esta parte en parte dejando el hueco de debajo libre. Se trata de una especificación de cliente que da un punto más de dificultad a un diseño que de otra manera sería más intuitivo.

El sendero que sigue la evolución del modelo es sencillo; se trata de ir colocando barras en lugares aparentemente más débiles que podrían ayudar a rigidizar más la estructura. Sin embargo, se encuentra un problema siguiendo esta filosofía: el aumento de peso. Ya se ha comentado que el aumento de peso y previsiblemente en concordancia, de soldaduras, trae asociado un encarecimiento del precio del modelo. Dejando esta idea en un segundo plano por ahora, se ve también que un incremento de peso en el modelo no tiende a mejorar los resultados en cuanto a desviación. La tendencia de las deformaciones es alcista según se va aportando peso en la zona de la flexión. Esto se explica en parte con el diagrama de las tensiones. Por lo general vemos que las zonas en las que se introduce material no ayudan a la estructura a soportar mejor las tensiones; no provocan un reparto equitativo lo que quiere decir que son aportaciones estériles en el proceso de rigidización.

Se parte de un modelo de bastidor muy alejado de lo que se busca, y los resultados se tornan algo más aceptables cuando se sustituye el apoyo puntal en el tercer modelo. Sin embargo, el último vuelve a alejarse de lo que se está buscando. Esta situación queda perfectamente ilustrada si representamos los resultados:

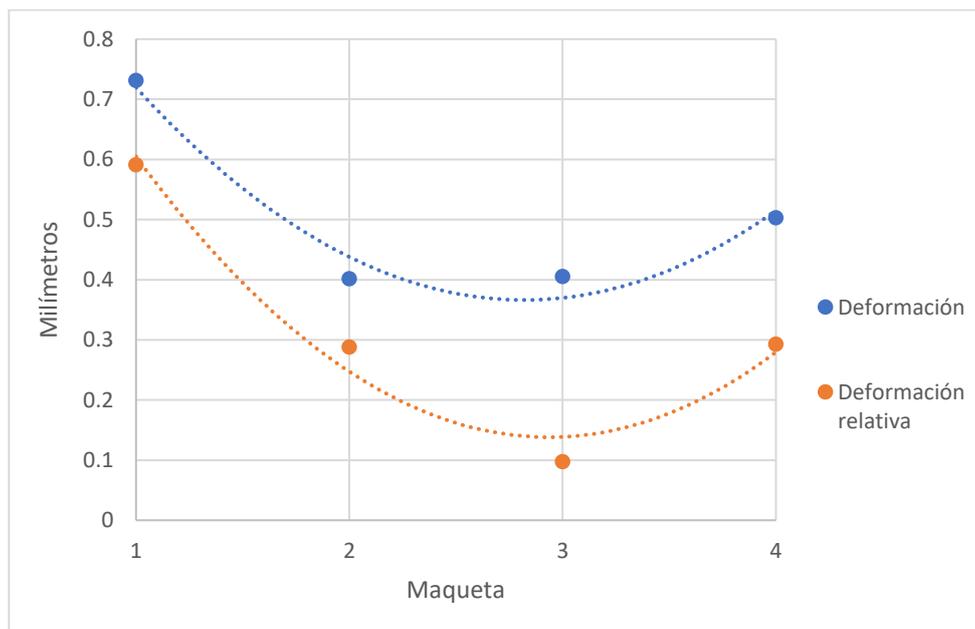
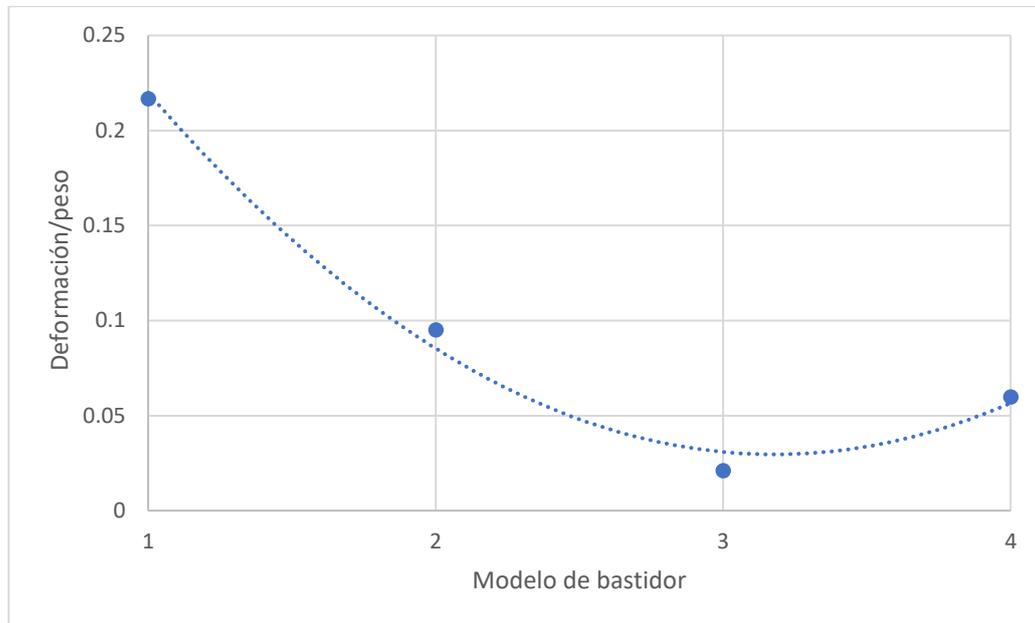


Ilustración 44- Gráfico deformaciones.

Sabiendo los pesos de cada modelo, se puede establecer un ratio entre deformación y peso para expresar el nivel general de trabajo del material (Ilustración 45- Gráfica ratio deformación/peso.). Evidentemente es un valor que sirve para hacernos una idea del nivel de optimización del diseño y si se trabaja en una línea correcta, pero no tiene ninguna utilidad a nivel numérico.



**Ilustración 45- Gráfica ratio deformación/peso.**

Lógicamente, el patrón que siguen ambos gráficos es el mismo. La conclusión es que en el momento en el que se descarta el tercer bastidor para diseñar el cuarto se sale de la línea de trabajo correcta, puesto que ya no conviene introducir más peso.

Es cierto que las condiciones del problema cambian entre el tercer y el cuarto caso, puesto que son proyectos diferentes y en el cuarto bastidor se debe salvar una distancia mayor. Sin embargo, se considera que las posibles diferencias tienen una influencia irrelevante en la disposición de los gráficos; sirven igualmente para extraer nuestras conclusiones.

Para la descripción de la solución propuesta en el siguiente capítulo se partirá del último modelo de bastidor, el cuarto. A partir de él se irán introduciendo cambios en base a las sucesivas etapas de cálculo a las que se van sometiendo. Los criterios y las ideas en las que se basa el enfoque de los sucesivos cambios se exponen más adelante en la parte de la metodología seguida en el desarrollo del proyecto.

## 8. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

---

### 8.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se va a exponer cual es el modelo que finalmente se propondrá como solución al problema en cuestión.

Previamente se ha comentado brevemente la naturaleza del problema que se tiene en frente. Previsiblemente se tendrá una solución de naturaleza abierta. Lógicamente la existencia de deformación es inevitable sea cual sea la morfología del bastidor; es un hecho que se asume desde el inicio. Como se ha dicho, en el caso de ser excesiva, esta desviación se salvará de manera correctiva tal y como se ha venido haciendo hasta el momento. Ha de tenerse en cuenta que en la calidad del producto final influyen más variables que únicamente su diseño; existen diversas fuentes de error. Los beneficios de un buen diseño suponen converger más rápidamente a un producto comercial final sin necesidad de colocar calces o mecanizar piecero, acortando tiempos y ganando capacidad de trabajo y margen de maniobra en esta clase de proyectos.

Puesto que la solución tiene este carácter indeterminado y en parte también por la implicación de las posibles variaciones de longitud a salvar (en este mismo trabajo se exponen dos modelos de maqueta de dimensiones diferentes, una 170 milímetros más larga que otra), se ha pensado en un modelo final ligado a un parámetro dimensional único. La idea es que la flexión de la maqueta dependa directamente de este parámetro. De este modo, si interesa una menor flexión, puede regularse alterando a voluntad únicamente esta dimensión. Podría pensarse que esta dependencia es una tarea intuitiva, sin embargo, ya se ha comprobado durante la etapa de cálculo que una introducción desmedida de material a lo largo del bastidor superior, sin el control del resto de las partes (uniones, morfología del bastidor inferior, soportes...), supone simplemente un aumento de peso y, por lo tanto, de flexión y deformación.

Hasta llegar a un modelo tangible que cumpla estas expectativas, se atraviesan dos etapas, una de diseño y otra de cálculo. Realmente ambas se han ido sucediendo alternativamente, de tal modo que en determinados momentos se diseñaba, se calculaba, y luego se volvía a rediseñar tratando de corregir aquellas zonas en las que se intuía cierta invalidez. Progresivamente se iba obteniendo un modelo actualizado que se iba acercando cada vez más a nuestra solución final. Detener este proceso iterativo ha dependido de varios motivos. Llegado el momento, se ha considerado que no compensaba introducir más modificaciones en el modelo respecto a la posible mejora en cuanto a deformaciones. En este punto el nivel de detalle que se necesita para continuar no se ha considerado demasiado alto; en todo momento hay que tener en cuenta también que el modelo ha de ser verosímil y ajustarse al contexto en el que se encuentra. Por otro lado, como también se ha dicho antes, las fuentes de error tienen naturalezas variadas e incontrolables más allá de este proyecto y el diseño del bastidor, por lo que tampoco tiene coherencia avanzar a un diseño más detalle que el propuesto.

## 8.2 ETAPAS DE DISEÑO

Después del cálculo del bastidor 4 y su interpretación, comienza esta etapa de diseño. En principio se tienen dos maquetas a elegir para elaborar nuestro diseño de bastidor. Se opta por la 0411-00 del modelo 4, ya que, como se ha dicho, es más larga y dejará una situación conservadora.

Al tener un único modelo de bastidor para este calibre, se partirá de su morfología para elaborar el modelo particular. Una vez en el punto de partida, después del cálculo de este bastidor, se abren varios senderos para continuar. Se ha decidido proseguir con un diseño tipo modular ya que se ha considerado una forma ordenada que se ajustará bien al tipo de cuestión que se presenta; existe algo de incertidumbre sobre como responderá el modelo en conjunto a las modificaciones que se vayan a ir introduciendo. De este modo se permite un avance más seguro y una mejor capacidad de maniobra a lo largo del diseño y el cálculo.

Se ha decidido segmentar el problema y solucionar cada una de las partes por separado para después cohesionar todas y tratar llegar a una solución final. De esta manera se ha dividido el conjunto bastidor-maqueta en diferentes partes que se han considerado que influyen de manera diferente y con cierta independencia dentro del problema en estudio. Cada una de estas partes se ha tratado de rediseñar, interpretando sus comportamientos por separado. Una vez rediseñado cada módulo, se ha reensamblado imponiendo las antiguas restricciones geométricas para poder introducir el archivo en el software de elementos finitos y proceder a su cálculo.

Dentro del ensamblaje principal se encuentran zonas intuitivamente independientes y otras zonas que requieren de una especial atención por su influencia dentro del conjunto. Se han diferenciado cinco partes: bastidor superior, soportes INA, ejes, bastidor inferior y nervios. Están nombrados según su relevancia en la variación de desviaciones de la placa base, ordenados de mayor relevancia a menor. Cada módulo es modificado de forma independiente a los otros.

Existe un por qué de esta segmentación, que surge viendo los problemas que tiene el bastidor. Después de los análisis hechos en el capítulo anterior, se han identificado las fuentes de deformación de la maqueta. Son principalmente tres: la flexión de los pilares del bastidor inferior, la flexión del bastidor superior y los nervios y las imperfecciones en el empotramiento de la unión entre ambos. Es por estos tres motivos que se da esta clasificación. Cada segmento pertenece e influye de manera independiente en uno de estos tres problemas.

Visualizando en la Ilustración 46- Problemas estructurales y módulos asociados. esta relación de dependencia entre módulos y problemas:

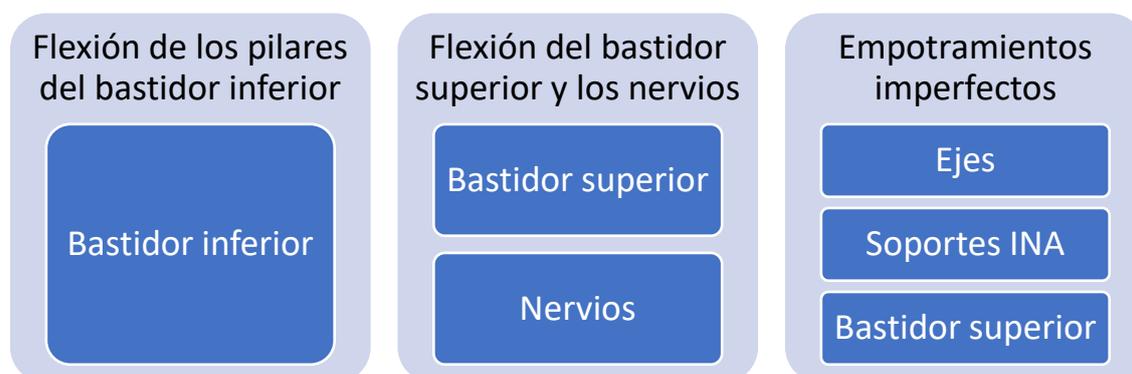


Ilustración 46- Problemas estructurales y módulos asociados.

La flexión de los pilares del bastidor inferior se atribuye al módulo del bastidor inferior, la flexión del bastidor superior y los nervios se atribuye lógicamente a los módulos del bastidor superior y los nervios mientras que por último el problema de las imperfecciones en los empotramientos se atribuye a los módulos de los ejes, los soportes INA y el bastidor superior. Entre ellos, los problemas son considerados independientes, de tal manera que la flexión del bastidor superior no influye por ejemplo en los empotramientos, ni se considera que los empotramientos influyen en el comportamiento a flexión de los pilares del bastidor inferior.

A continuación, se explicarán estos módulos en los que se ha dividido el conjunto y su evolución a lo largo de la etapa de diseño. Para entender la evolución en su forma es aconsejable tener en cuenta en ocasiones la fase de cálculo posterior, ya que, como se ha comentado antes, las etapas de diseño y cálculo son etapas alternativas donde el avance de una requiere del avance de la otra.

### 8.2.1 Bastidor superior

Se trata del entramado metálico que se encuentra inmediatamente debajo de la placa base (Ilustración 47- Bastidor superior montado con el resto de módulos.). Es el responsable de dotar de rigidez a la maqueta y aguantar su peso. Su geometría es compleja, pudiendo adoptar formas diferentes y admitiendo muchas modificaciones en cuando a dimensiones y distribución de los perfiles de su interior. Además, influyendo en dos de tres problemas será parte muy importante en la etapa de diseño.

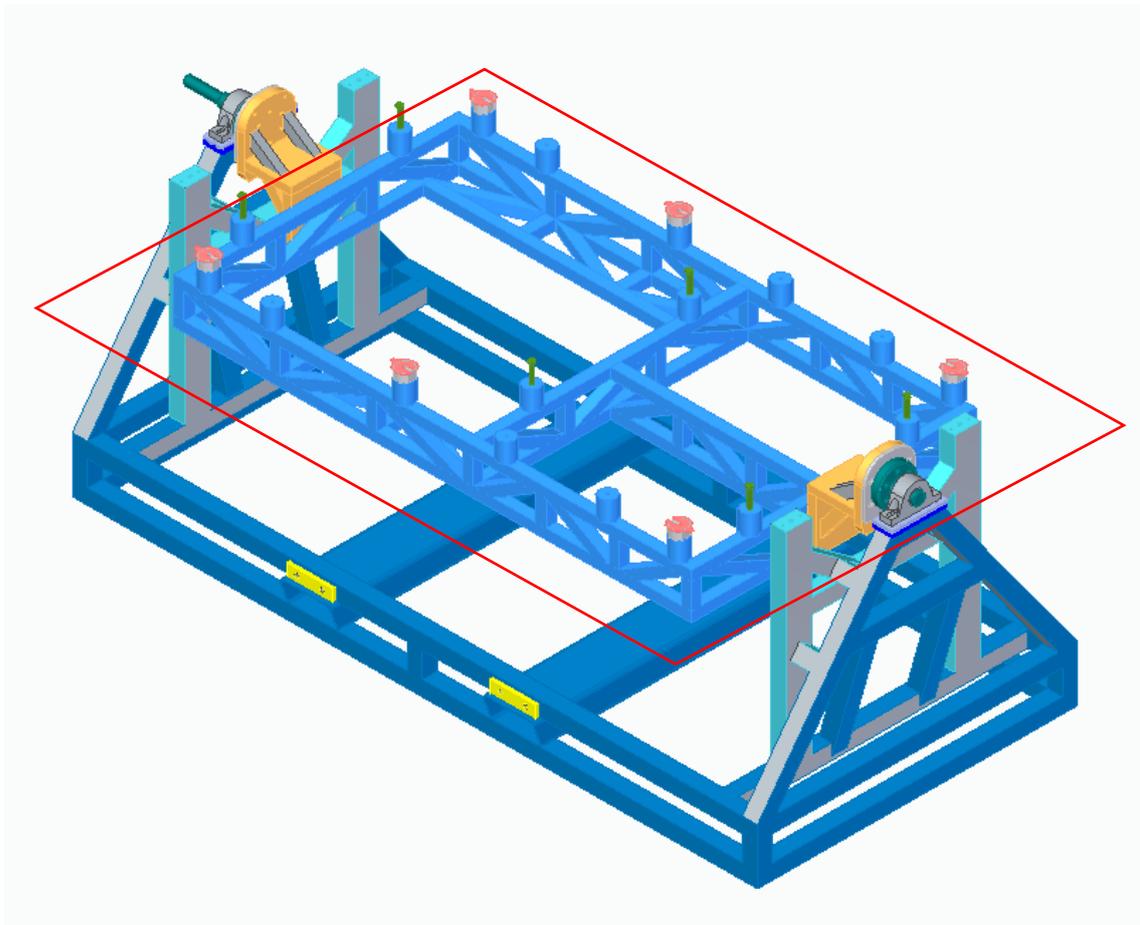


Ilustración 47- Bastidor superior montado con el resto de módulos.

Este es el segmento que más cambios va a incluir. Se han elaborado hasta 9 modificaciones de esta parte. A lo largo de esta transformación se van a diferenciar dos tendencias de modelado. La primera se basa en ir retirando progresivamente material para aligerar el peso que se encuentra suspendido. Se retirarán cerchas y barras que se interpretan que no aportan ningún valor estructural. La siguiente tendencia es ir colocando determinados refuerzos en zonas de altas tensiones para poder rigidizar la estructura. La idea es identificar las partes que más cargas van a soportar, y tratar de repartir sus esfuerzos añadiendo más material; en otras palabras, diluir las concentraciones de tensión. En esta parte veremos una clara mejoría en los resultados en cuanto a deformaciones y un reparto de tensiones mucho más eficiente. La razón de ser de estas dos diferentes tendencias es poder comenzar a hacer frente al problema de la deformación desde una situación ventajosa, partiendo de un modelo más ligero.

#### MODIFICACIÓN 0

Se trata del bastidor superior que incorpora el cuarto bastidor, el punto de partida del nuevo diseño. Su forma sigue siempre el contorno de la maqueta, respetando la ventana en todo momento. Se parte de un modelo cerchado de una longitud de 2296 milímetros.

Se aprecian dos refuerzos también cerchados, en los contornos de la zona de la ventana y en el centro de la parte opuesta. Ambos están unidos gracias a una tercera parte cerchada. En este punto de partida se tienen 197.5 kilogramos de peso suspendido. Pese a la carga de barras en todo el bastidor, ya se ha visto que los resultados no son especialmente buenos ni en cuanto a deformación máxima ni en cuanto a deformación relativa.

Se aprecia la asimetría del cerchado sobre entre las partes de la ventana y su opuesta, lo que indica que no ha habido un criterio serio a la hora de imponer esa solución. Previsiblemente esto provocará un reparto desigual de tensiones, haciendo que una zona trabaje más que otra.

A continuación, se presenta una imagen de la morfología de partida:

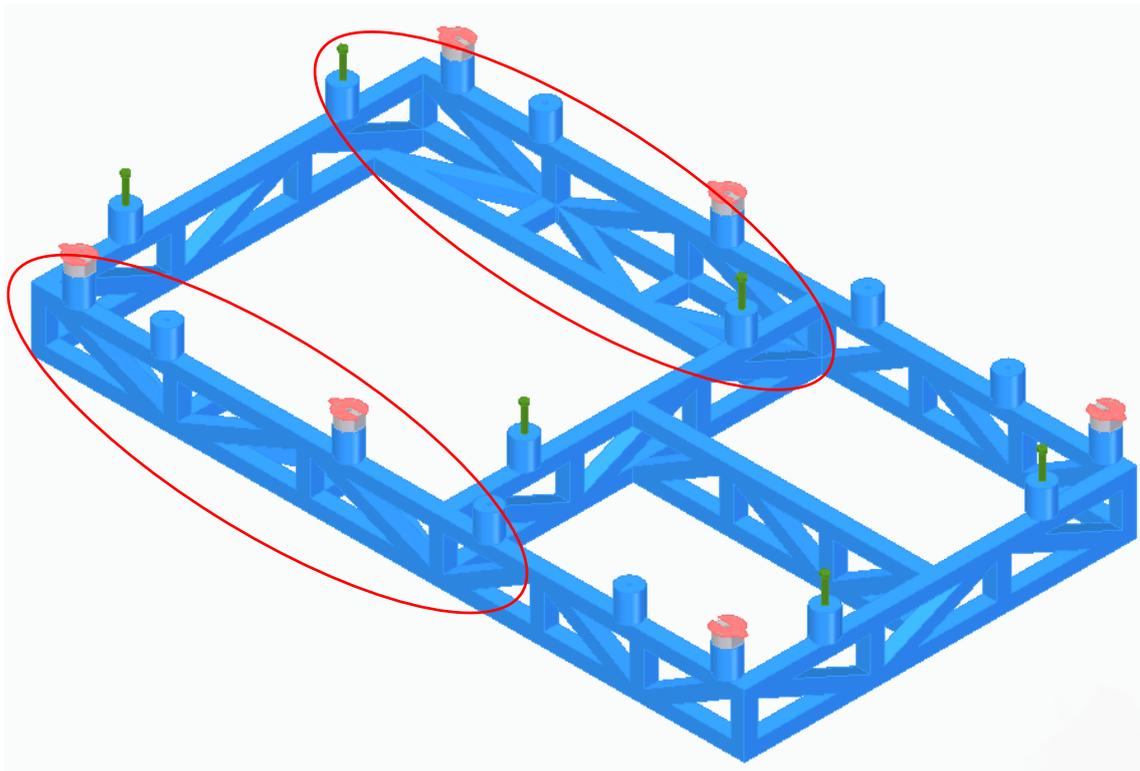


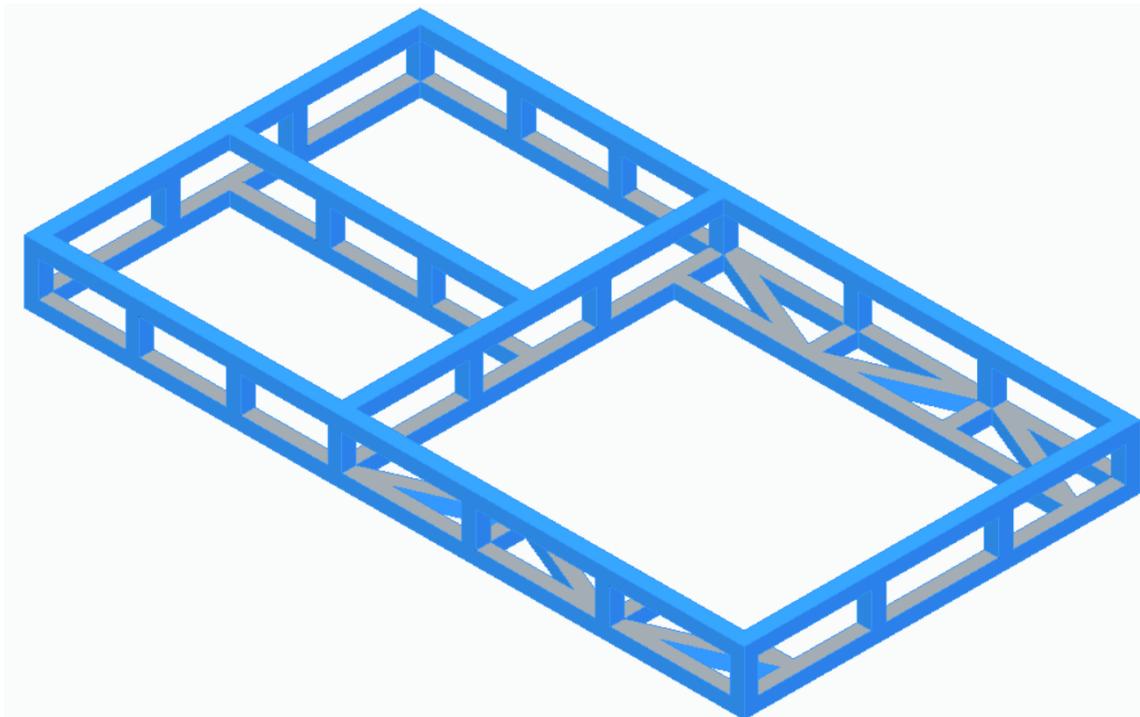
Ilustración 48- Refuerzos cerchados en modificación 0 de bastidor superior.

#### MODIFICACIÓN 1

Con el objetivo de ir restando peso a la estructura se opta primero por ver cómo responde el modelo cuando se elimina completamente el cerchado lateral. El estudio previo afirma que estas barras no trabajan en exceso puesto que en el mapa de color no se aprecian tensiones altas.

El cerchado inferior que hace de refuerzo de la zona de la ventana, se mantiene. Esta es la parte más débil de todo el largo de la maqueta, donde podría pensarse que se necesita imponer alguna geometría extra para evitar la flexión. Pese a que también existen indicios de un tímido trabajo estructural, se cree que pueden aportar algo de inercia y rigidez a ese segmento. El resto de la morfología también se mantiene.

En este punto se obtiene un bastidor de 91.1 kilogramos. En la siguiente figura vemos un croquis de este modelo (Ilustración 49- Modificación 1 bastidor superior.).



**Ilustración 49- Modificación 1 bastidor superior.**

Previsiblemente, al eliminar los refuerzos de los extremos se estimulará una mayor flexibilidad en la parte de las uniones. Esta modificación es simplemente un paso en el proceso de buscar un punto de partida adecuado sobre el que empezar a construir un diseño más funcional. En la siguiente modificación se seguirá la misma dinámica, identificando ahora las zonas que siguen sin trabajar en el cálculo de tensiones.

#### MODIFICACIÓN 2

En esta modificación se sigue con esta tendencia de reducir peso. Ahora sí, se retira el refuerzo de la ventana, quedando debajo una superficie libre aún más grande. También se elimina el otro cerchado de la unión opuesta que tampoco trabaja en exceso.

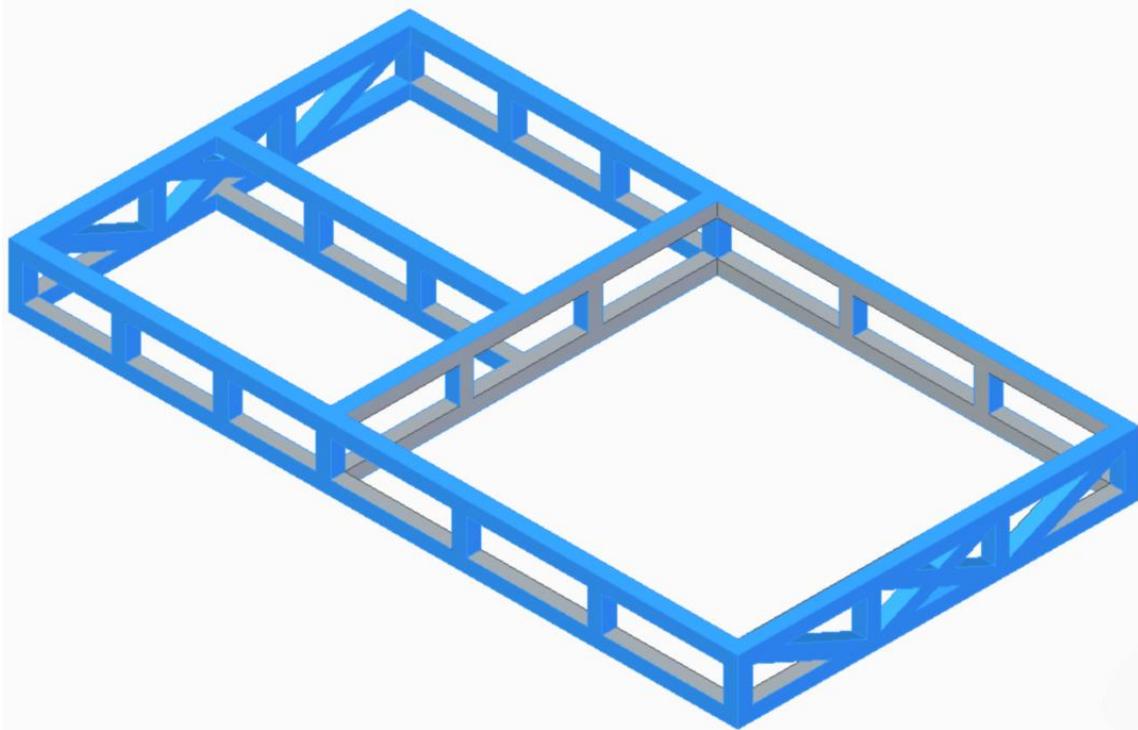
Como se podrá apreciar más adelante en el apartado de la modificación 02 del estudio de tensiones, en los dos contornos del cuerpo del eje aparecen zonas de concentración de tensiones. Se trata de una zona de gran importancia que hay que analizar con algo de detenimiento para poder entender el comportamiento de la estructura.

El peso de la estructura viaja a través de todo el entramado de barras y termina pasando por los ejes que la conectan con el bastidor inferior, que a su vez hace de soporte. Los ejes van adheridos a los extremos longitudinales del modelo. Por el simple efecto de la gravedad estos ejes flectan y empujan el cordón superior del modelo hacia el interior, y atraen el cordón inferior hacia el exterior.

El objetivo en esta etapa también es tratar de rigidizar, en la medida de lo posible, esa unión soldada entre estos ejes y el bastidor superior. Para ello se opta por introducir un cerchado en la disposición de la imagen. Estas barras atacan la deformación rigidizando la unión y diluyendo un poco la zona de concentración de tensiones. En el centro vemos dos perfiles en forma de cruz que refuerza la zona de la soldadura, aumentando el contacto con el eje y previsiblemente facilitando la transmisión de estas tensiones.

La colocación de estos refuerzos se considera un paso importante en el proceso de diseño. Más adelante, en el capítulo de procedimientos se explicará con más profundidad el porqué de esta geometría.

En este punto se obtiene un bastidor de 48.1 kilogramos. En la siguiente figura vemos un croquis de este modelo (Ilustración 50- Modificación 2 bastidor superior.).



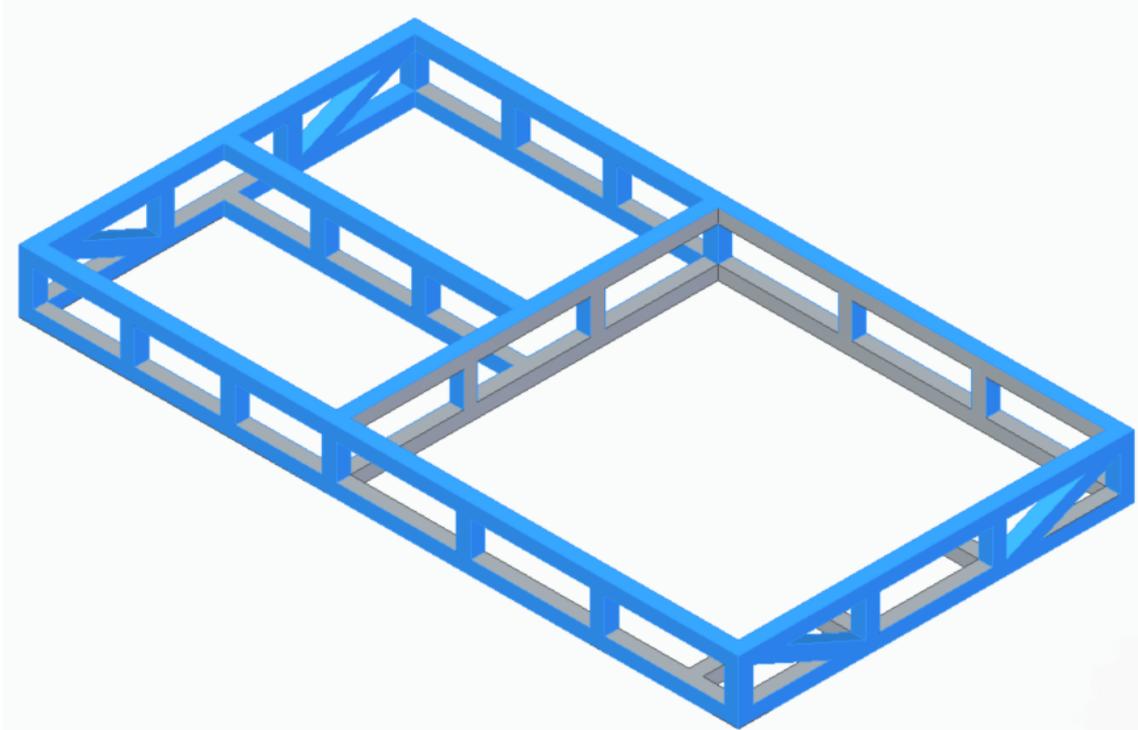
**Ilustración 50- Modificación 2 bastidor superior.**

A partir de esta modificación entramos en la tendencia de repartir tensiones colocando refuerzos. Los cambios en este modelo y los venideros se entienden mejor interpretando los estudios de elementos finitos.

### MODIFICACIÓN 3

Visualizando de perfil el análisis del modelo de bastidor M04 se ve una disconformidad entre la parte de la ventana y la parte maciza. La unión con el eje en la zona de la ventana sufre más. El motivo es fácilmente comprensible; se debe al refuerzo intermedio de la zona opuesta. Hace a esta parte más robusta y rigidiza la unión, evitando la caída que sí que se aprecia en eje del lado de la ventana.

En este punto se obtiene un bastidor de 48.9 kilogramos. En la siguiente figura vemos un croquis de este modelo (Ilustración 51- Modificación 3 bastidor superior.).



**Ilustración 51- Modificación 3 bastidor superior.**

Entendiendo esto es fácil identificar el siguiente paso. Ha de colocarse un refuerzo en el extremo de la ventana para tratar de compensar la estructura. La idea es la misma que en la modificación anterior. Hay que evitar la torsión del cordón superior, donde se encuentra la concentración de tensiones. Con el fin de evitar esta torsión, el refuerzo irá dirigido a estabilizar el cordón inferior de esta zona.

El cerchado en forma de cruz que si que existía en el caso anterior se ha optado por eliminar. El motivo tiene que ver con la modificación de los ejes. El contorno del eje donde se incluirá la soldadura que lo una con el bastidor, se ha hecho coincidir con la cuadrícula central del bastidor superior; de esta manera hay una mejor repartición de las tensiones en la unión y obtenemos un modelo con menos deformaciones. Para entender esta evolución es recomendable consultar también el apartado de modificación 01 de los ejes, donde se expone la primera modificación del módulo de los ejes.

#### MODIFICACIÓN 4

Llegados a este punto, los resultados indicarán que la idea de colocar un refuerzo es buena, aunque insuficiente. En cualquier caso, la concentración de tensiones ha cambiado, disipándose un poco. La barra recién colocada está sometida a esfuerzos, algo considerado positivo puesto que diluye esta concentración. Se opta por continuar insistiendo en esta idea, colocando una barra superior para poder rigidizar aún más la unión.

Se considera muy importante cumplir con esta condición de rigidez en las uniones. En realidad, el fallo común en los cuatro modelos de bastidor que propuso CIDUT residía en esta parte. Introduciendo peso destinado a corregir la flexión, se contribuía a forzar esta parte y hacer las uniones cada vez más flexibles. Como se verá en los cálculos posteriores, corregir este aspecto es una de las partes más importantes para poder obtener unos buenos resultados.

En este punto se obtiene un bastidor de 84.9 kilogramos. En la siguiente figura vemos un croquis de este modelo (Ilustración 52- Modificación 4 bastidor superior.).

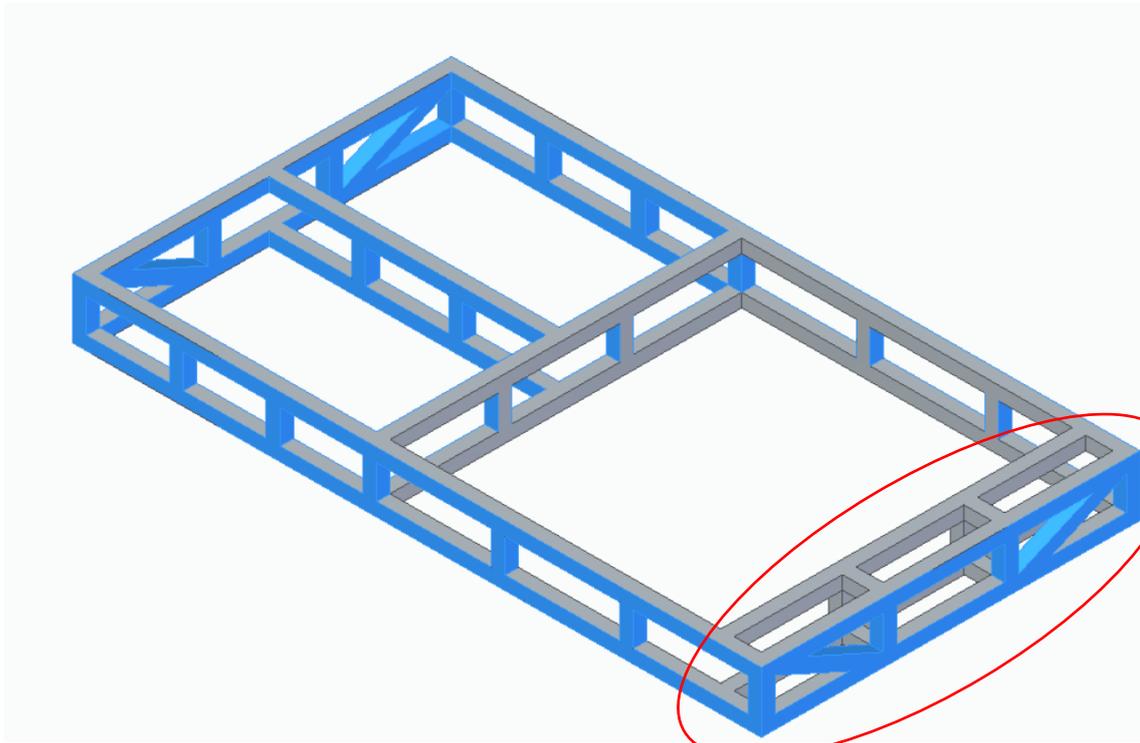


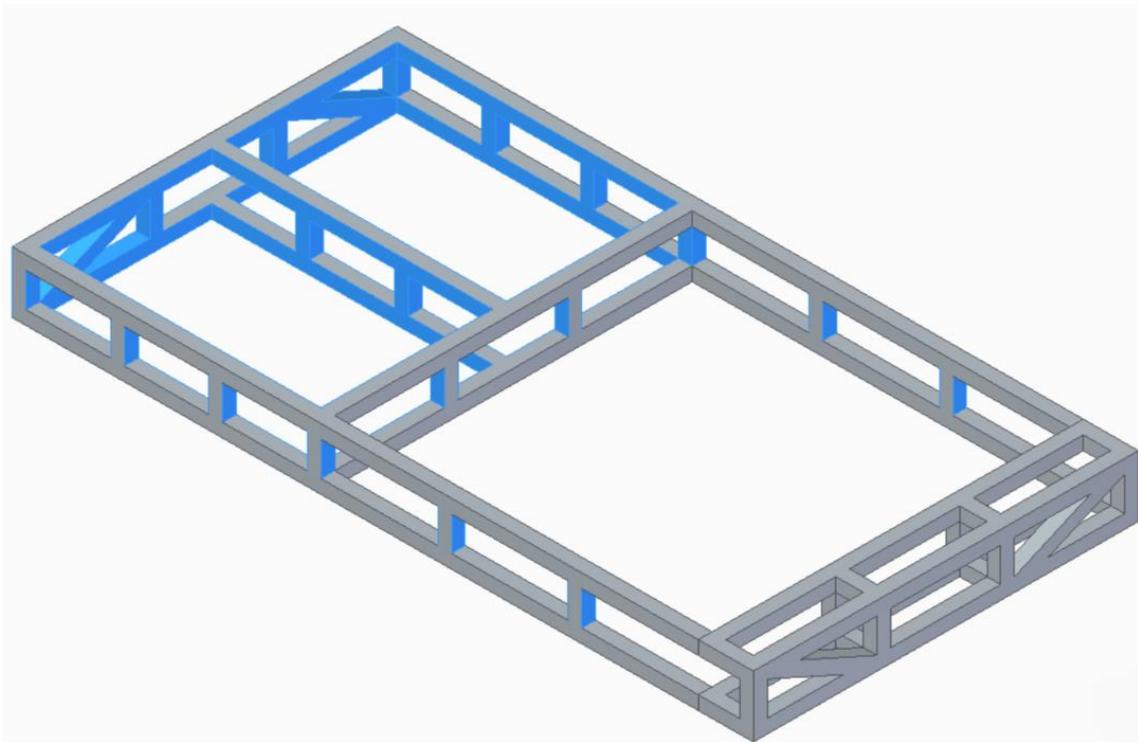
Ilustración 52- Modificación 4 bastidor superior.

## MODIFICACIÓN 5

Esta modificación se incluye más bien con la intención de corregir un nuevo problema. Después del refuerzo anterior surge una interferencia entre dos partes de la estructura. Dispuestos en los cuatro huecos circundantes de la ventana van colocados unos cilindros neumáticos para poder mover los afloramientos de la ventana. Este nuevo refuerzo en forma de perfil que se acaba de introducir en la modificación anterior interfiere con estas piezas, invadiendo el espacio donde irían dispuestas. Para salvar este problema lo que se decide hacer es aumentar la longitud total del bastidor superior sobre el que estamos trabajando. De esta manera se consigue más margen para colocar el refuerzo anterior, separándolo de la zona de la ventana.

El principal problema de este nuevo cambio es que a su vez implica un cambio en los módulos de los nervios y el bastidor inferior, que deberán aumentarse en la misma longitud para que el ensamble siga manteniendo el sentido. Los apoyos sobre los que va colocada la placa base de la maqueta se colocan sobre el refuerzo que estamos introduciendo, de tal modo que se respeta lo máximo posible el conjunto bastidor-maqueta. Por lo demás, el resto de la morfología se mantiene sin cambios.

El aumento de longitud es de 150 milímetros. Con estos cambios se encuentra un modelo de 90.0 kilogramos. Como se ve, el cambio no es tan problemático en cuanto a peso se refiere. Sin embargo, es cierto que no es conveniente hacer aún más grande la luz a salvar; a pesar de todo se considera que rigidizar la unión con el eje es prioritario. En la siguiente figura vemos un croquis de este modelo (Ilustración 53- Modificación 5 bastidor superior.).



**Ilustración 53- Modificación 5 bastidor superior.**

Después de esta modificación, ambos lados se consideran suficientemente rigidizados. Las uniones se han mejorado; los resultados de la etapa de cálculo así lo demuestran. Ahora queda por tanto trabajar en la última línea, aportar inercia para evitar la flexión simple. Se trata de rigidizar el modelo en dirección longitudinal.

#### MODIFICACIÓN 6

Hasta ahora se ha hecho frente a dos problemas, reconociendo dos tendencias en el proceso de diseño. En las modificaciones 1 y 2 se ha tratado de aligerar el modelo para higienizar el diseño, eliminando sobre todo aquellas partes que hemos observado que no trabajan estructuralmente. Las modificaciones 3, 4 y 5 han ido enfocadas a resolver el problema de rigidez de las uniones, aspecto considerado muy importante y principal motivo de las desmedidas deformaciones que encontrábamos en los modelos originales.

A partir de ahora, en estas tres últimas modificaciones (6, 7, y 8) se va a intentar abordar directamente la flexión pura del nuestro bastidor. Es inmediato que la única manera de corregirla es a través de la inercia. Introduciendo más inercia, previsiblemente, se rigidizará la estructura en dirección longitudinal. La idea ahora es buscar un parámetro dimensional sencillo que defina esta inercia y permita controlar la deformación a voluntad.

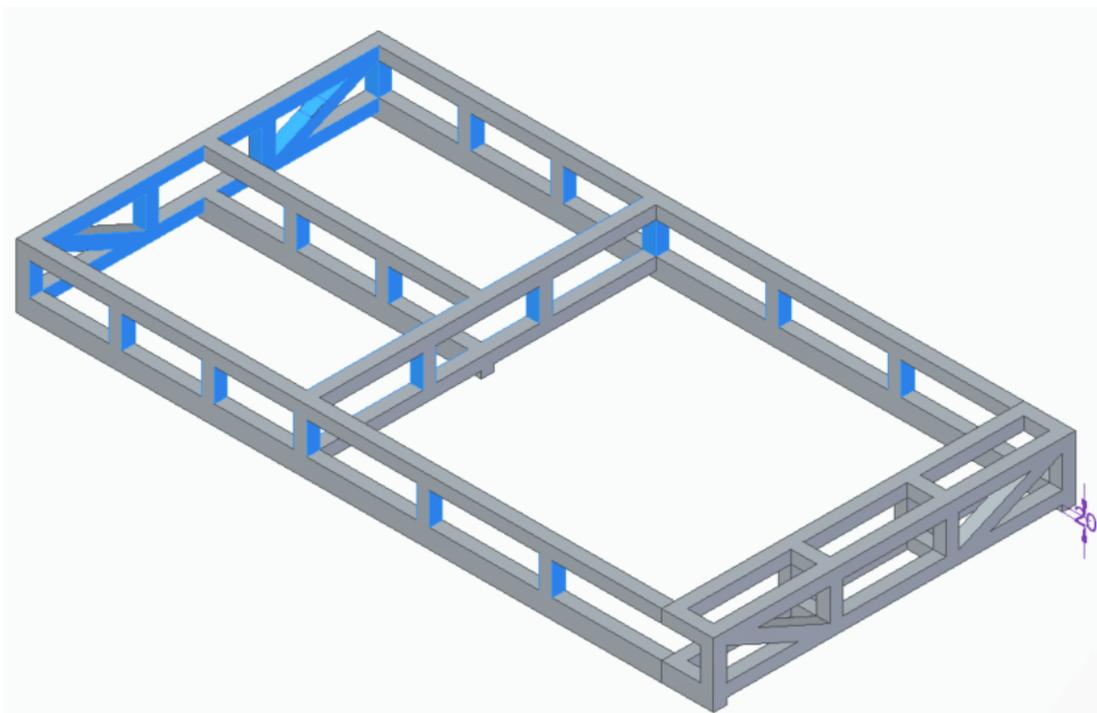
Como se comentó al principio del proyecto, la idea final del diseño era hacer depender la deformación de la placa base de una dimensión del bastidor, para poder controlarlo a nuestro gusto. Si se quiere menos deformación, este valor aumenta. Si puede permitirse más deformación, se puede disminuir este parámetro y se gana ergonomía. Una vez rigidizadas las uniones, la deformación dependerá únicamente de la flexión del bastidor superior, y esta a su vez, de una dimensión que se variará a continuación.

Principalmente, el valor que define la inercia es la altura de la sección de las barras longitudinales. Por simplificar el montaje y la estructura, se centrará el estudio únicamente en

el cordón inferior. Lógicamente las soluciones para el tratamiento de la inercia son variadas; por ejemplo, se podría también aumentar el espesor de este cordón o también el ancho de la sección. Se ha preferido simplemente cambiar la altura de la barra para interferir lo menos posible en su proceso de fabricación.

Todos los perfiles que forman la estructura nacen de una lámina de acero que se va plegando sucesivamente hasta adquirir la forma de los perfiles. Después se sueldan los dos extremos libres. De esta manera, si no se varía el espesor, se permite que todas las barras salgan de la misma lámina madre y se evitan así complicaciones.

Hay cuatro perfiles a los que se le aumenta la inercia, los tres longitudinales sobre los que se apoya el bastidor superior, y el transversal central. En esta primera parte se aumenta la altura de estas secciones en 20 milímetros. En la siguiente figura vemos un croquis de este modelo (Ilustración 54- Modificación 6 bastidor superior.).

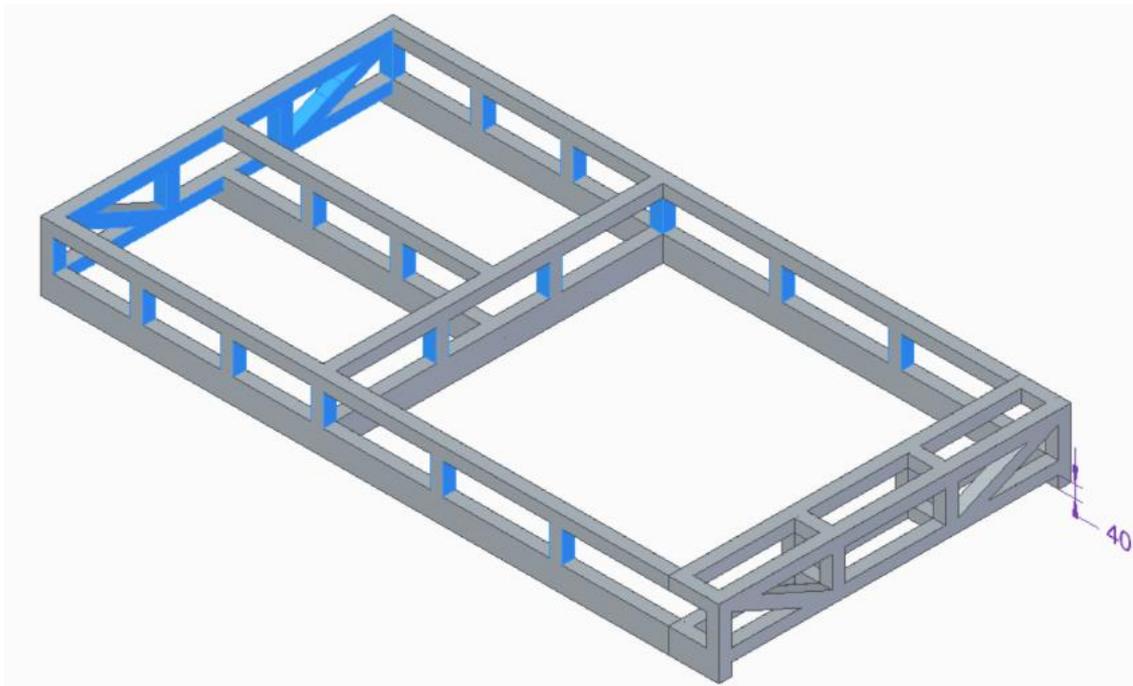


**Ilustración 54- Modificación 6 bastidor superior.**

## MODIFICACIÓN 7

Siguiendo el razonamiento anterior, la sección se aumenta otros 20 milímetros de altura pasando ahora a medir 40 milímetros. Llegados a este punto el peso es de 98.2 kilogramos.

El resto del bastidor se mantiene sin cambios. En la siguiente figura vemos un croquis de este modelo (Ilustración 55- Modificación 7 bastidor superior.).

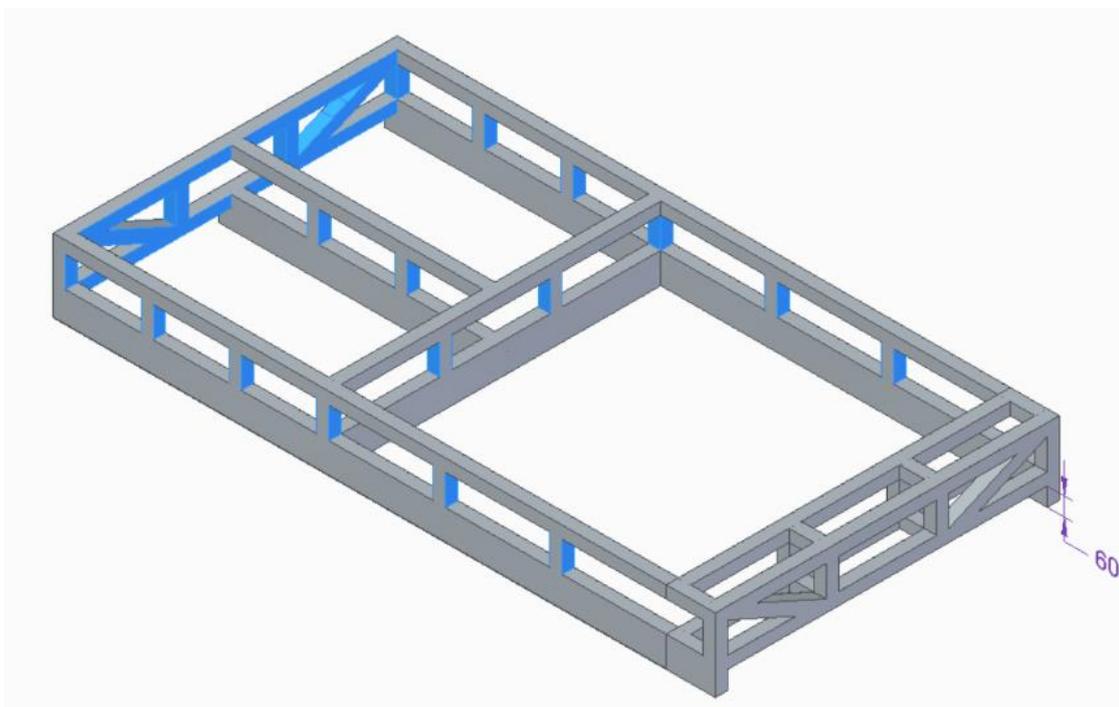


**Ilustración 55- Modificación 7 bastidor superior.**

#### MODIFICACIÓN 8

Al igual que en la modificación 7, se aumentan otros 20 milímetros, lo que da un total de 60 milímetros de altura de la sección. Llegados a este punto el peso es de 100.1.

El resto del bastidor se mantiene sin cambios. En la siguiente figura vemos un croquis de este modelo (Ilustración 56- Modificación 8 bastidor superior.).



**Ilustración 56- Modificación 8 bastidor superior.**

Los resultados en cuanto a tensiones y deformaciones se abordarán más detenidamente en el siguiente capítulo, donde se podrá ver la influencia que han tenido estas modificaciones. A continuación, se presenta una tabla resumen en la que se describen los cambios y se anota el valor del peso de los sucesivos modelos.

<b>MODIFICACIÓN</b>	<b>Kg</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>0</b>	197.5	Punto de partida
<b>1</b>	91.1	Se elimina el cerchado lateral
<b>2</b>	48.1	Se elimina el cerchado inferior y se coloca en las zonas 1 y 2
<b>3</b>	48.9	Se refuerza el cordón inferior de la zona 2
<b>4</b>	84.9	Se refuerza otra vez el cordón inferior de la zona 2
<b>5</b>	90.0	Se aumenta la longitud del bastidor
<b>6</b>	94.1	Se aumenta la altura de la sección a 60 mm
<b>7</b>	98.2	Se aumenta la altura de la sección a 80 mm
<b>8</b>	100.1	Se aumenta la altura de la sección a 100 mm

**Tabla 1- Descripción de las modificaciones del bastidor superior**

## 8.2.2 Soportes INA

Soporte INA da nombre a una única pieza responsable de la unión entre la parte rotativa y la parte fija. Se trata de una zona muy pequeña que está obligada a soportar fuertes cargas. Sobre ella descansa el bastidor superior, por lo que es parte fundamental en el sistema estructural. Será el elemento responsable del inicio de la flexión de la zona rotativa. De esta pieza depende también en gran parte la flexibilidad de la unión y cuanto se permite el giro el empotramiento. Es importante controlar su forma para obtener unos buenos resultados en cuanto a deformaciones.

Se trata de una pieza muy sencilla. Va atornillada directamente al bastidor inferior a través de dos pletinas. Al ser una pieza no muy compleja, el análisis sólo viene dominado por dos dimensiones, el ancho y el diámetro interior, puesto que no hay más aspectos que necesiten controlarse o cambiarse. Sólo se modificarán estos dos parámetros, haciendo más robusta la pieza para poder perfeccionar este empotramiento del que venimos hablando.

### MODIFICACIÓN 0

Inicialmente las dimensiones eran de 48 milímetros de longitud por 46 de diámetro. Esto producía un giro pronunciado que se iba a acentuando con el aumento del peso suspendido. El resultado es la deformación inmediata de la maqueta a través de un giro.

Se ha encontrado en sus entornos, bien en la parte del eje o bien en el propio soporte, tensiones máximas en varios de los modelos originales. Es más que necesario un cambio enfocado a diluir esta concentración y optimizar esta unión mecánica.

### MODIFICACIÓN 1

Con el fin de evitar esto, se aumenta primeramente el ancho, pasando de 48 a 68 milímetros. De esta forma se aumenta la superficie de contacto entre esta pieza y el eje con el que va unida; al haber mayor contacto, habrá un mejor reparto de tensiones y previsiblemente una menor deformación. El diámetro interior se mantiene en 46 centímetros. En la siguiente figura vemos un croquis de este modelo (Ilustración 57- Modificación 1 soporte INA.).

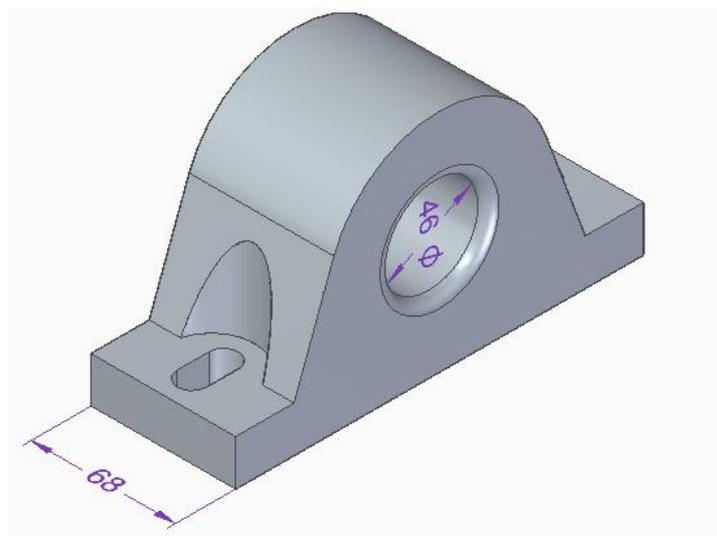


Ilustración 57- Modificación 1 soporte INA.

En este caso en particular, no se requiere de la modificación de los ejes. Previo a estos cambios, el cilindro del eje era totalmente pasante, pudiendo admitir un cambio como este sin tener que alargarlo.

## MODIFICACIÓN 2

La siguiente modificación es simplemente el paso del diámetro interior de 46 a 54 milímetros. Este cambio traerá consigo el mismo aumento del diámetro del eje, provocando una menos flexión en el mismo y dejándonos en una situación más favorable. Se observarán las tensiones disminuidas en ambas partes. En la siguiente figura vemos un croquis de este modelo (Ilustración 58- Modificación 2 soporte INA.).

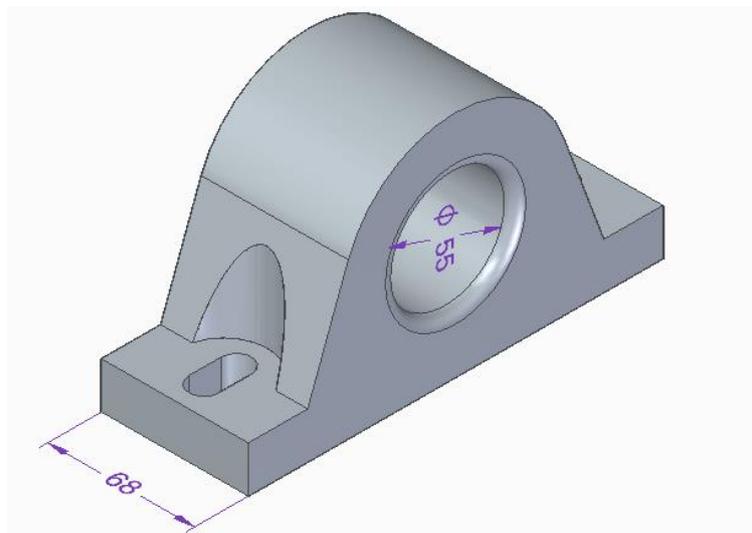


Ilustración 58- Modificación 2 soporte INA.

Para que esta modificación tenga sentido, ahora sí, tendrá que venir acompañada a su vez de una modificación en los ejes. La idea es aumentar el área de contacto, por lo que habrá que aumentar también el cilindro del eje en la misma proporción.

En este caso en concreto es importante ser precisos en las medidas, ya que esta interacción entre el soporte y el eje es un punto muy delicado dentro de la etapa de montaje. Llegado el momento es importante ejecutarla con las máximas garantías posibles, evitando holguras y tratando de que la interacción sea lo más completa posible.

Recapitulando, en este módulo se encuentran tres tipos de soportes. En la etapa de diseño se verá más claramente como han respondido. Se indican a continuación sus pesos y sus dimensiones para tener un registro más visual de las piezas que estamos manejando.

MODIFICACIÓN	Kg	DIMENSIONES
0	2.1	L48xD46
1	3.0	L68xD46
2	3.5	L68xD55

Tabla 2- Descripción de las modificaciones del soporte INA.

### 8.2.3 Ejes

Los ejes son la parte que hace de unión entre el soporte INA y el bastidor inferior. La forma de estos ejes también influye de manera significativa en el resultado, ya que al igual que el soporte INA influye en la flexibilidad de las uniones. Será importante controlar su forma para obtener un buen resultado tanto en deformaciones como en tensiones.

Los ejes son una pieza integral en acero. Con forma de escuadra, unen la parte cilíndrica que encaja dentro del soporte INA anterior con el bastidor superior. Esta escuadra se encuentra reforzada por cuatro nervios, dos en la parte superior y dos en la inferior. Una pletina facilita la unión atornillada entre el cuerpo principal del eje y la parte cilíndrica.

Los dos ejes que hay en la maqueta no son exactamente iguales; se diferencian principalmente en la parte cilíndrica. El sistema de giro que lleva asociado el conjunto bastidor maqueta y que no se presenta en este proyecto obliga a esta asimetría. Por ejemplo, introduce un chaveteado de uno de los ejes. A nivel estructural no hay cambios especialmente notorios. Los dos funcionan de manera similar, por lo que las modificaciones propuestas van destinadas a ambos indistintamente.

#### MODIFICACIÓN 0

Se trata de la forma de partida de los ejes. Principalmente se caracteriza por una geometría más bien robusta y estrecha en la parte de la unión con el bastidor superior. El eje 1 se corresponde con la parte maciza, mientras que el eje 2 lo hace con la de la ventana. Lógicamente, los diámetros que encajan en el soporte INA y que son los que interesan desde el punto de vista estructural, son iguales a ambos lados. Se observa en el eje 2 el enchavetado que se ha comentado, en la parte más esbelta de la zona cilíndrica. Esta chaveta hará de transmisión mecánica para efectuar el giro de la maqueta llegado el momento.

Las modificaciones de esta parte irán dirigidas a un único objetivo: rigidizar ambos extremos del conjunto. Para lograrlo, se trabaja en dos partes de este módulo, en la parte cilíndrica, unión del soporte INA y el eje, y en la unión soldada entre el cuerpo del eje y el bastidor superior.

A continuación, se presentan las morfologías (Ilustración 59- Modificación 0 eje 1. e Ilustración

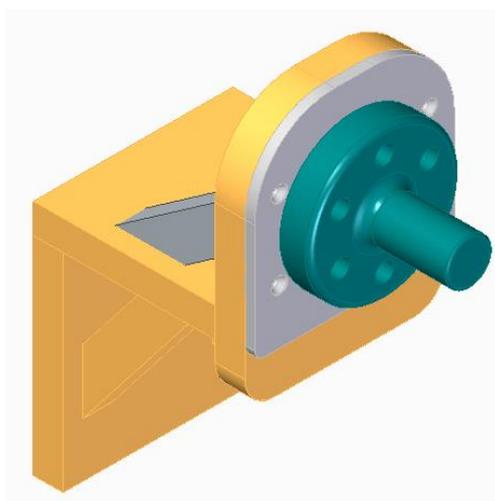


Ilustración 59- Modificación 0 eje 1.

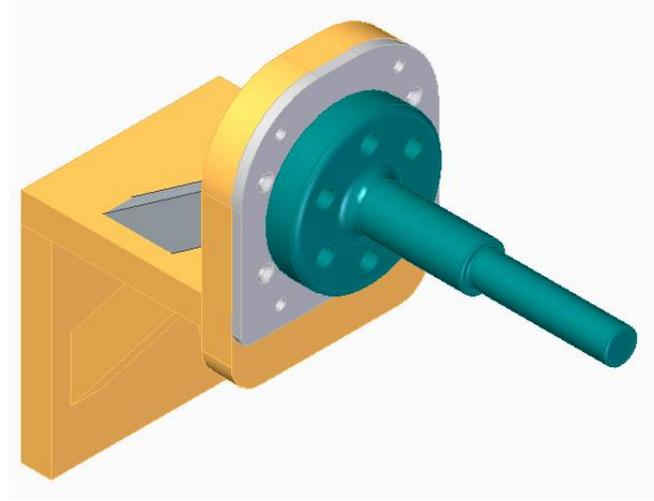


Ilustración 60- Modificación 0 eje 2.

60- Modificación 0 eje 2.) de este módulo.

## MODIFICACIÓN 1

El primer objetivo que lograr en este segmento es rigidizar la unión soldada entre el bastidor superior y el cuerpo del eje. Se ha utilizado anteriormente el adjetivo “estrecho” para describir el cuerpo de partida. El motivo de ser considerado estrecho está en la longitud soldada. El cuerpo se encuentra situado en el medio de la retícula central. Sus dimensiones de anchura no son suficientes como para adaptarse a todo el contorno de esta retícula, por lo que la superficie de contacto es menor, haciendo más cortos los cordones de soldadura. La consecuencia es un reparto de tensiones ineficiente en los cordones superior e inferior.

En este proyecto, se ha llamado eje a la parte que conecta la retícula del bastidor superior con este soporte; se han de conectar dos partes de dimensiones muy distintas. Para evitar al máximo las concentraciones de tensiones, lo más indicado es salvar estas diferencias a través de un cuerpo que atenúe el cambio.

Por otro lado, si se analiza un poco la estructura desde una perspectiva más global, se verá este eje como un apoyo puntual que descansará sobre el soporte INA. Al ser un apoyo puntual, también habrá que controlar las rigideces en dirección longitudinal

La solución a estas dos circunstancias es más bien sencilla. Ha de adaptarse el cuerpo de eje para hacerlo coincidir con la retícula central de los costados del bastidor. De esta manera se aumenta la superficie de contacto favoreciendo el reparto de tensiones y evitando en buena parte la deformación, y también conseguimos un cambio de sección más suave a lo largo del eje longitudinal de la luz a salvar.

El resultado es un ensanchamiento en la parte vertical del cuerpo y una forma trapezoidal en la parte horizontal. Los nervios son respetados tanto en geometría como en disposición. También se ha disminuido el espesor de esta parte de 30 a 10 milímetros por considerarse un exceso de material inútil. En las siguientes figuras vemos un croquis de estos modelos (Ilustración 61- Modificación 1 eje 2. e Ilustración 62- Modificación 1 eje 1.).

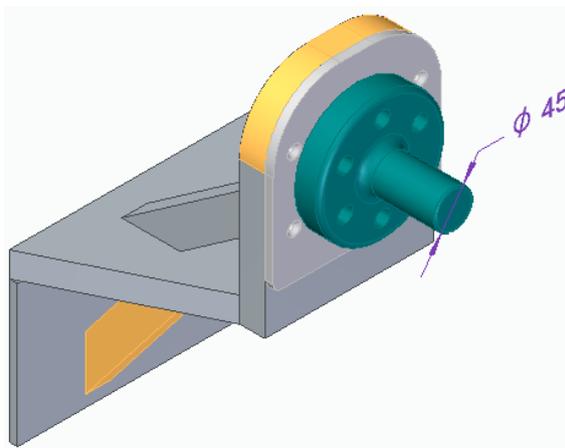


Ilustración 62- Modificación 1 eje 1.

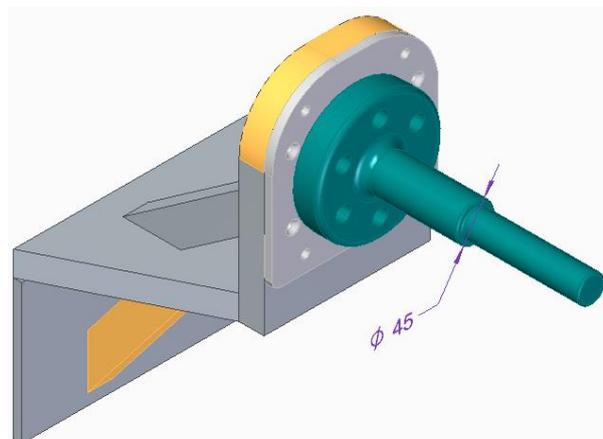


Ilustración 61- Modificación 1 eje 2.

## MODIFICACIÓN 2

Una vez abordado el problema de su unión con el bastidor superior, queda por solucionar la unión con el bastidor inferior. Esta unión se da a través del soporte INA.

En este caso, no hay muchas variables en las que se pueda incidir. El problema es simple; la zona cilíndrica se deforma en exceso como consecuencia de un momento flector. La solución es simplemente aumentar el diámetro de esta zona. La reducción de la deformación es inmediata. Por otro lado, al ser lugar de contacto con los soportes INA deberá modificarse esta dimensión de forma coordinada con la del soporte; es por eso por lo que ambas modificaciones se dan simultáneamente. El diámetro se ensancha hasta una medida de 55 milímetros de diámetro. En las siguientes figuras vemos un croquis de estos modelos (Ilustración 63- Modificación 2 eje 1. e Ilustración 64- Modificación 2 eje 2.).

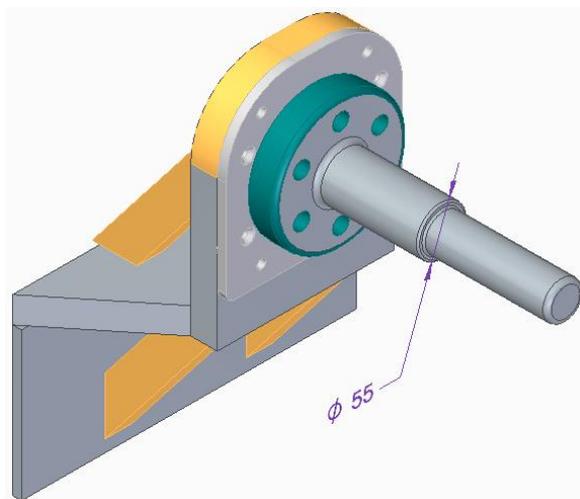


Ilustración 63- Modificación 2 eje 1.

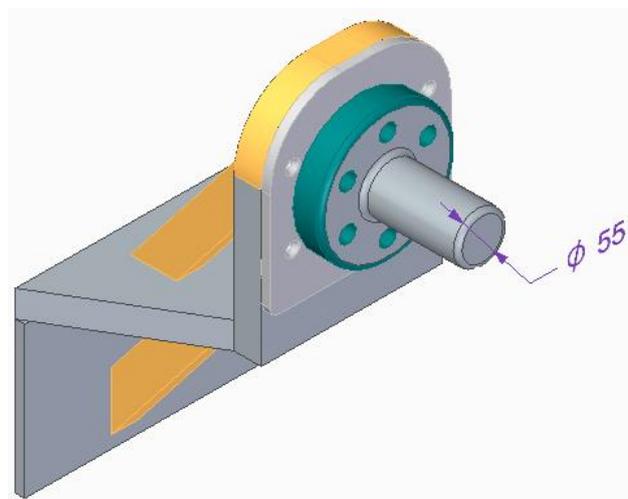


Ilustración 64- Modificación 2 eje 2.

Para concluir con este apartado, se indican pesos de las diferentes modificaciones.

MODIFICACIÓN	Kg (EJE 1)	Kg (EJE 2)	DESCRIPCIÓN
0	43.8	42.7	Punto de partida
1	57.05	54.5	Se ensancha la unión con el bastidor superior
2	39.0	40.5	El diámetro del cilindro pasa a ser de 55 mm

Tabla 3- Descripción de las modificaciones de los ejes.

#### 8.2.4 Bastidor inferior

El bastidor inferior es todo el cuerpo que hace de soporte de los módulos comentados hasta ahora. Requerirá modificaciones sobre todo en la parte vertical triangular que hace de soporte. Cabe destacar que en este módulo está formado a partir de una lámina de acero de grosor de 3 milímetros. Se trata también de la parte más pesada del conjunto, por lo que sería interesante recortar material de alguna manera de cara a abaratar costes.

##### Modificación 0

El bastidor inferior que se propone para el cuarto modelo es pesado en exceso. Los análisis hechos hasta el momento nos indican que la gran mayoría de la estructura no realiza grandes trabajos estructurales. En su lugar obligan al soporte INA y los ejes a asumir toda la deformación.

Este módulo influirá en la deformación de la maqueta en la medida en la que los pilares que la soportan flecten. A pesar de ello, el refuerzo para rigidizar los pilares se considera sobredimensionado, ya que, como se ha comprobado en los modelos originales 3 y 4, no realiza ningún trabajo.

En este punto se tienen 219.7 kilogramos de bastidor inferior. En la siguiente figura vemos una imagen de este modelo (Ilustración 65- Modificación 0 bastidor inferior.).

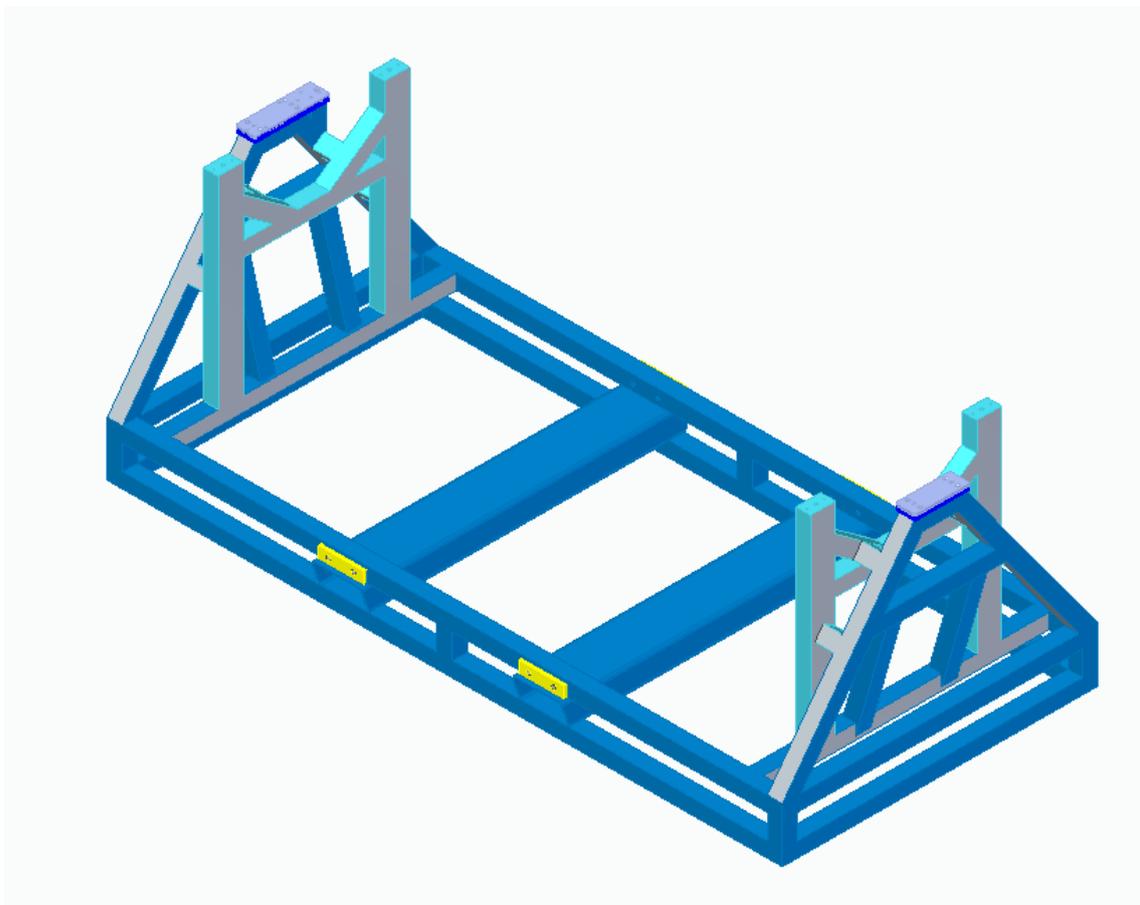


Ilustración 65- Modificación 0 bastidor inferior.

### Modificación 1

Esta modificación tiene el objetivo de recortar peso al bastidor y a la vez mantener un nivel de rigidez conveniente en los pilares. Se elimina el robusto refuerzo propuesto en el diseño original, y se sustituye por unos refuerzos en forma de perfil rectangular como los que se vienen utilizando en este módulo. Se aprecian entonces dos barras colocadas en diagonal que conectan directamente la base con la parte sobre la que descansa el mismo soporte INA.

Estos rigidizadores, se oponen directamente a la deformación que experimentarán estos pilares, aportando más inercia a lo que sería la sección del pilar y a la vez manteniendo una inclinación moderada para no interferir con el giro de la maqueta.

La modificación es igual a ambos lados, dejando un diseño simétrico.

El bastidor pesa 194 kilogramos. Se han recortado 25 kilogramos entre el modelo original y este. En la siguiente figura vemos una imagen de este modelo (Ilustración 66- Modificación 1 bastidor inferior.).

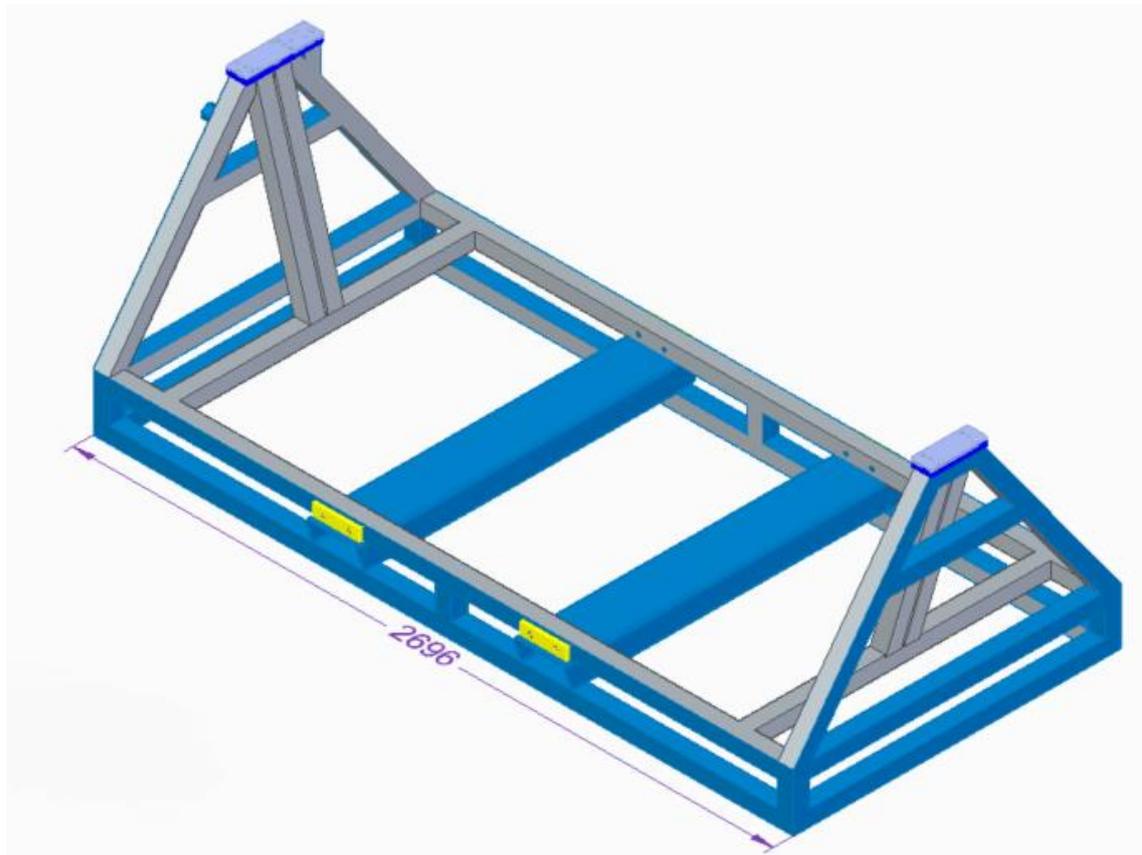


Ilustración 66- Modificación 1 bastidor inferior.

### Modificación 2

Esta nueva modificación responde simplemente a la necesidad que se ha comentado anteriormente de aumentar la longitud del modelo. Se necesita más espacio en la parte móvil para poder acoplar las modificaciones que se han propuesto y hay que adaptar el resto del ensamble en consonancia.

Se alejan por tanto los pilares 46 milímetros. El paso de palas se sigue manteniendo constante puesto que es un parámetro completamente ajeno a este proceso. El resto de la morfología también se mantiene igual. En la siguiente figura vemos una imagen de este modelo (Ilustración 67- Modificación 2 bastidor inferior.).

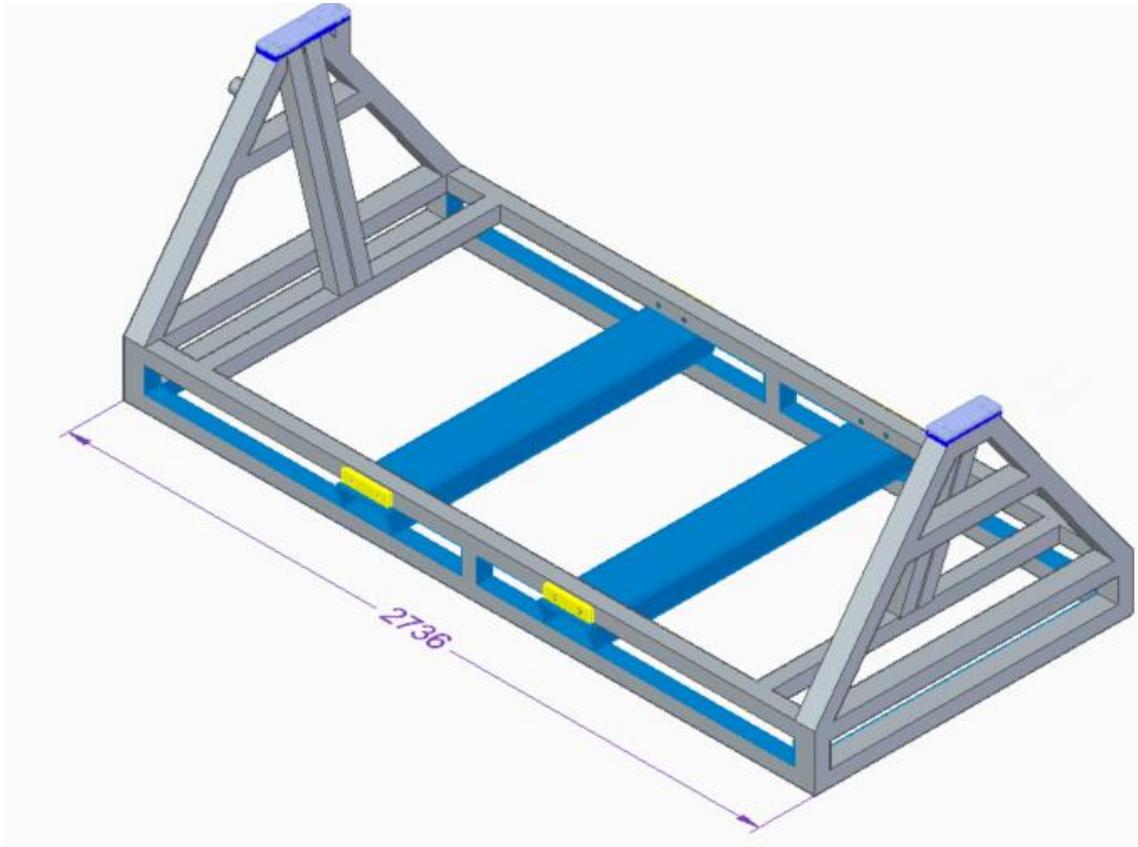


Ilustración 67- Modificación 2 bastidor inferior.

MODIFICACIÓN	LONGITUD (mm)	Kg
0	2696	219.7
1	2696	194.3
2	2736	197.8

Tabla 4- Descripción de las modificaciones del bastidor inferior.

### 8.2.5 Nervios

Este módulo se corresponde directamente con los nervios de aluminio que se colocan en la parte inferior de la maqueta. Hay tres; uno en dirección transversal más corto, y otros dos dispuestos en paralelo en dirección longitudinal. Atornillados a la placa base, guardan unas dimensiones de 80 de altura, 20 de ancho y 2350 o 940 milímetros según el nervio. Su única función es tratar de aportar rigidez a la maqueta en las direcciones en las que están dispuestos.

Este módulo tiene unas consideraciones algo particulares. Aunque su geometría y dimensiones no están sujetas a especificaciones de cliente, se considera prudente no efectuar demasiados cambios por ser un refuerzo más bien perteneciente a la zona de la placa base y no el bastidor. Pese a todo, se presentan a continuación, una modificación.

### Modificación 0

Son simplemente los nervios que se incluyen en el modelo original. Su altura en este punto es de 50 milímetros. No tienen ninguna peculiaridad especial más allá de lo antes comentado. En las siguientes figuras vemos una imagen de este modelo y su disposición (Ilustración 69- Modificación 0 nervios. e Ilustración 68- Disposición de los nervios sobre la placa base.).

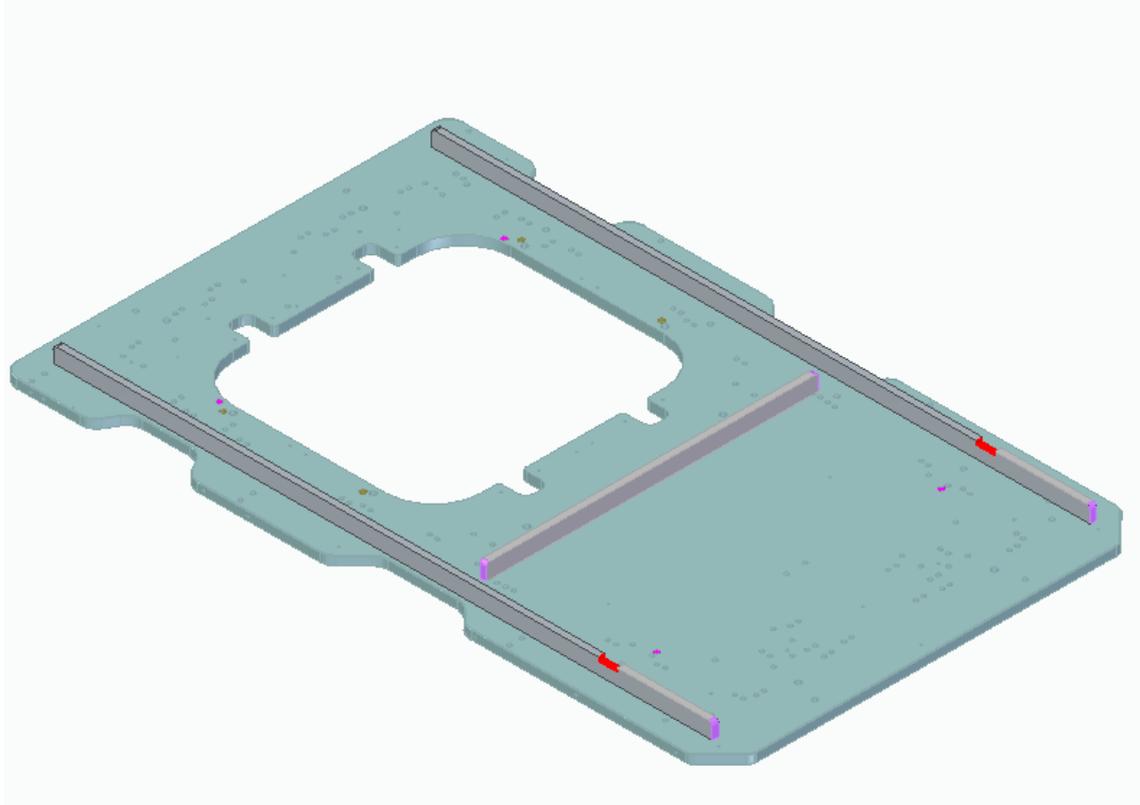


Ilustración 68- Disposición de los nervios sobre la placa base.

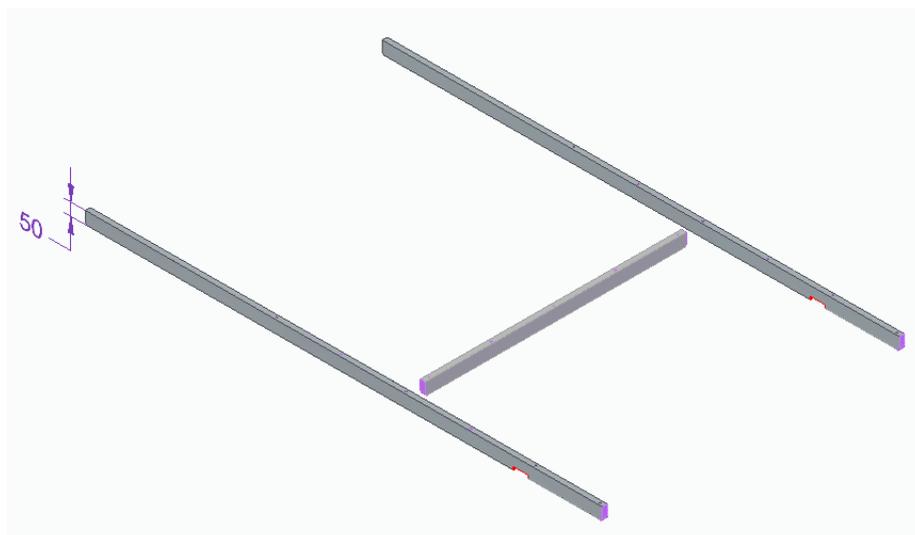


Ilustración 69- Modificación 0 nervios.

### Modificación 1

Con esta modificación se comprobará como responde el modelo cuando aumentamos la altura de estos nervios, ya que es la manera más inmediata y sencilla de aportar inercia al eje longitudinal. La altura de los nuevos nervios pasa a ser de 80 milímetros.

Se verá que al estar compuesto de aluminio y tener unas dimensiones relativamente pequeñas, su influencia es más bien despreciable. En la siguiente figura vemos una imagen de este modelo (Ilustración 70- Modificación 1 nervios.).

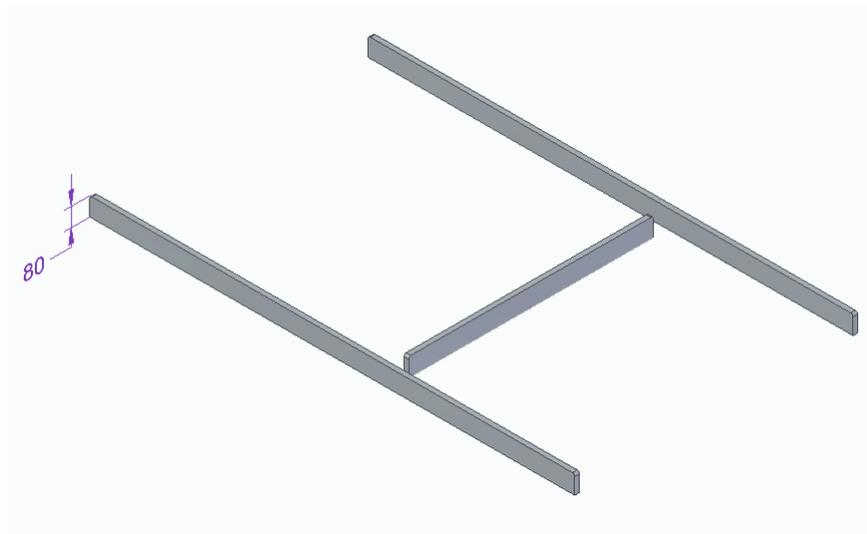


Ilustración 70- Modificación 1 nervios.

A continuación, se recogen en una tabla estos datos.

Modificación	Dimensiones sección(mm)	Kg
0	20x50	14.5
1	20x80	23.3

Tabla 5- Descripción de las modificaciones de los nervios.

## 8.2.6 Resultados de la etapa de diseño

Una vez expuestos los diferentes módulos en los que se ha separado el conjunto, se mostrarán los ensamblajes finales que se han ido obteniendo y que se han sometido a examen.

Durante la explicación anterior, en ocasiones se han encontrado cambios en determinadas modificaciones que venían motivados a su vez por cambios en las modificaciones de otros segmentos de la maqueta. Para tratar de aclarar esta cuestión se va a presentar una tabla que explicará las modificaciones de cada segmento y como se han combinado para dar como resultado diferentes modelos de bastidor. Los números se corresponden en cada caso con una modificación.

Modelo	B. Superior	B. Inferior	Ejes	Sop. INA	Nervios	Kg
0	0	0	0	0	0	520.0
1	1	0	1	0	0	413.6
2	1	1	1	0	0	388.2
3	2	1	1	0	0	354.0
4	3	1	2	0	0	379.8
5	4	1	2	0	0	420.3
6	4	1	2	1	0	397.0
7	5	2	3	2	0	392.4
8	6	2	3	2	1	396.5
9	7	2	3	2	1	400.5
10	8	2	3	2	1	402.4

Tabla 6- Combinatoria de las diferentes modificaciones.

Llevando a cabo la combinatoria, finalmente el resultado es de 10 modelos del conjunto bastidor-maqueta. Cada uno de ellos puede tener pequeñas peculiaridades respecto de los otros más allá de los cambios en las dimensiones y las formas de los módulos; principalmente en el caso de los ejes. El objetivo de estas combinaciones es conseguir cierta trazabilidad en el proceso. El orden escogido para combinar responde a las tres tendencias que se han comentado: ahorro de peso, rigidización de las uniones y aporte de inercia.

En este proceso de diseño se pueden diferenciar tres tendencias según los objetivos que se han tenido en cuenta en cada modificación. Durante la primera tendencia, desde la modificación 1 a la 3, se ha intentado aligerar el modelo con el objetivo de ahorrar peso y eliminar zonas que no aportaban ningún valor estructural. De este modo conseguimos un modelo más limpio y extraemos con más facilidad la información sobre donde incidir en las posteriores etapas. La segunda tendencia, desde la modificación 4 hasta la 7, ha ido enfocada a tratar de rigidizar las uniones de ambos lados; se ha llegado a la conclusión de que en los modelos originales esta era una de las fuentes que mayor deformación introducían a la estructura, de ahí que se le de esta relevancia. La última tendencia es ver cómo evoluciona el modelo a medida que introducimos más inercia en el eje longitudinal. Progresivamente se ha ido introduciendo durante las modificaciones 8, 9 y 10 para poder monitorizar la mejora en las deformaciones en la etapa de cálculo.

A continuación, se expondrá esta etapa de cálculo y veremos con más claridad la medida en la que estas modificaciones han mejorado nuestro modelo.

### 8.3 ETAPA DE CÁLCULO

En este capítulo se mostrará el comportamiento de los 10 modelos de bastidor que se han propuesto durante la etapa de diseño. Se analizarán cada uno de ellos exponiendo sus deformaciones y sus tensiones, y viendo los niveles de desviación máximo y mínimo de la placa base.

Se expondrá una imagen de la deformación del conjunto (ejemplos de cálculo en la ilustración siguiente Ilustración 71), otra en la que se aprecia exclusivamente la desviación de la placa, y otra del bastidor superior en la que se aprecian las concentraciones de tensión. Se hace esta distinción debido a que la mayor parte del trabajo de diseño se ha centrado en ese módulo. Se cree conveniente analizar su comportamiento con algo más de detenimiento.

Finalmente, se comentarán los resultados y se determinará el nivel de mejora en cuanto a deformación máxima y deformación relativa.

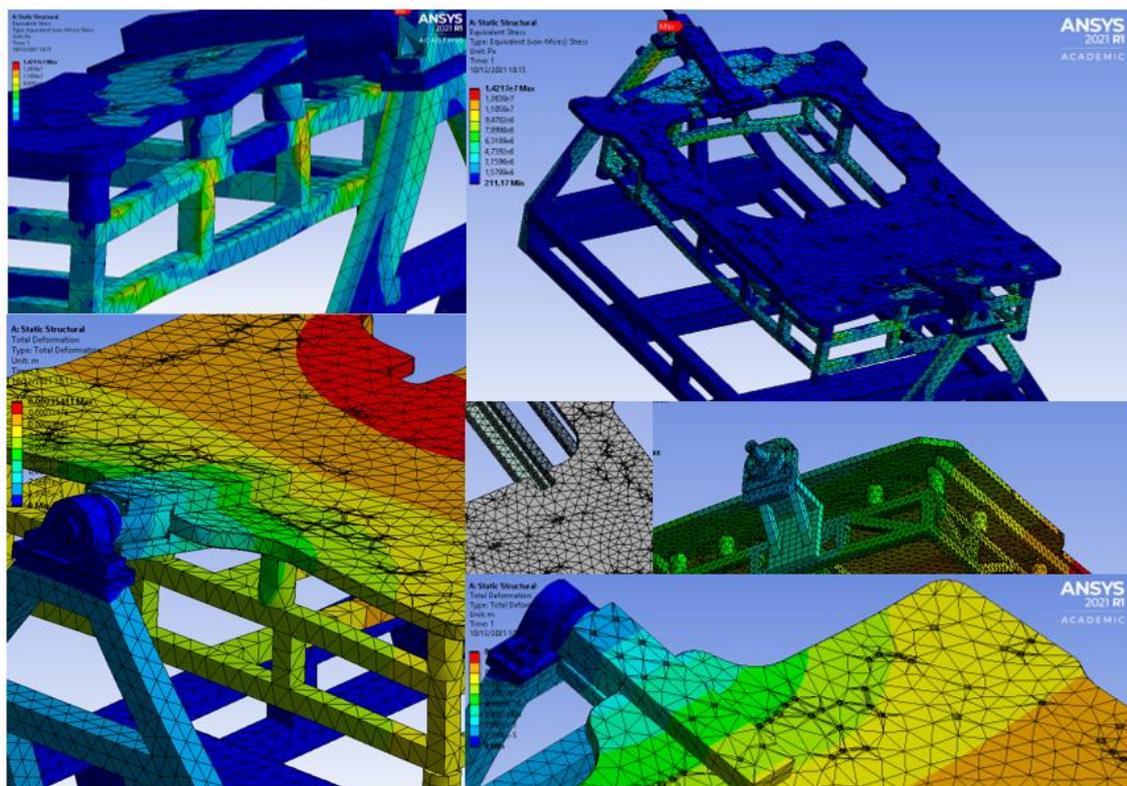


Ilustración 71- Ejemplos de imágenes de cálculos MEF realizados.

## Modelo 1

A continuación, se exponen los resultados del primer modelo.

En la placa base se observa un mapa de colores muy variado, lo que anticipa que la deformación que se nombrado como relativa será demasiado elevada. El máximo de desviación se encuentra en la zona de la ventana, un patrón que se repetirá en todos los cálculos.

La evolución de la desviación es particularmente curiosa en la parte de la ventana. Se asemeja a la que se vio en los dos primeros modelos, aumentando en dirección radial. Esto se debe al comportamiento de la unión, más bien como apoyo puntual. La falta de un refuerzo robusto por la existencia de la ventana penaliza el diseño. Estructuralmente, también falta rigidez en dirección transversal.

La deformación máxima es de 0.491, la mínima de 0.216, por lo que la relativa se sitúa en 0.276. En las siguientes dos ilustraciones se representa una vista del conjunto en isométrico (Ilustración 72) y una vista de la placa base en planta (Ilustración 73).

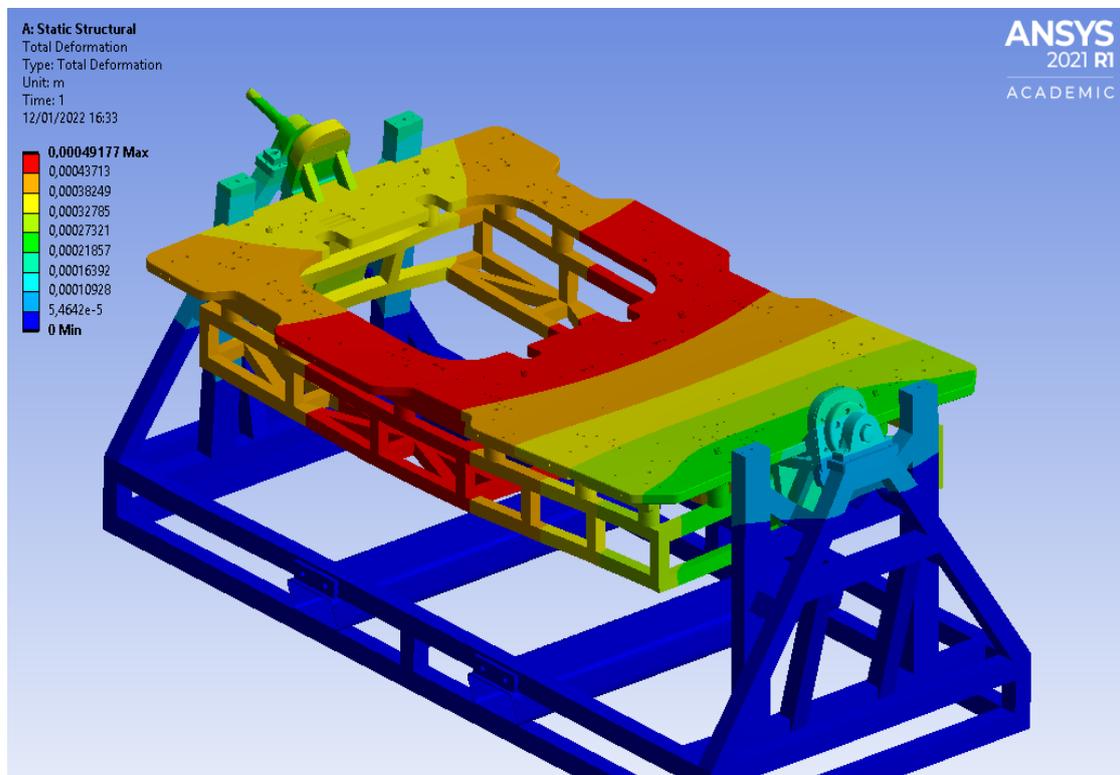
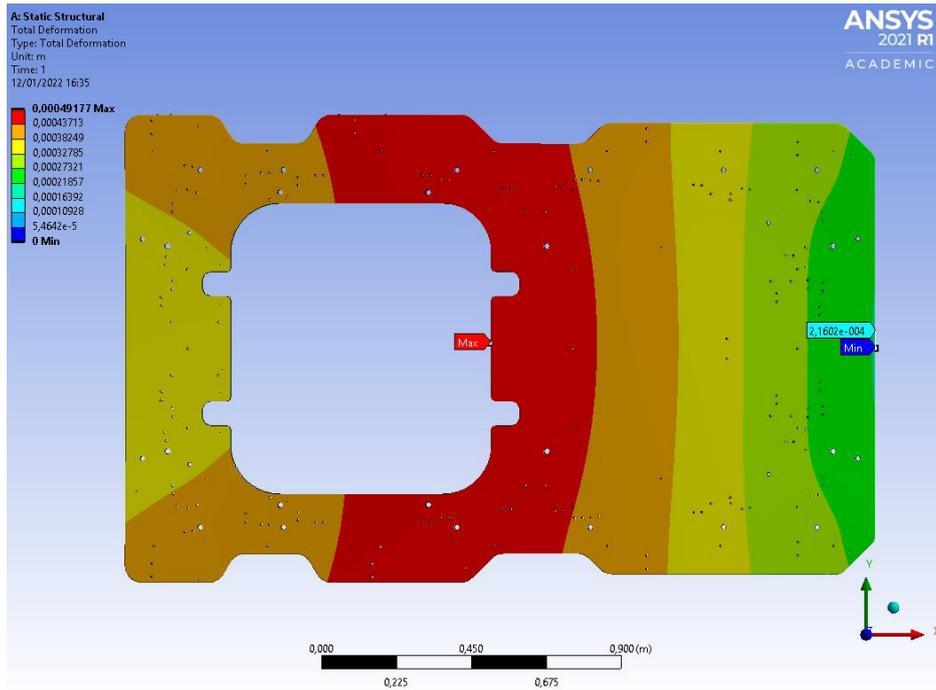
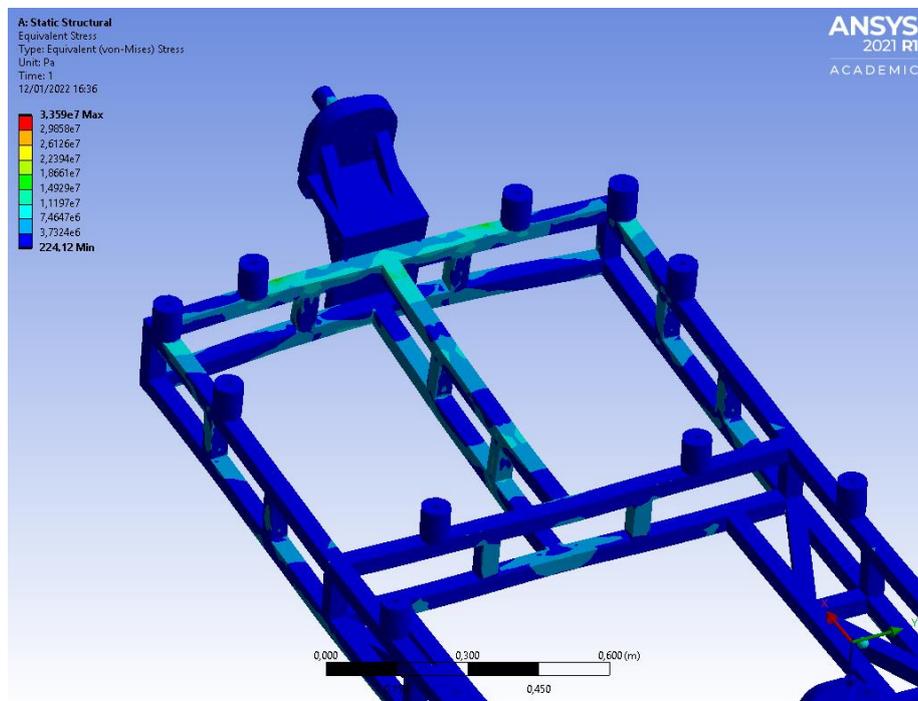


Ilustración 72- Cálculo de elementos finitos modificación 1 (1).



**Ilustración 73- Cálculo de elementos finitos modificación 1 (2).**

En cuanto al bastidor superior, se aprecia que las barras colocadas a lo largo de la ventana a modo de refuerzo no ejercen ningún trabajo estructural. Las tensiones más elevadas se concentran principalmente en el entorno de los ejes. La tensión máxima es de 33.6 MPa, situada en el interior del taco que se indica. Se presenta a continuación el reparto de tensiones del bastidor superior a un lado (Ilustración 74) y a otro (Ilustración 75).



**Ilustración 74- Cálculo de elementos finitos modificación 1 (3).**

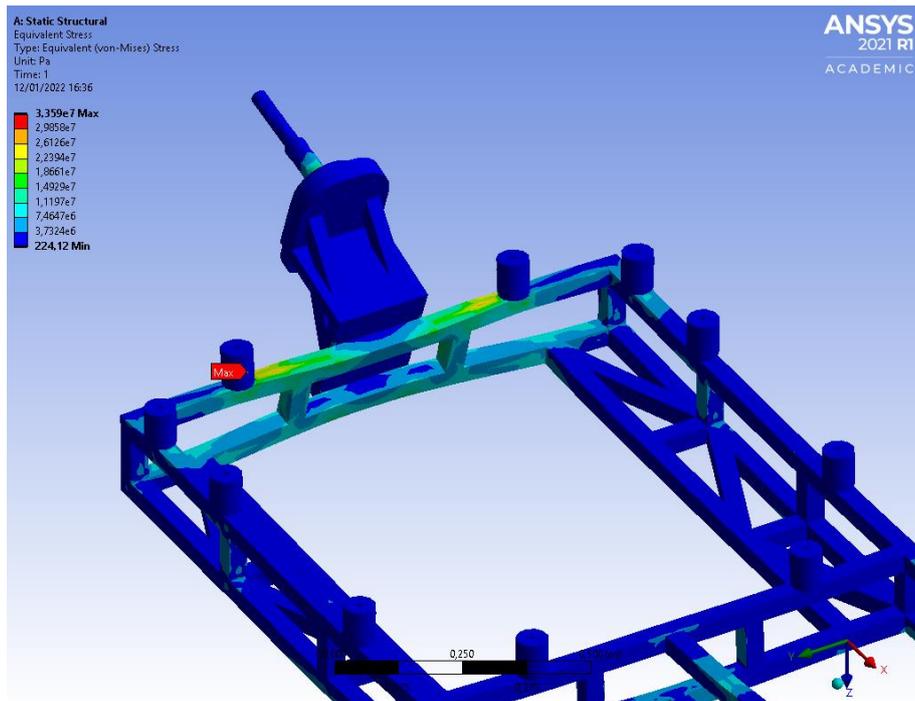


Ilustración 75- Cálculo de elementos finitos modificación 1 (4).

## Modelo 2

A continuación, se exponen los resultados del segundo modelo.

El mapeado de la placa base sigue siendo especialmente colorido. Se mantiene la evolución radial de las deformaciones en la zona de la ventana. Vemos que el bastidor inferior incluye ya su primera modificación, respondiendo de manera satisfactoria. No encontramos fuertes deformaciones y apreciamos claramente que los refuerzos incluidos se oponen totalmente a la trayectoria de la desviación

La deformación máxima es de 0.461, la mínima de 0.203, por lo que la relativa se sitúa en 0.258. En las siguientes dos ilustraciones se representa una vista del conjunto en isométrico (Ilustración 76) y una vista de la placa base en planta (Ilustración 77Ilustración 73).

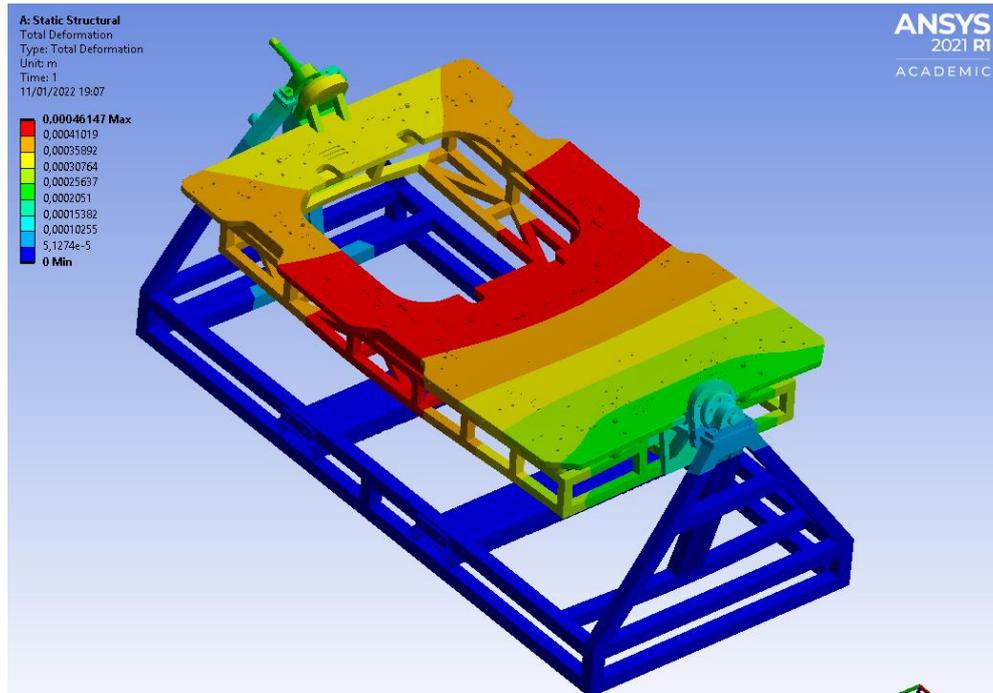


Ilustración 76- Cálculo de elementos finitos modificación 2 (1).

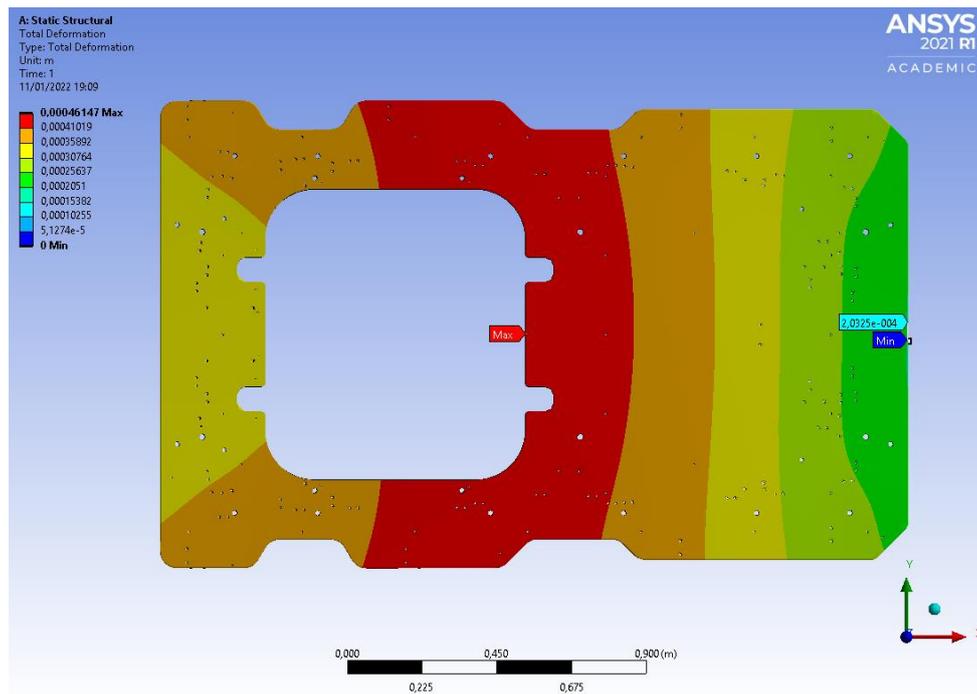
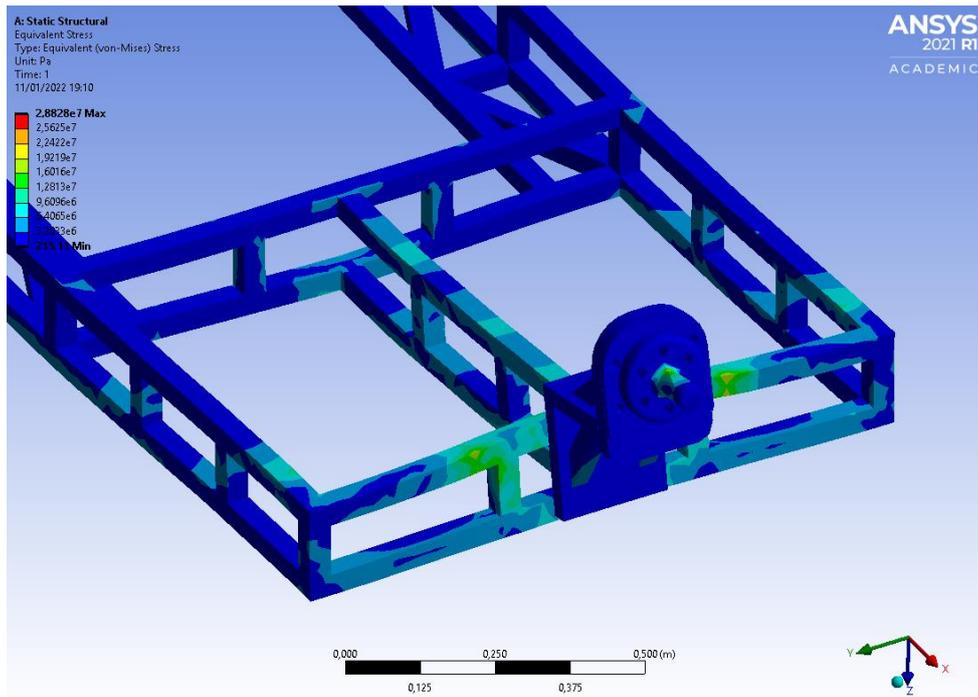
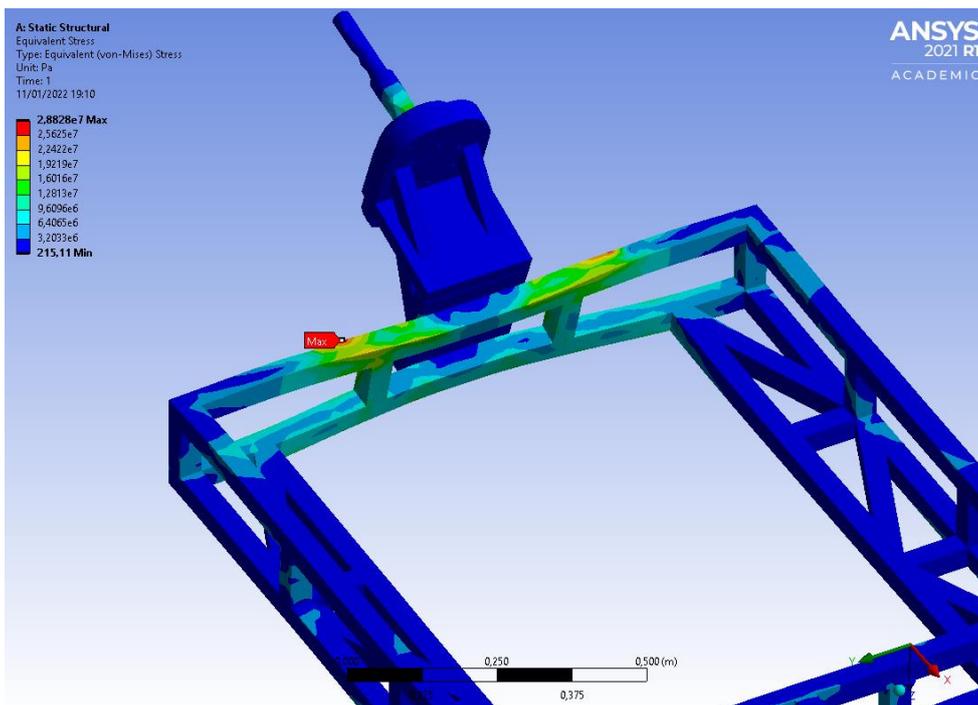


Ilustración 77- Cálculo de elementos finitos modificación 2 (2).

En cuanto al cálculo de tensiones (Ilustración 78 e Ilustración 79), se aprecian unos resultados similares a los anteriores. El bastidor superior es el mismo que en el primer modelo.



**Ilustración 78- Cálculo de elementos finitos modificación 2 (3).**



**Ilustración 79- Cálculo de elementos finitos modificación 2 (4).**

En cuanto al bastidor inferior (Ilustración 80), única parte con cambios significativos, vemos que los refuerzos incluidos trabajan eficientemente. Contribuyen a descargar los pilares absorbiendo buena parte de su carga.

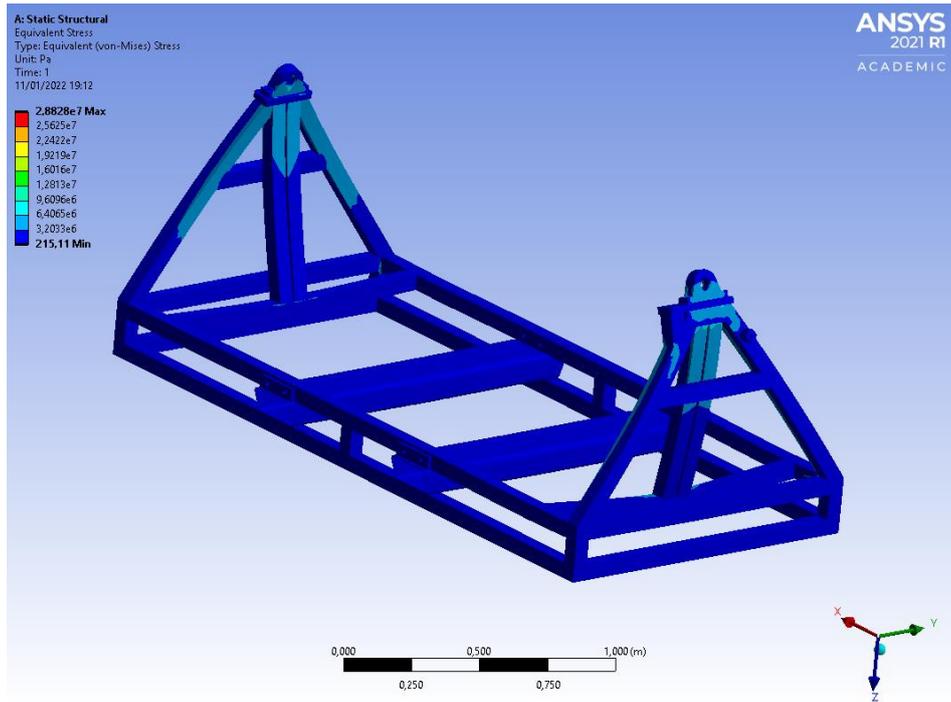


Ilustración 80- Cálculo de elementos finitos modificación 2 (5).

### Modelo 3

Los resultados siguen siendo insatisfactorios por el enfoque de la etapa de diseño. Aunque se sigue trabajando en la misma línea, buscando eliminar aquellas zonas que no trabajan e introduciendo refuerzos para diluir las concentraciones de tensión, en la etapa de diseño, con este modelo entramos en una nueva tendencia. Ya no se busca tanto reducir peso sino rigidizar las uniones. Se aprecia que en este modelo ya han desaparecido todos los cerchados y los refuerzos del bastidor inferior.

Observando el lado de la ventana, se ve que se ha atenuado la evolución con carácter circular. Esto se debe principalmente a haber introducido rigidez en el entorno de los ejes; los perfiles de refuerzo del bastidor superior evitan satisfactoriamente la flexibilidad existente. De esta manera la unión resulta más rígida y como resultado encontramos menos deformación en dirección transversal.

La deformación máxima es de 0.417, la mínima de 0.183, por lo que la relativa se sitúa en 0.234. En las siguientes dos ilustraciones se representa una vista del conjunto en isométrico (Ilustración 81) y una vista de la placa base en planta (Ilustración 82 Ilustración 73).

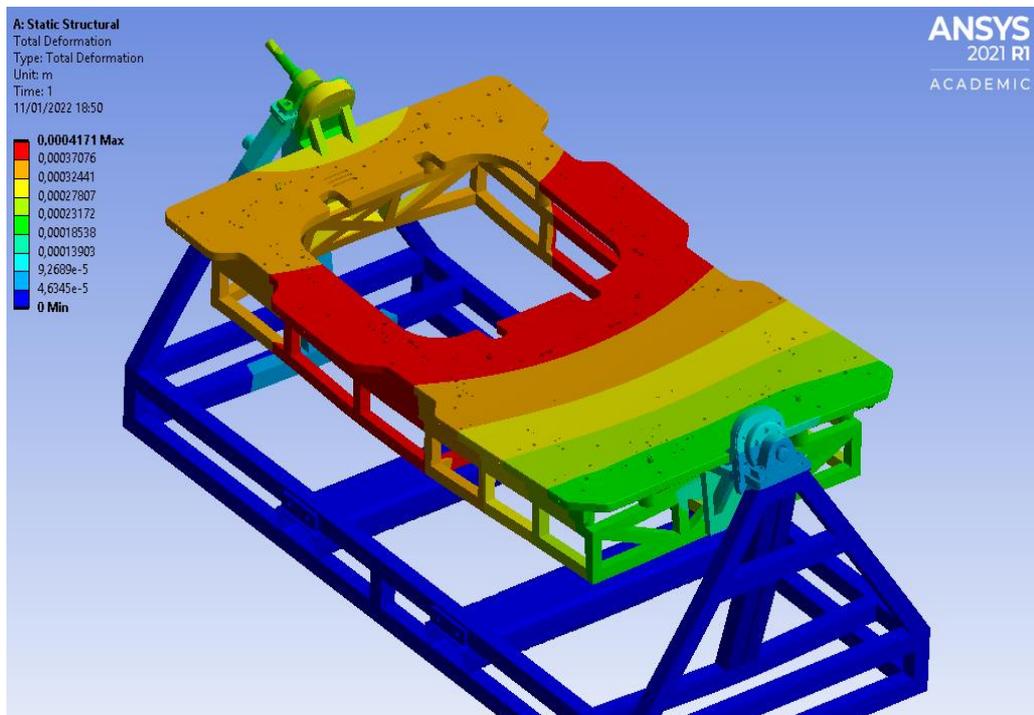
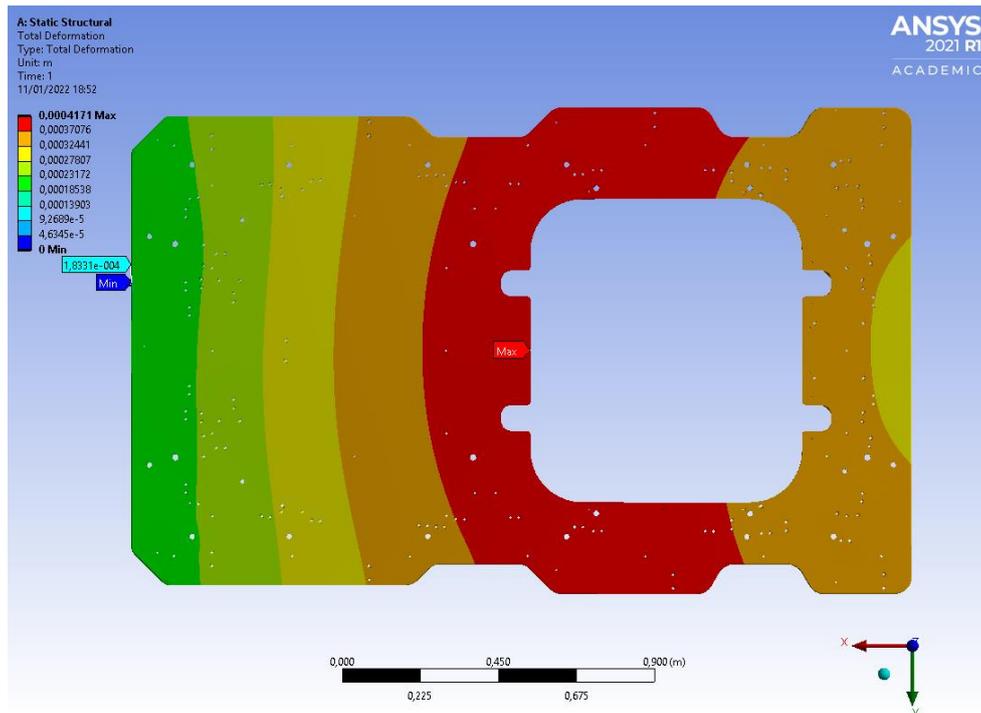


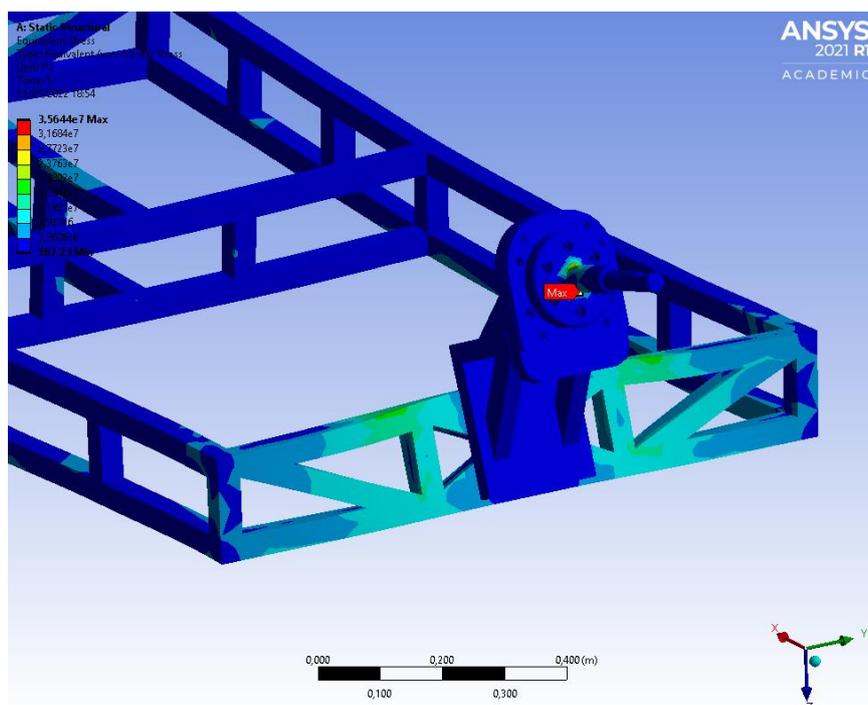
Ilustración 81- Cálculo de elementos finitos modificación 3 (1).



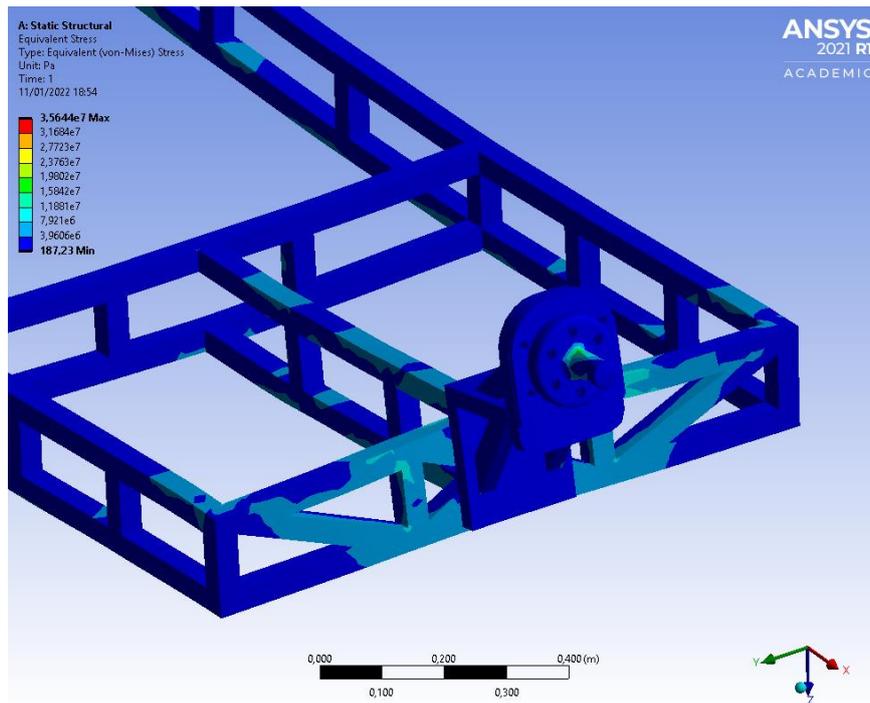
**Ilustración 82- Cálculo de elementos finitos modificación 3 (2).**

En cuanto a las tensiones, se aprecia la influencia del cerchado que se ha incluido. Los perfiles diagonales de las cuadrículas laterales están sometidos a niveles bastante notorios de tensión, algo muy positivo puesto que indica que hemos acertado con la modificación. Este trabajo estructural es más evidente en el lado de la ventana que en el opuesto, donde el gradiente de tensiones es significativamente más suave.

La tensión máxima se sitúa en 35.6 MPa en la zona cilíndrica del eje. Se visualiza a continuación el cálculo de tensiones del bastidor superior (Ilustración 83 e Ilustración 84).



**Ilustración 83- Cálculo de elementos finitos modificación 3 (3).**



**Ilustración 84- Cálculo de elementos finitos modificación 3 (4).**

#### Modelo 4

A continuación, se exponen los resultados del cuarto modelo.

Con la modificación del eje y los refuerzos que se había introducido dentro del bastidor inferior, se considera ya prácticamente solucionado el problema de la rigidez transversal.

La deformación máxima es de 0.399, la mínima de 0.180, por lo que la relativa se sitúa en 0.219. En las siguientes dos ilustraciones se representa una vista del conjunto en isométrico (Ilustración 85) y una vista de la placa base en planta (Ilustración 86Ilustración 73).

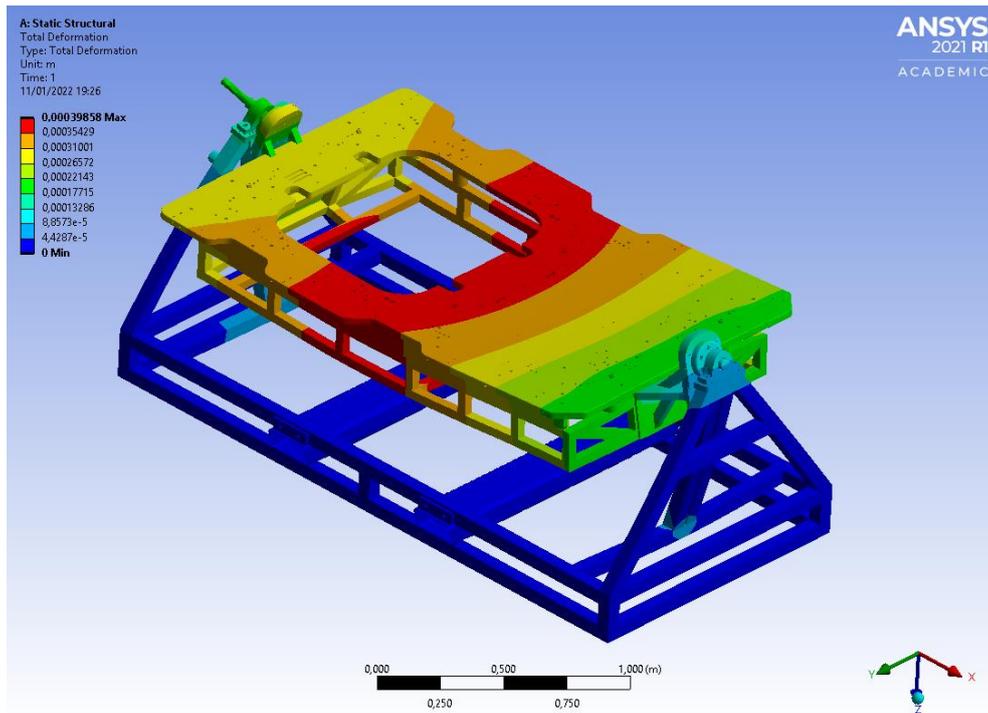


Ilustración 85- Cálculo de elementos finitos modificación 4 (1).

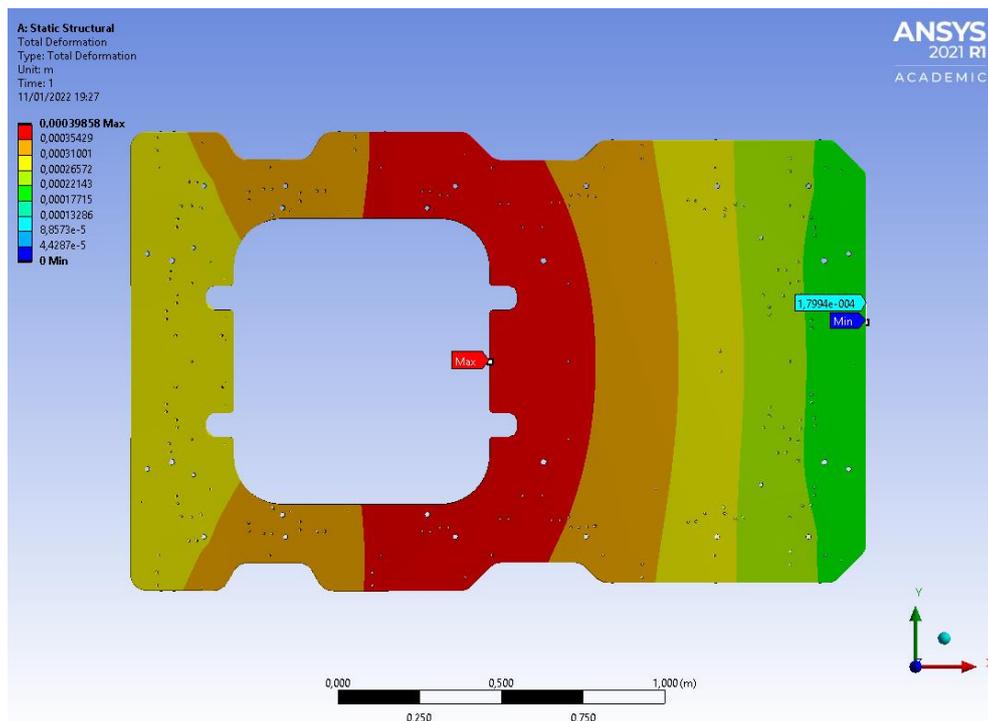


Ilustración 86- Cálculo de elementos finitos modificación 4 (2).

Si se atiende al cálculo de tensiones en el bastidor superior, vemos que el refuerzo incluido en el lado de la ventana se encuentra coloreado. Sigue siendo positivo que así sea. En cuanto al resto del bastidor, encontramos zonas más y menos descargadas, pero sin demasiadas novedades respecto al caso anterior.

La tensión máxima se sitúa en 27.3 MPa y la encontramos en el entorno del eje (Ilustración 87 e Ilustración 88).

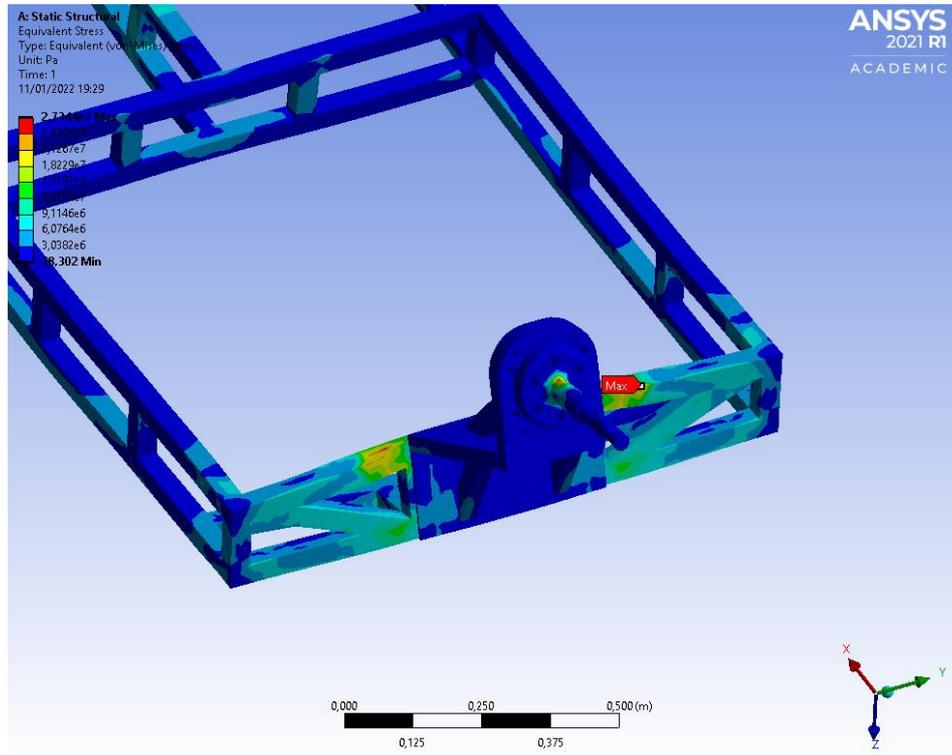


Ilustración 87- Cálculo de elementos finitos modificación 4 (3).

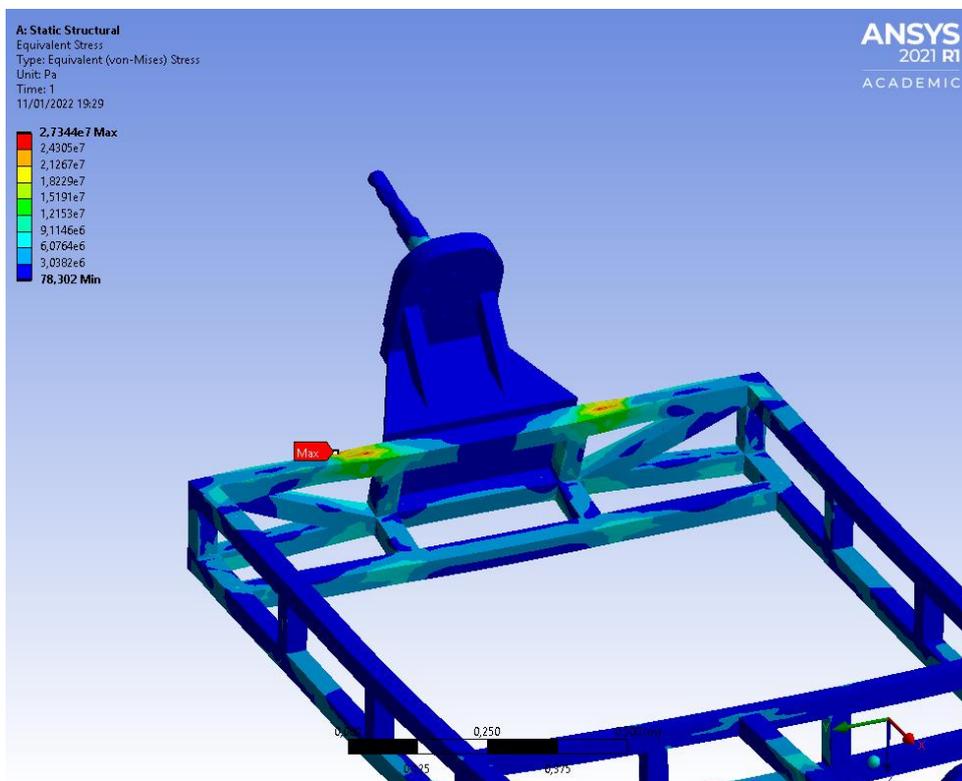


Ilustración 88- Cálculo de elementos finitos modificación 4 (4).

## Modelo 5

A continuación, se exponen los resultados del quinto modelo.

En este modelo se ha incluido el perfil superior en el refuerzo de la ventana. Las uniones siguen rigidizándose y las deformaciones disminuyendo.

La deformación máxima es de 0.387, la mínima de 0.184, por lo que la relativa se sitúa en 0.203. En las siguientes dos ilustraciones se representa una vista del conjunto en isométrico (Ilustración 89) y una vista de la placa base en planta (Ilustración 90).

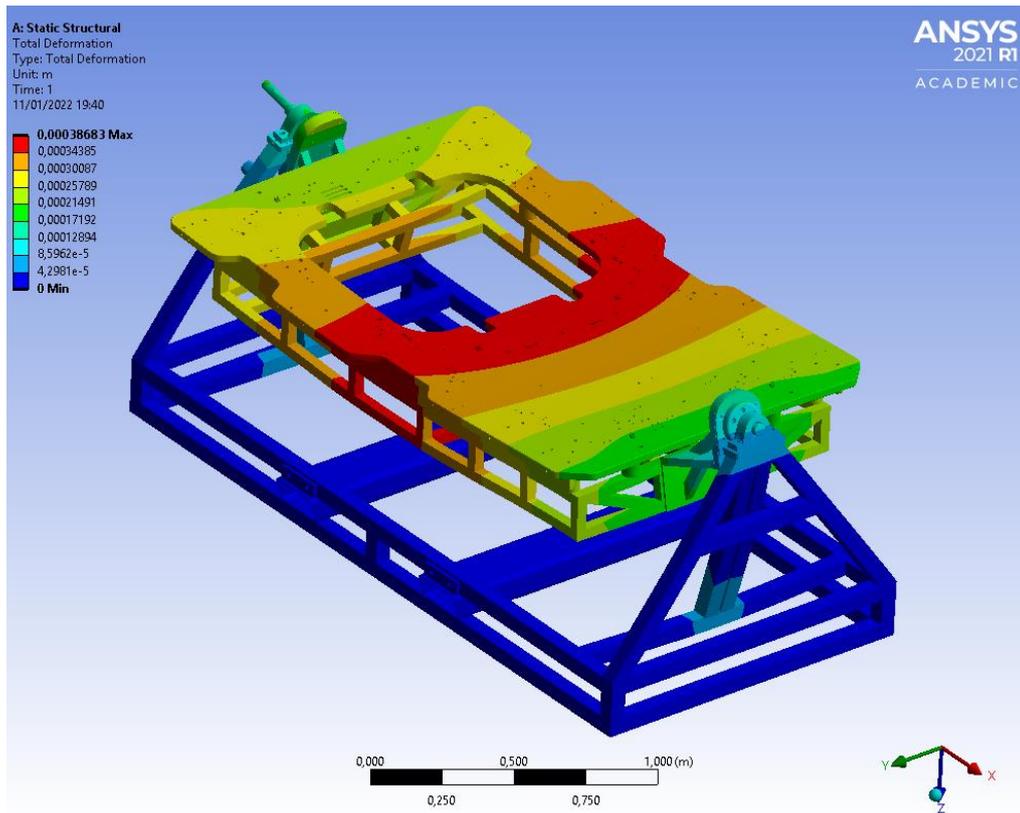


Ilustración 89- Cálculo de elementos finitos modificación 5 (1).

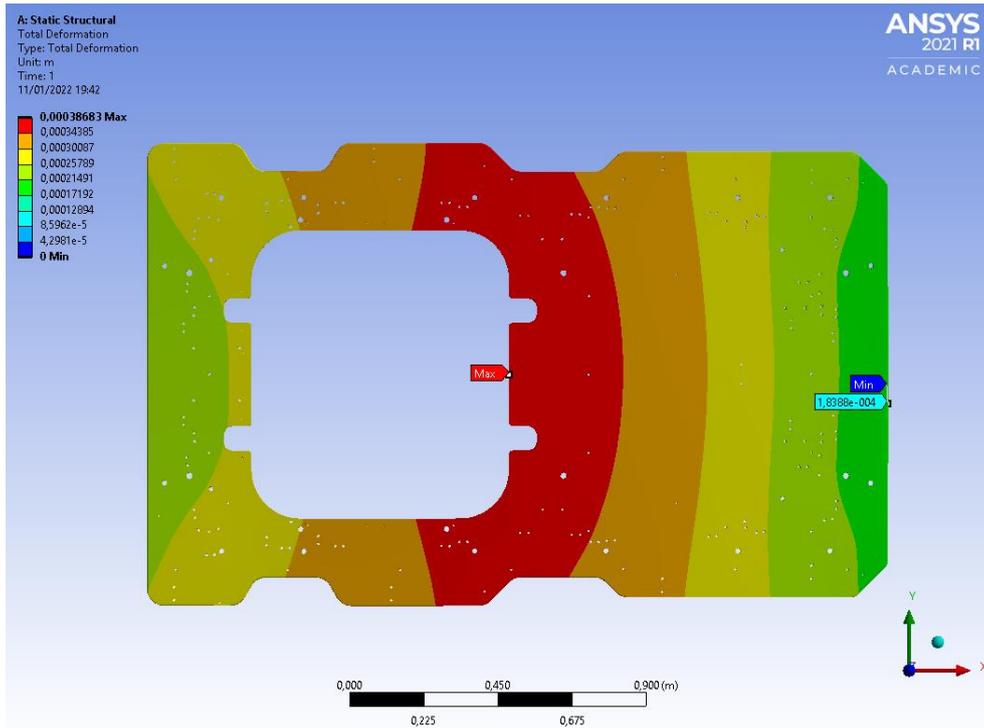


Ilustración 90- Cálculo de elementos finitos modificación 5 (2).

En cuanto al cálculo de tensiones, se encuentra una distribución muy similar a lo que se vio en el cuarto modelo. Las tensiones máximas siguen dándose en el mismo lugar y alcanzan 23.6 MPa. El nuevo perfil introducido también contribuye a diluir la concentración de tensiones de su entorno y optimizar la unión (Ilustración 91 e Ilustración 92).

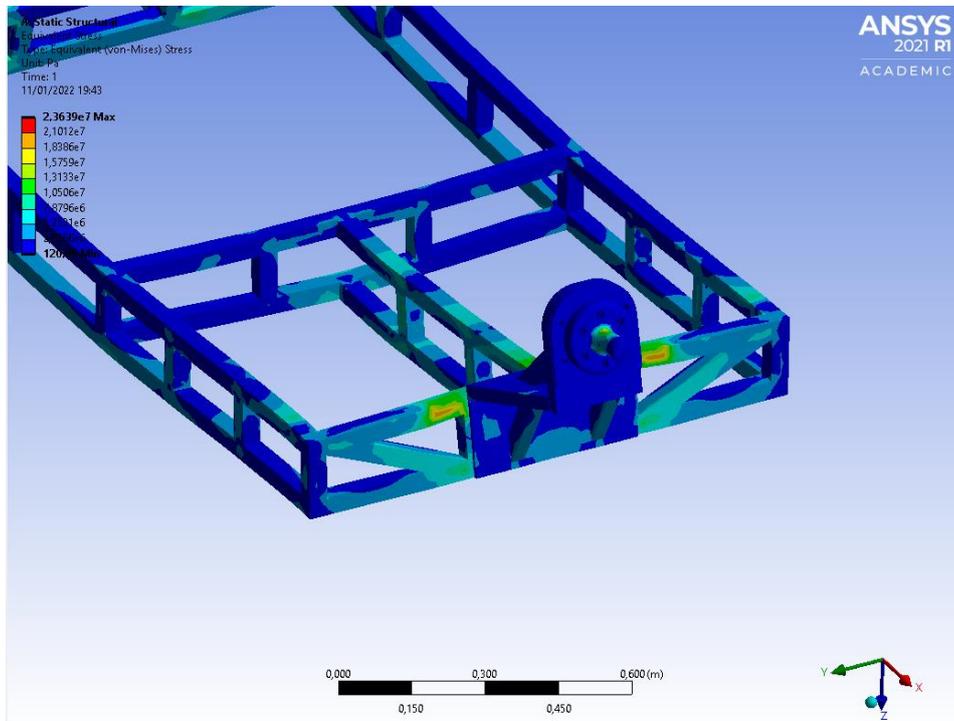


Ilustración 91- Cálculo de elementos finitos modificación 5 (3).

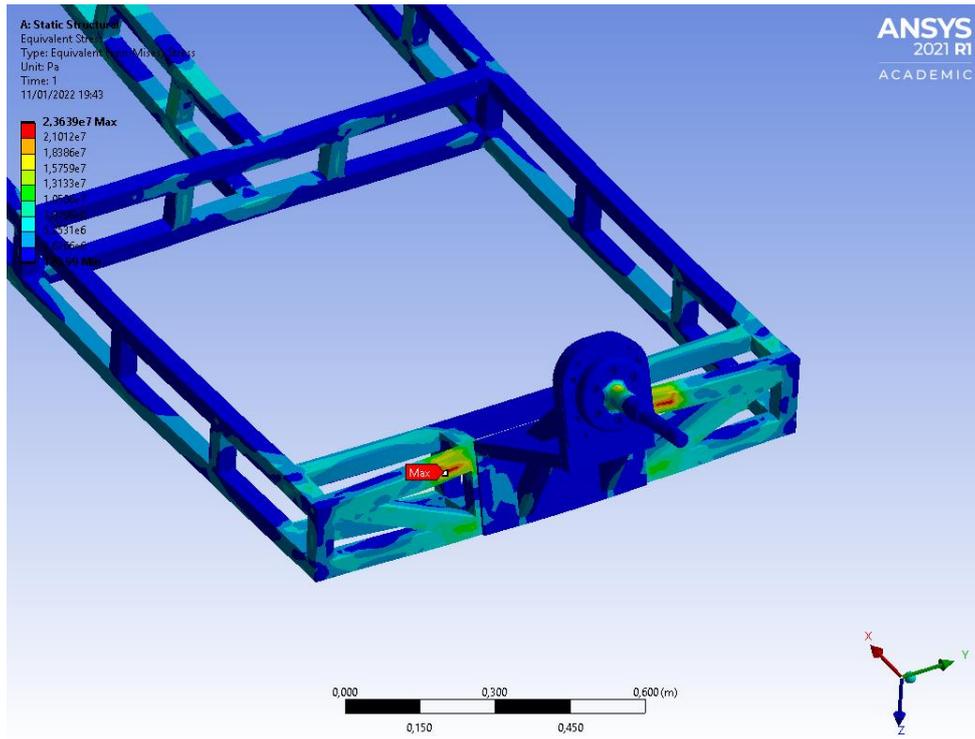


Ilustración 92- Cálculo de elementos finitos modificación 5 (4).

## Modelo 6

A continuación, se exponen los resultados del sexto modelo.

En este punto se ha aumentado el ancho del soporte INA. Veremos cómo afecta al comportamiento del modelo.

La deformación máxima es de 0.354, la mínima de 0.168, por lo que la relativa se sitúa en 0.186. En las siguientes dos ilustraciones se representa una vista del conjunto en isométrico (Ilustración 93) y una vista de la placa base en planta (Ilustración 94).

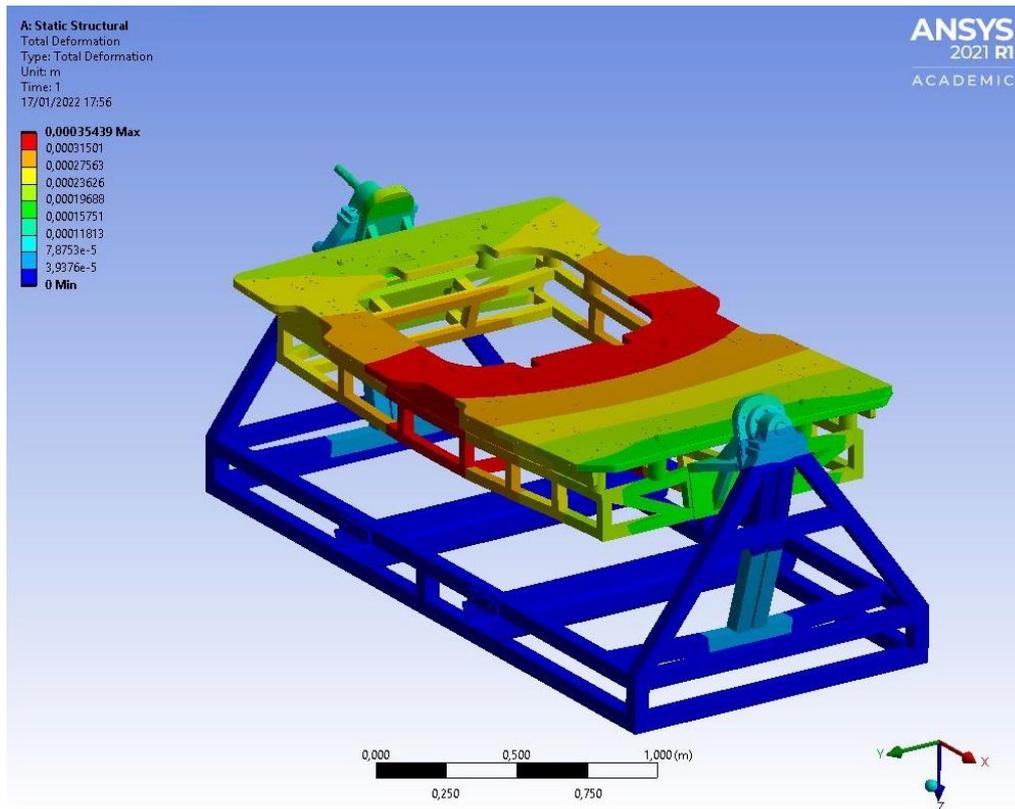


Ilustración 93- Cálculo de elementos finitos modificación 6 (1).

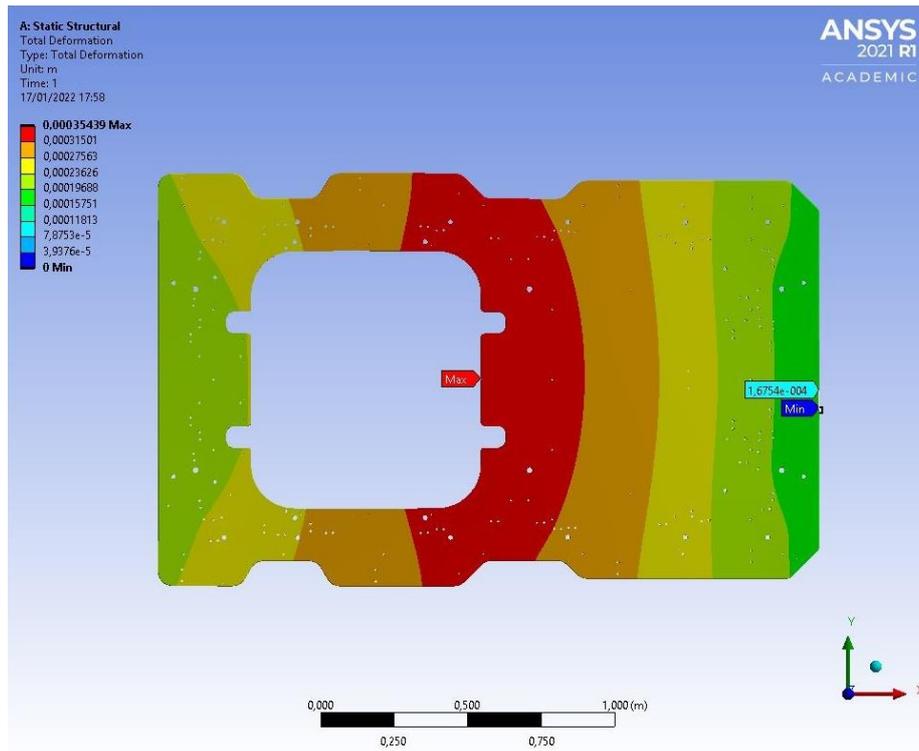


Ilustración 94- Cálculo de elementos finitos modificación 6 (2).

En cuanto al diagrama de tensiones (Ilustración 95 e Ilustración 96), el módulo del bastidor superior tiene un mapeado prácticamente igual que lo que veníamos viendo. Es apreciable, sin embargo, que las tensiones máximas han disminuido. La nueva modificación del soporte ayuda en gran medida a hacer más rígida la unión. Esto provoca que los ejes no comuniquen la torsión que comunicaban a los perfiles del bastidor superior.

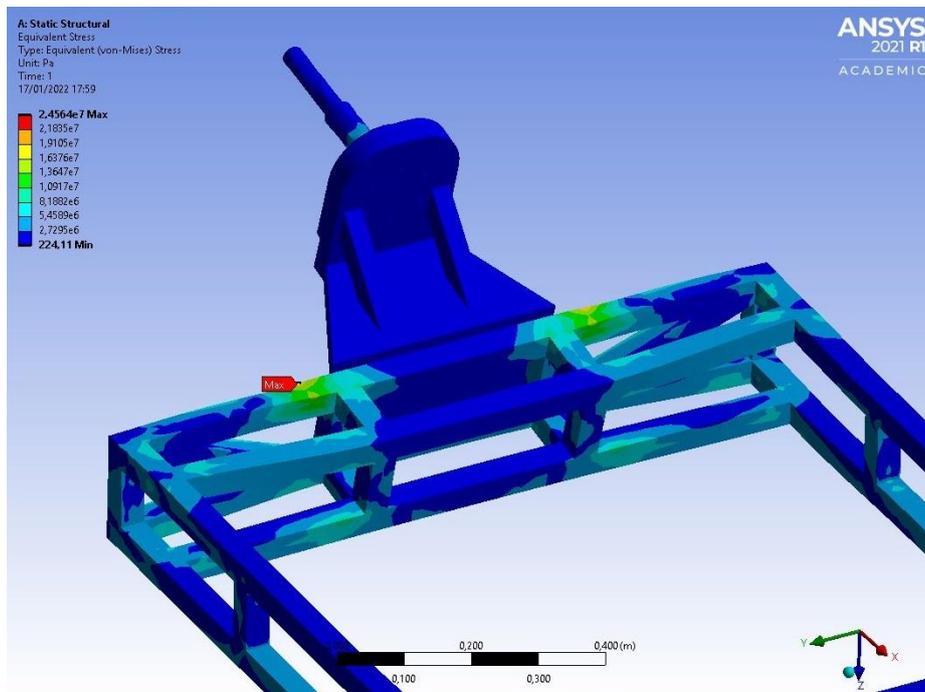


Ilustración 95- Cálculo de elementos finitos modificación 6 (3).

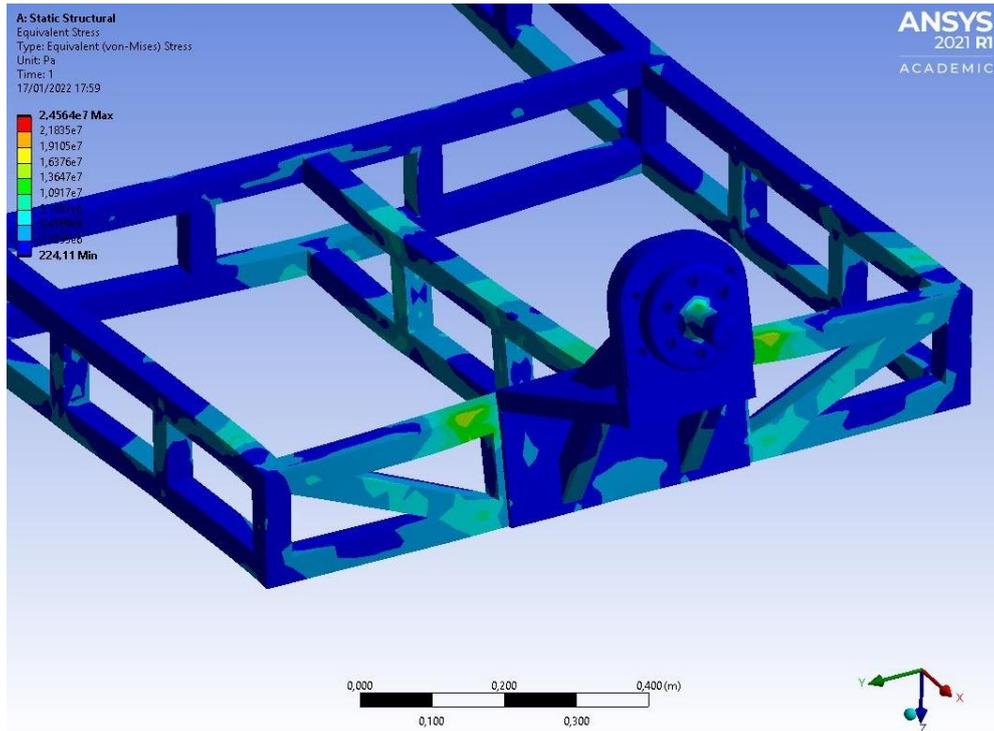


Ilustración 96- Cálculo de elementos finitos modificación 6 (4).

## Modelo 7

A continuación, se exponen los resultados del séptimo modelo.

Aquí se introduce la modificación que incluye el aumento de diámetro del eje. Previsiblemente se espera un resultado en la misma línea que el anterior, pero mejorado.

La deformación máxima es de 0.304, la mínima de 0.121, por lo que la relativa se sitúa en 0.183. En las siguientes dos ilustraciones se representa una vista del conjunto en isométrico (Ilustración 97) y una vista de la placa base en planta (Ilustración 98).

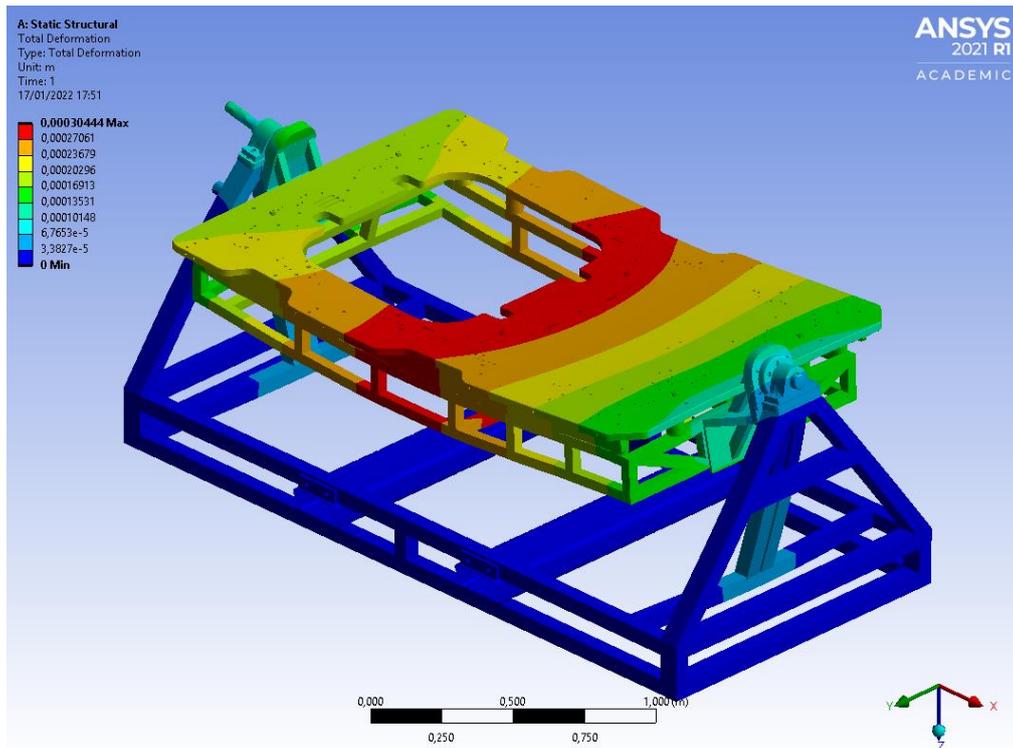
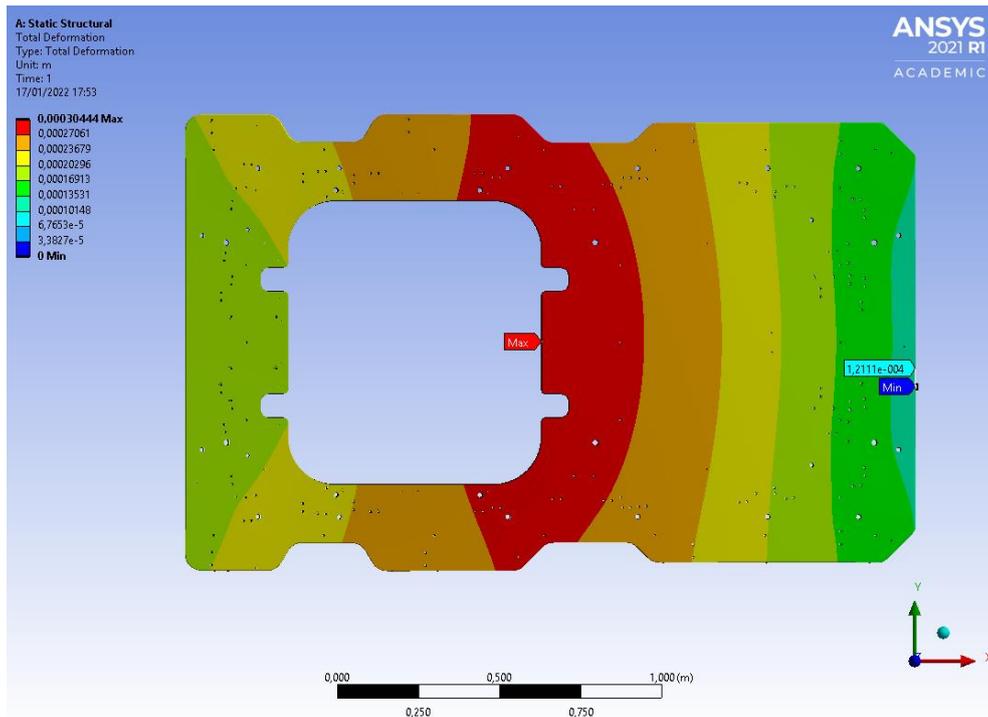


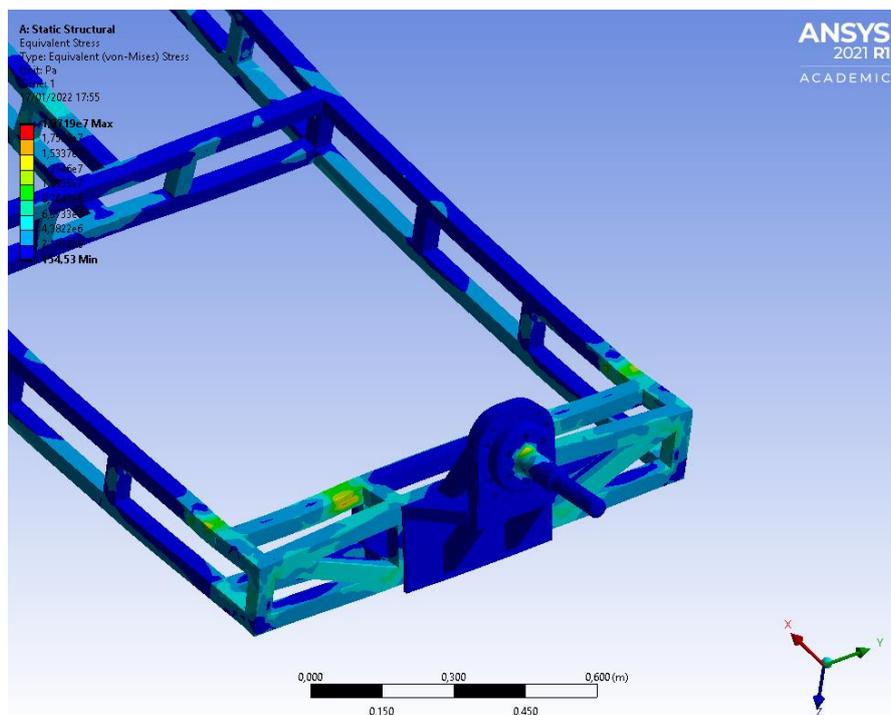
Ilustración 97- Cálculo de elementos finitos modificación 7 (1).



**Ilustración 98- Cálculo de elementos finitos modificación 7 (2).**

En cuanto a la parte de tensiones, no hay demasiadas novedades. La conclusión es la misma que en el caso anterior: más rigidez en la unión facilita el trabajo estructural del bastidor superior. La tensión máxima es de 19.7 MPa.

Hay que tener en cuenta también que, llegado este punto, se ha aumentado la longitud del conjunto. Hay algo más de luz a salvar. A continuación se presenta el cálculo de tensiones del bastidor superior (Ilustración 99, Ilustración 100 e Ilustración 101).



**Ilustración 99- Cálculo de elementos finitos modificación 7 (3).**

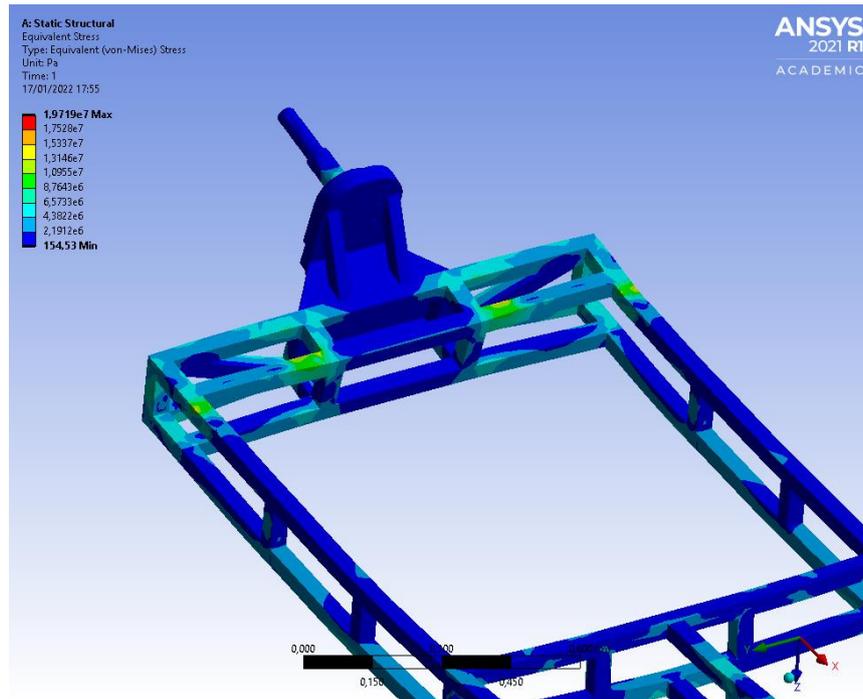


Ilustración 100- Cálculo de elementos finitos modificación 7 (4).

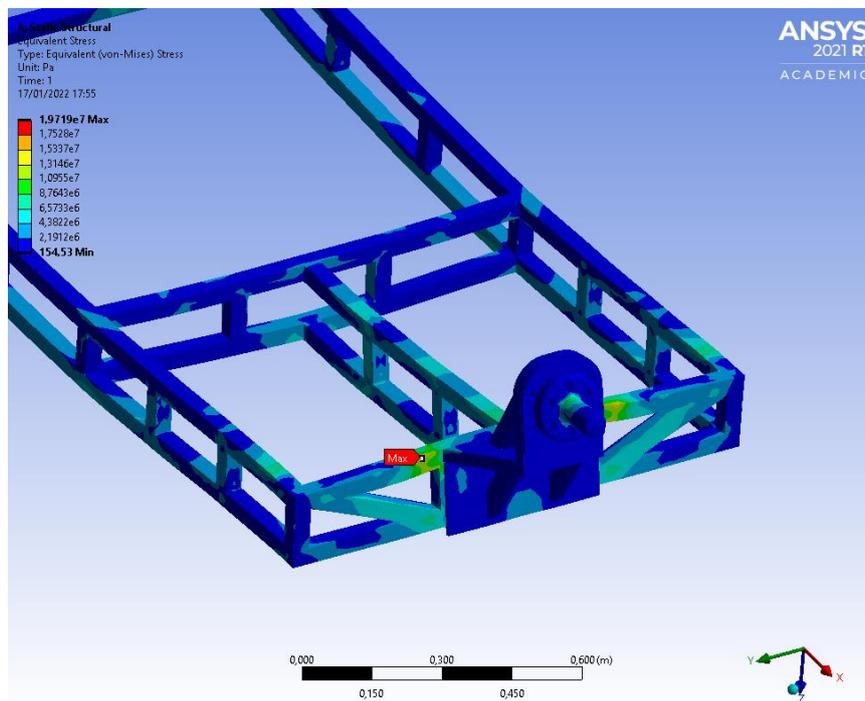


Ilustración 101- Cálculo de elementos finitos modificación 7 (5).

## Modelo 8

A continuación, se exponen los resultados del octavo modelo.

A partir de aquí se dan por rigidizadas las uniones y se entra en la etapa final del proceso. Como se ha comentado, veremos cómo evolucionan los niveles de desviación cuando aumentamos progresivamente la inercia del modelo. Los nervios también aumentan con esta intención.

En el bastidor superior, nuestros perfiles modificados del bastidor superior pasan a adquirir una altura de 60 milímetros. Este es el parámetro dimensional del que se ha hablado anteriormente.

La deformación máxima es de 0.288, la mínima de 0.115, por lo que la relativa se sitúa en 0.173. En las siguientes dos ilustraciones se representa una vista del conjunto en isométrico (Ilustración 102) y una vista de la placa base en planta (Ilustración 103).

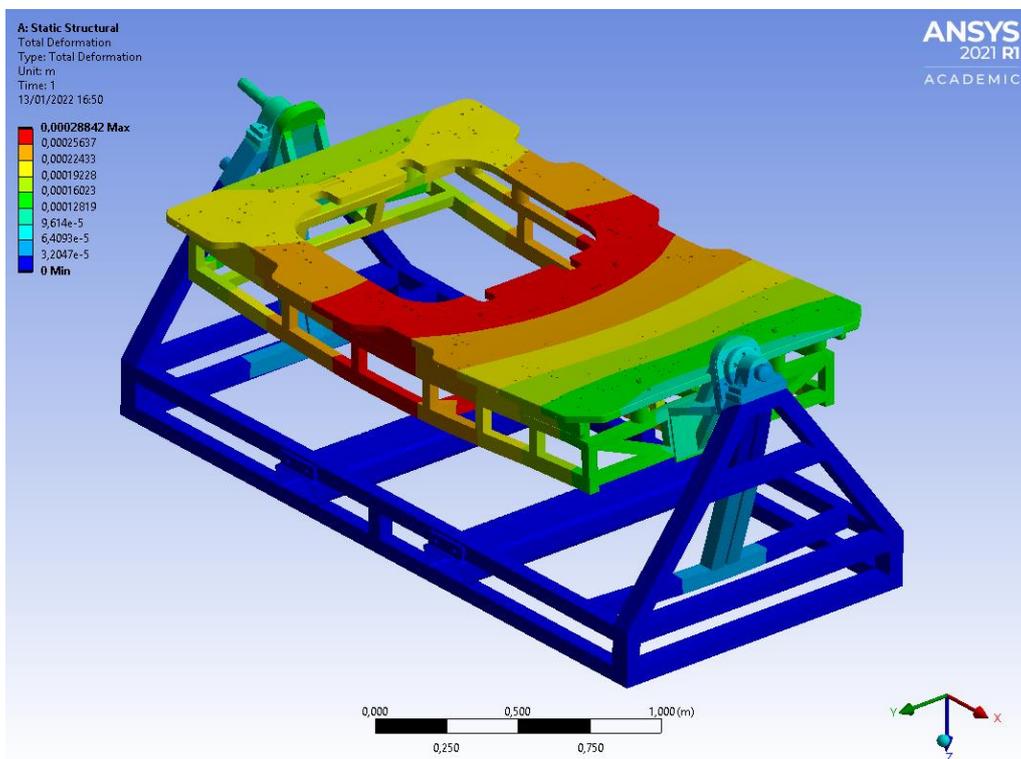
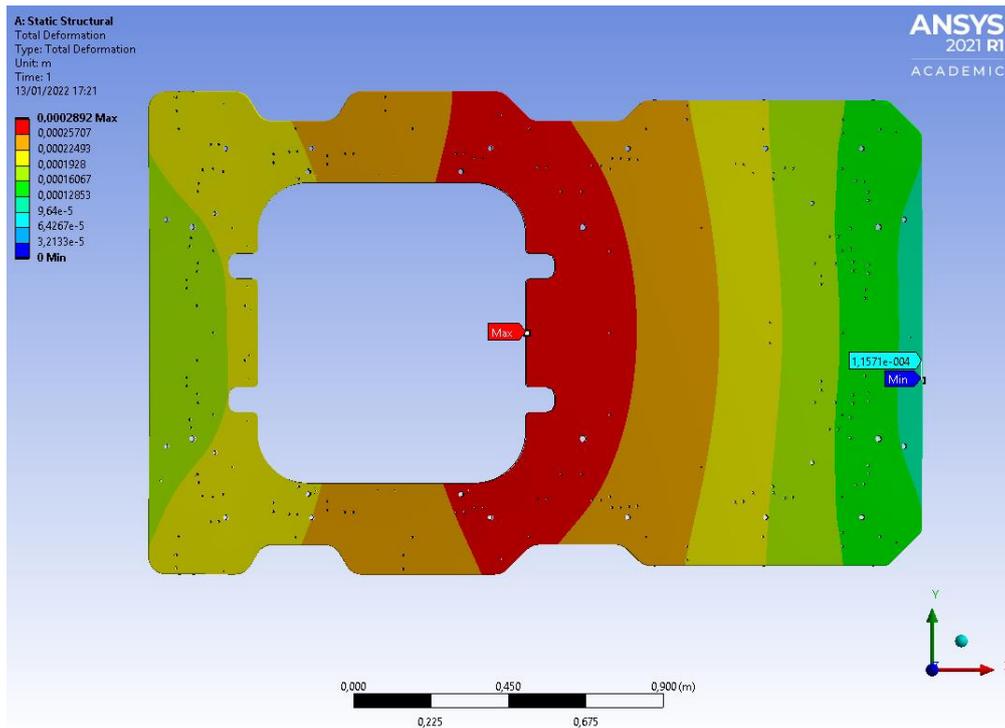
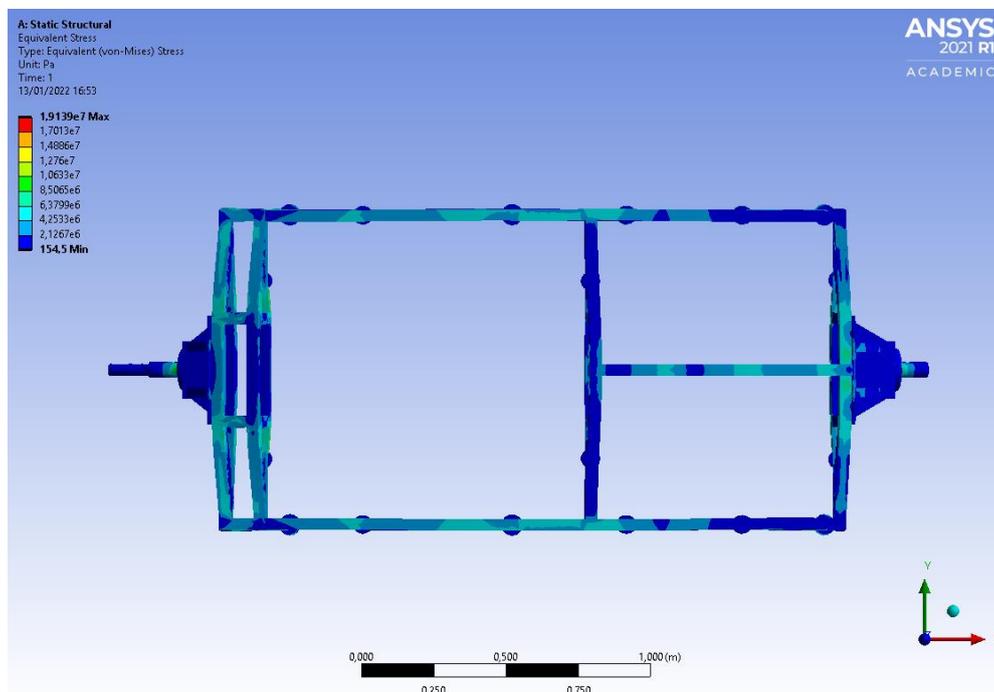


Ilustración 102- Cálculo de elementos finitos modificación 8 (1).



**Ilustración 103- Cálculo de elementos finitos modificación 8 (2).**

A partir de aquí ya no habrá cambios reseñables en la geometría del modelo, por lo que el cálculo de tensiones deja de ser tan interesante. A pesar de todo, se expone una vista en planta del bastidor superior (Ilustración 102) para ver el nivel de trabajo a medida que se aumenta esta inercia. La tensión máxima alcanza 19.1 MPa.



**Ilustración 104- Cálculo de elementos finitos modificación 8 (3).**

## Modelo 9

A continuación, se exponen los resultados del noveno modelo.

Se sigue trabajando en la misma línea, aumentando nuestro parámetro dimensional. Se alcanza una altura de 80 milímetros en la zona modificada.

La deformación máxima es de 0.274, la mínima de 0.112, por lo que la relativa se sitúa en 0.161. En las siguientes dos ilustraciones se representa una vista del conjunto en isométrico (Ilustración 105) y una vista de la placa base en planta (Ilustración 106).

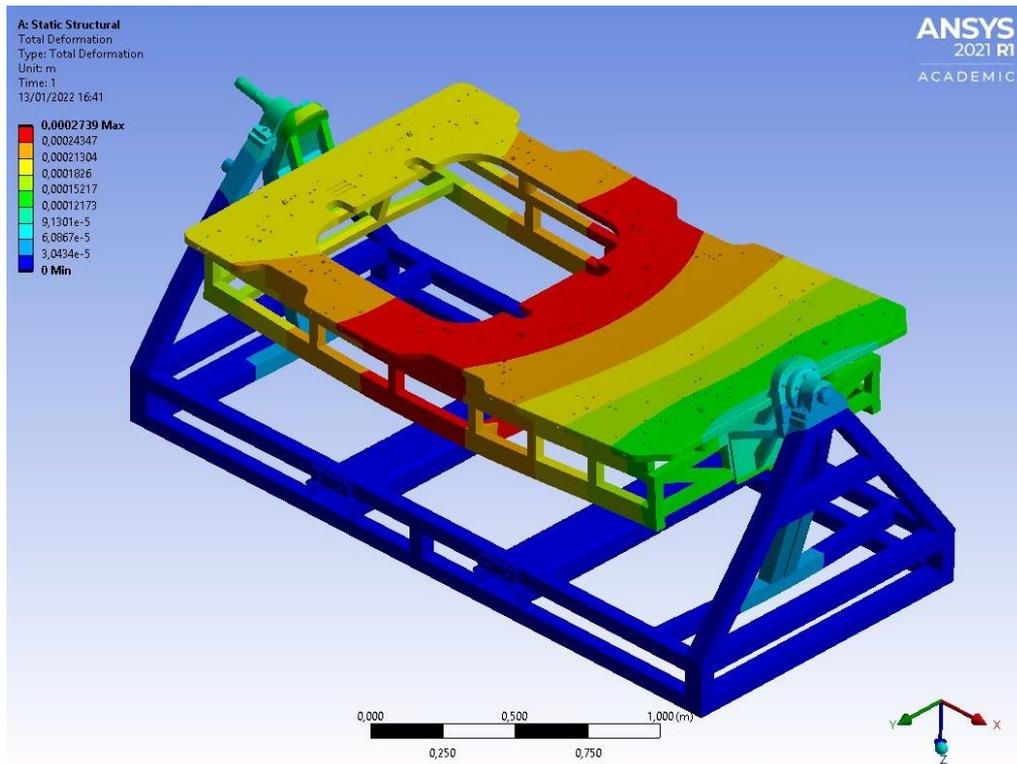
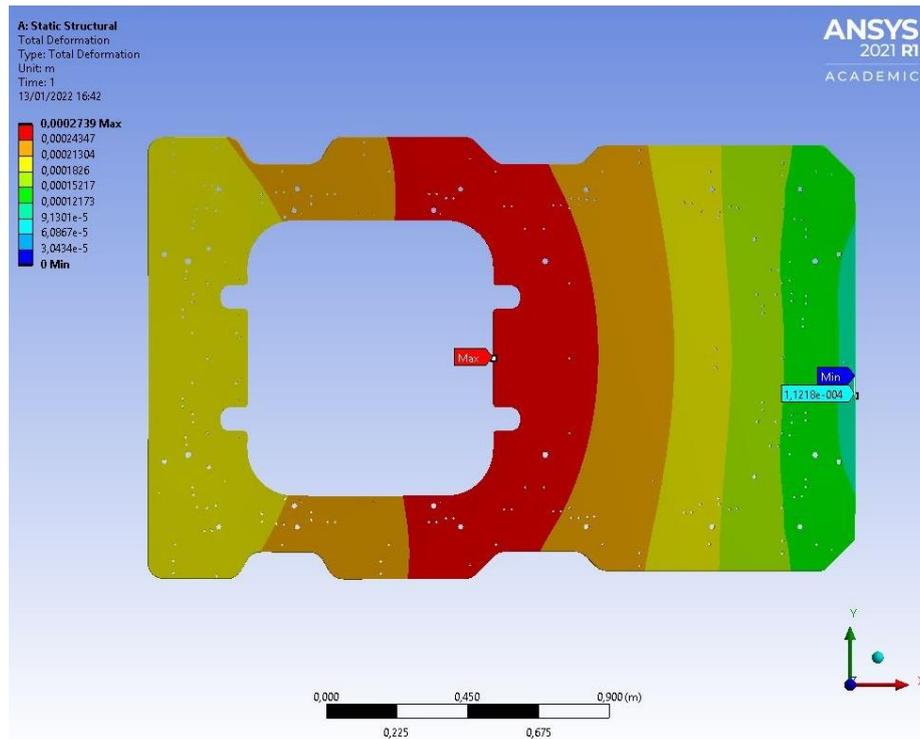
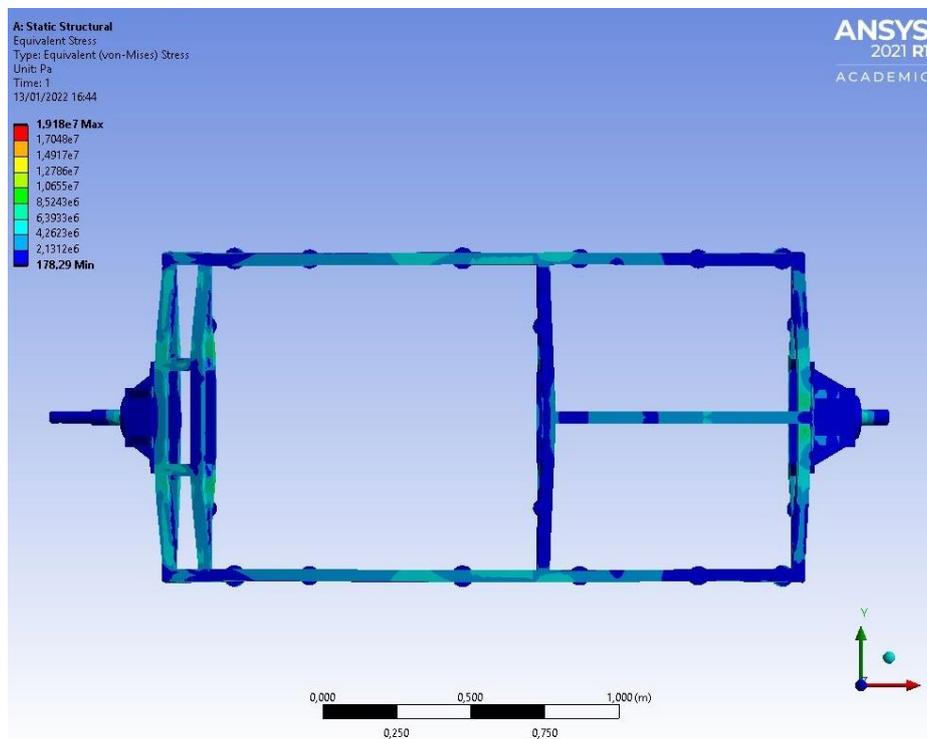


Ilustración 105- Cálculo de elementos finitos modificación 9 (1).



**Ilustración 106- Cálculo de elementos finitos modificación 9 (2).**

La tensión máxima se alcanza 19.2 MPa. El cálculo de tensiones (Ilustración 107) es prácticamente igual que en el octavo modelo.



**Ilustración 107- Cálculo de elementos finitos modificación 9 (3).**

## Modelo 10

A continuación, se exponen los resultados del décimo modelo.

Llegamos al final del proceso. Se aprecia que la tendencia es bajista según se aumenta el parámetro dimensional, lo que da respaldo a al enfoque y sentido al proyecto.

La altura del perfil modificado es de 100 milímetros.

La deformación máxima es de 0.243, la mínima de 0.105, por lo que la relativa se sitúa en 0.138. En las siguientes dos ilustraciones se representa una vista del conjunto en isométrico (Ilustración 108) y una vista de la placa base en planta (Ilustración 109).

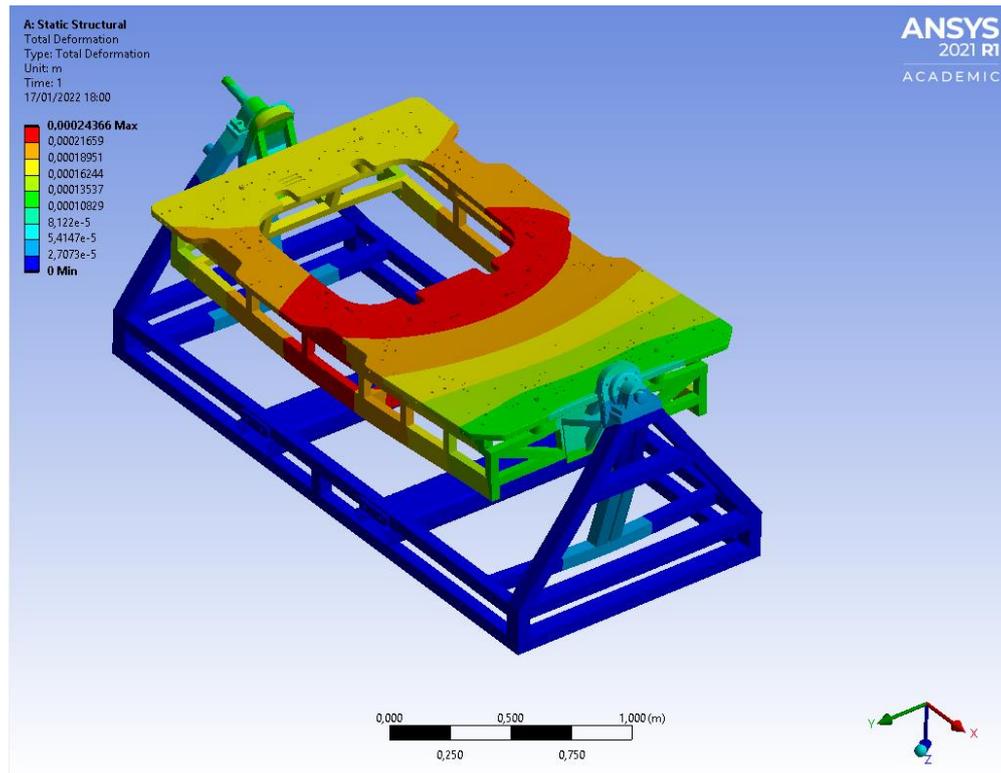


Ilustración 108- Cálculo de elementos finitos modificación 10 (1).

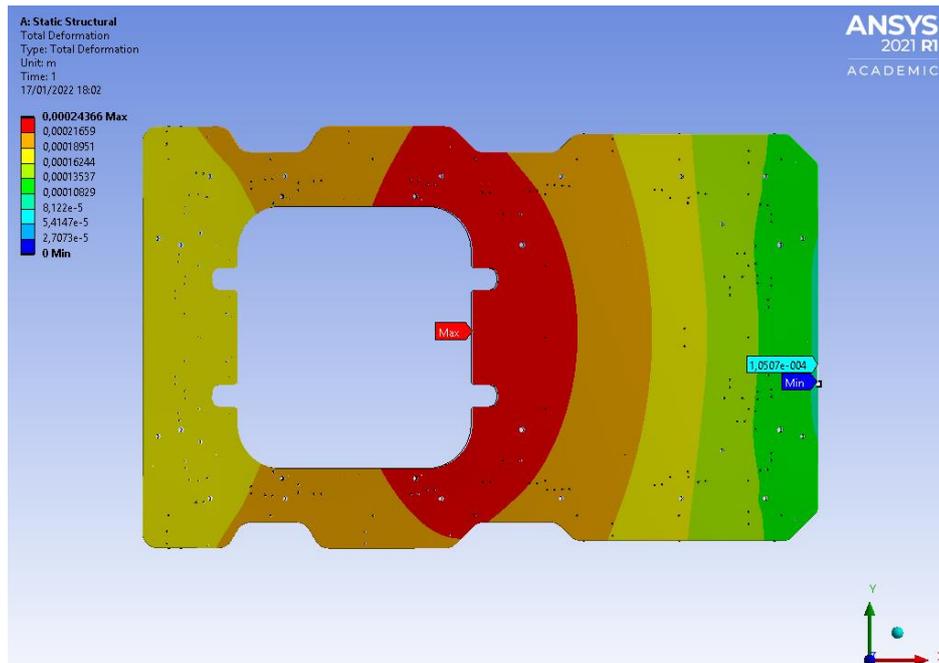


Ilustración 109- Cálculo de elementos finitos modificación 10 (2).

Si se atiende ahora en el cálculo tensional, se ve que prácticamente todo el bastidor superior trabaja, incluida la parte que estamos modificando para que aporte inercia. Los entornos de los ejes siguen admitiendo concentraciones de tensión. Era previsible, puesto que ha sido la parte más crítica en todo momento. El cuerpo de los ejes, sin embargo, no sufre grandes deformaciones ni altos niveles de tensión

La tensión máxima que se prevé en el modelo es de 17.8 MPa y se sitúa en este entorno. A continuación, se visualiza el cálculo (Ilustración 110, Ilustración 111 e Ilustración 112):

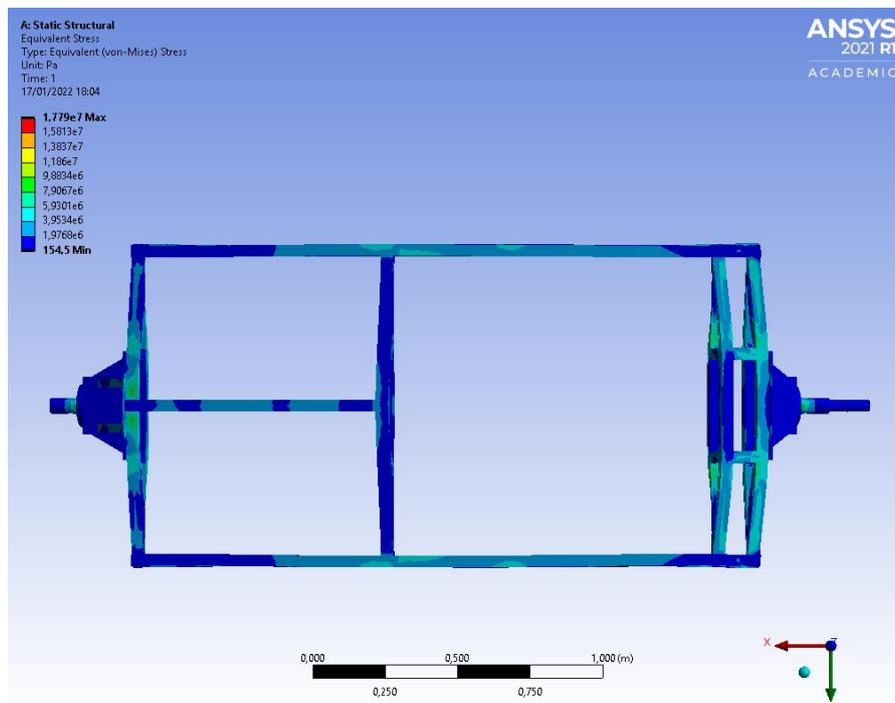


Ilustración 110- Cálculo de elementos finitos modificación 10 (3).

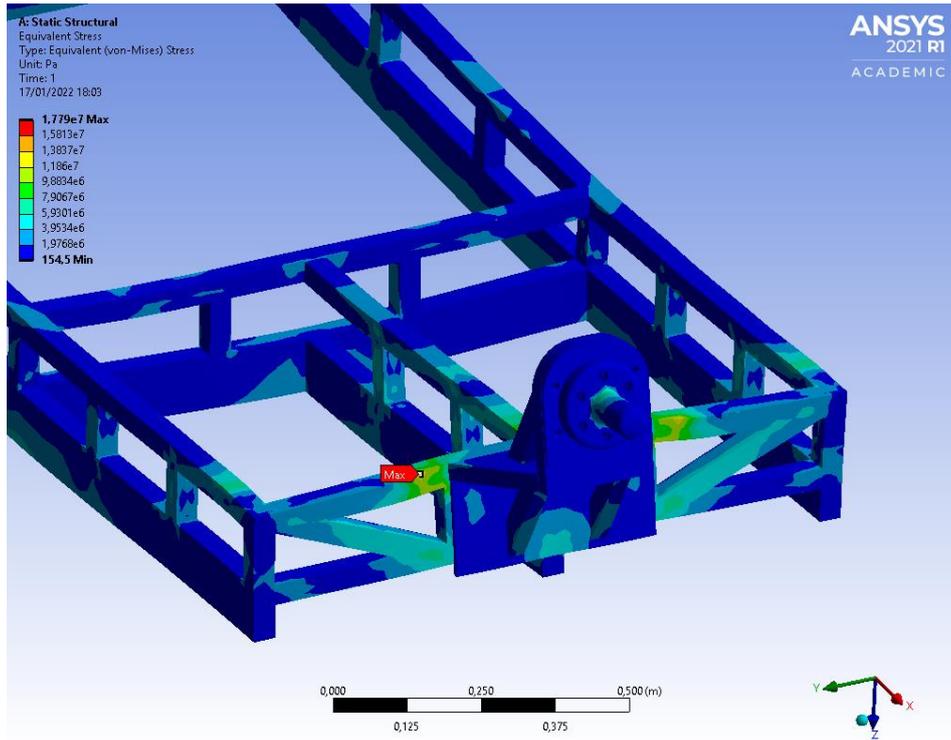


Ilustración 111- Cálculo de elementos finitos modificación 10 (4).

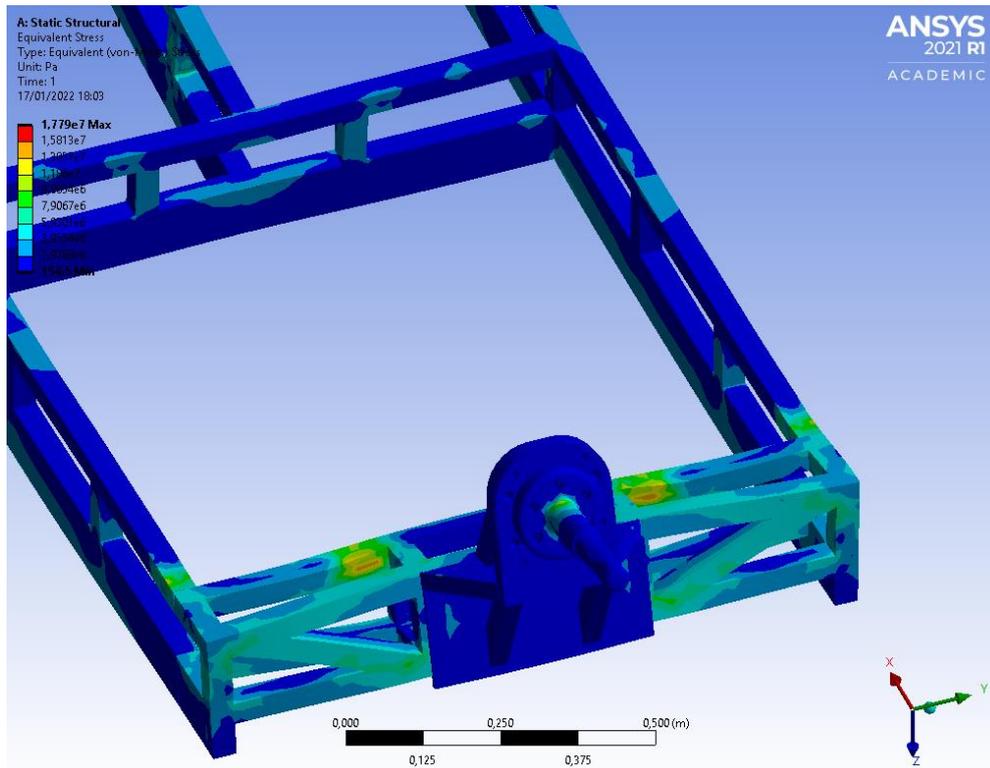


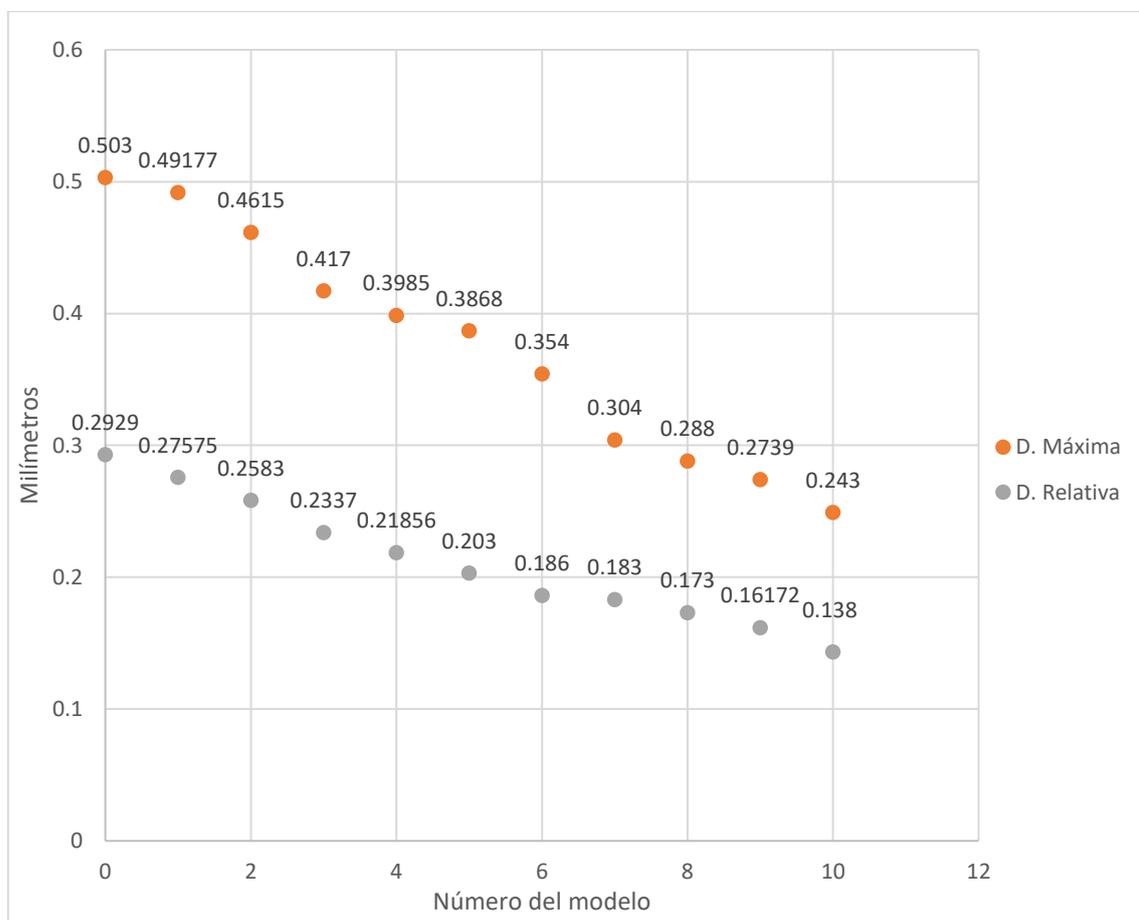
Ilustración 112- Cálculo de elementos finitos modificación 10 (5).

## Resultados de la etapa de cálculo

Llegados a este punto, se han finalizado las etapas de diseño y cálculo. Se va a recapitular el trabajo hasta aquí para poder comentarlo con más perspectiva.

Durante la etapa de cálculo se han obtenido 10 resultados en cuanto a deformaciones máximas y relativas. El resultado final resulta en un modelo de 0.243 milímetros de deformación máxima y 0.138 de deformación relativa. Teniendo en cuenta que se partía de un modelo de 0.50 milímetros de máxima y 0.29 de relativa y que la tolerancia que se le exige a la maqueta es de 0.15, se consideran unos resultados altamente satisfactorios. La mejora es de un 52% en cuanto a deformación máxima y un 48% en cuanto a relativa. Además, el peso se ha disminuido en unos 118 kilogramos, un 23%, por lo que previsiblemente será más económico. Más adelante se tratará este apartado con más detalle para tratar de dilucidar con más precisión el nivel de ahorro.

Recogiendo los sucesivos datos de deformación en un gráfico:



**Ilustración 113- Evolución de la deformación en los diseños.**

Se aprecia claramente la tendencia descendente a medida que se avanza en el cálculo.

## METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

### 9. DESCRIPCIÓN DE PROCEDIMIENTOS Y FASES

#### 9.1 PROCEDIMIENTOS

El objetivo de este apartado es clarificar desde una óptica crítica cual ha sido el problema y cuáles han sido los procedimientos para solventarlo.

El problema que se enfrenta es completamente intuitivo. A nivel comercial el producto debe cumplir ajustadas condiciones estructurales que van a requerir de un estudio particular de deformaciones. La geometría de la estructura obliga a suspender la maqueta a lo largo de una luz de aproximadamente 2.7 metros. Inevitablemente en esta situación se dará una flexión no deseada.

Tres segmentos han sido necesarios para dividir el problema en partes que se han considerado independientes. Cada una de estas partes se ha pensado por separado, estudiando su comportamiento y valorando en qué medida influían sobre la problemática principal, la deformación excesiva de nuestro calibre.

Para poder seguir el proceso lógico que ha definido estos tres segmentos, se comenzará por identificar donde nace esta flexión y a que circunstancias obedece. Para ello se recurrirá a un croquis de la estructura del modelo 4 de bastidor. Se forma simplificada la estructura podría asemejarse a un pórtico totalmente empotrado como el de las siguientes figuras (Ilustración 114 e Ilustración 115):

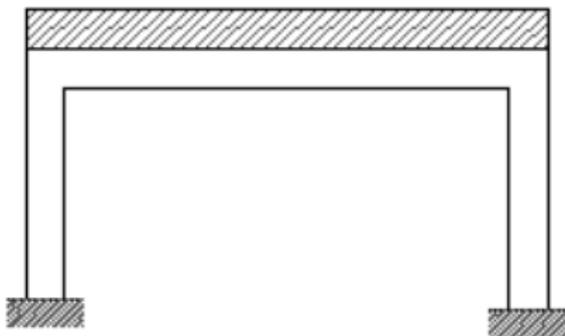


Ilustración 115- Croquis pórtico biempotrado (1).

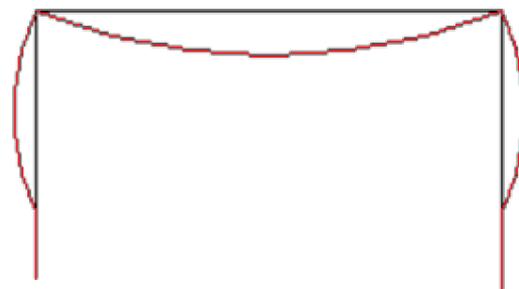


Ilustración 114- Croquis pórtico biempotrado (2).

En este croquis tipo pórtico están representadas las partes que interesan a nivel estructural. Se tiene una viga que modeliza el bastidor superior y la maqueta, descansando sobre dos pilares que harían las veces de bastidor inferior. Las cuatro uniones debieran ser, en principio, empotramientos. Por la geometría de la maqueta, los empotramientos superiores no se consideran totalmente rígidos. En los análisis anteriores ya se ha apreciado que admiten una cierta deformación en la unión.

La identificación de estos tres segmentos responde a la lógica presentada a continuación. Se sabe que la desviación de la maqueta viene inducida directamente por la flexión de la viga modelizada. Sin embargo, en la flexión de esta viga influyen tres factores diferentes: las

imperfecciones en los empotramientos superiores, la flexión de los pilares sobre los que descansa y el efecto del peso propio de un cuerpo sometido a su propio peso. Dicho de otra manera, la desviación total será la suma de las desviaciones inducidas por cada uno de estos tres fenómenos.

$$\delta_{TOTAL} = \delta_{FLEXION\ PILARES} + \delta_{FLEXIÓN\ BASTIDOR} + \delta_{UNIONES\ FLEXIBLES} \quad (1)$$



Ilustración 116- Fuentes de deformación.

Una vez seccionado tal y como se presenta en el esquema anterior (Ilustración 116) el problema el siguiente paso es buscar las causas de cada sección dentro de la estructura que estamos estudiando. Siguiendo con la misma lógica se ha decidido dividir en módulos el conjunto maqueta- bastidor. La idea es atribuir cada uno de estos subproblemas a cada uno de estos módulos para poder estudiarlos por separado. En base a estas atribuciones estableceremos el nuevo diseño.

Estos módulos que facilitarán el análisis del problema se asocian directamente con diferentes partes de la morfología del ensamble. Existen esencialmente cinco módulos: bastidor inferior, bastidor superior, ejes, soportes INA y nervios. Anteriormente se han comentado ya las diferentes modificaciones que han ido sufriendo cada uno. Estos cambios responden principalmente a la necesidad de solucionar uno de estos tres segmentos del problema.

A continuación se visualizan brevemente las relaciones de dependencia entre segmentos del problema y módulos de la estructura (Ilustración 117 Ilustración 118 e Ilustración 119).

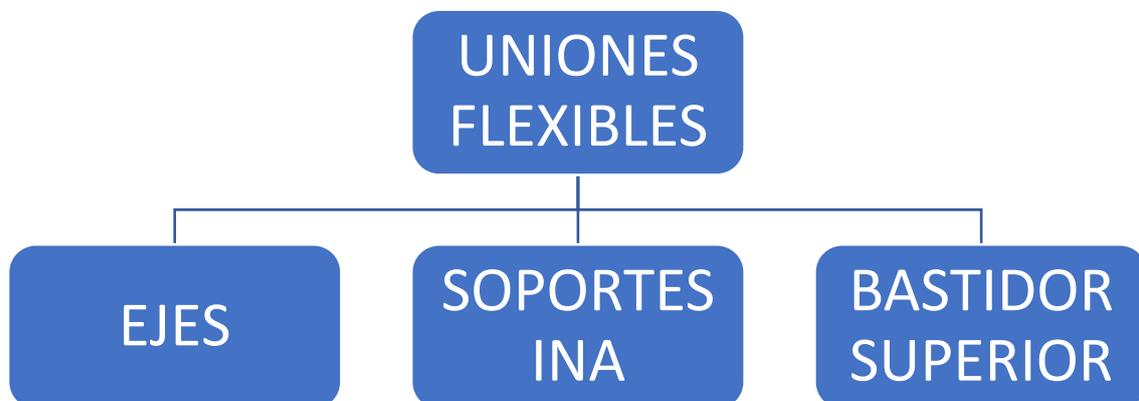


Ilustración 117- Dependencia 1.



Ilustración 118- Dependencia 2.



Ilustración 119- Dependencia 3.

A continuación se van a exponer cada uno de los tres segmentos del problema, la manera de enfocarlos y entender los fenómenos que están detrás y que planteamientos se pueden establecer para solucionarlos.

### 9.1.1 Uniones flexibles

La parte de las uniones a la hora del tratamiento ha sido considerada la fuente de errores menos intuitiva. Lo habitual es contemplar la deformación como resultado directo y exclusivo de la flexión por falta de inercia, mientras que la parte correspondiente a esta deformación en las uniones pasa más desapercibida. Durante el diseño modular anterior, gran parte del trabajo ha ido encaminado a corregirla.

Es sabido que, en teoría de estructuras [9], [10] la unión en el nudo de una barra con otra admite una clasificación según su capacidad de giro, existiendo:

- *Unión rígida (o empotrada)*: impone desplazamientos y giros comunes al nudo y a las barras que en él concurren, de tal manera que entre ellos se transmiten fuerzas y momentos.
- *Unión articulada*: permite giros distintos en los extremos de las barras que concurren en el nudo, y en las que no se transmite momento, pero si fuerza a través de la articulación.

→ *Unión flexible (o semirrígida):* no es ni perfectamente articulada ni perfectamente rígida. Permite un determinado giro relativo entre los elementos que en él concurren y además transmite fuerzas y momentos.

En el modelo simplificado se pueden apreciar dos tipos de uniones. Por un lado, se tienen las inferiores, modelizadas como empotramientos perfectos. Los resultados señalan prácticamente ausencia de tensiones, por lo que no trabajan y por tanto no se deforman. Estructuralmente no tienen demasiado interés en el problema.

Por otro lado, se tienen las superiores, totalmente flexibles. Soportan altos esfuerzos en zonas muy concretas; la deformación es inevitable. Los diagramas muestran que estas zonas suelen estar afectadas por fuertes niveles de tensión. La atención se centrará en estas últimas. También es importante comentar que, principalmente debido a la geometría del bastidor superior (existencia del hueco de la ventana), estas uniones flexibles tienen cierta asimetría. La parte opuesta a la ventana trabaja de forma significativamente más rígida, circunstancia que se ha venido apreciando hasta ahora en todos los cálculos llevados a cabo. En esta parte se soporta más peso puesto que la placa base es maciza en esta parte, pero sin embargo posee un refuerzo adicional en el bastidor superior. Esta diferencia de flexibilidad en las uniones provoca una ligera inclinación apreciable en el perfil de la maqueta. De cara a obtener unos resultados aceptables, previsiblemente se tendrá que incidir más profundamente en un extremo que en el otro o al menos, llevar a cabo el diseño para la parte más restrictiva.

El alcance de las uniones flexibles es en realidad algo subjetivo. Para tratar de hacer una primera delimitación, se considerará que vienen abarcando principalmente a los módulos de los soportes INA, los ejes y sus entornos, que en su conjunto dan como resultado esta clase de unión. A continuación, visualizamos en el siguiente esquema tres bloques diferentes que se distinguen dentro de este problema y que requerirán soluciones particulares.



Como se ha comentado, se está considerando la unión flexible como el contacto de cuatro elementos o módulos diferentes. Esta consideración puede ser algo subjetiva, puesto al tratarse

de geometrías particulares dentro de una estructura poco convencional, podría no ser una definición especialmente rigurosa. Pese a todo se modeliza de esta manera por simplicidad, siguiendo el croquis del pórtico biempotrado convencional presentado antes.

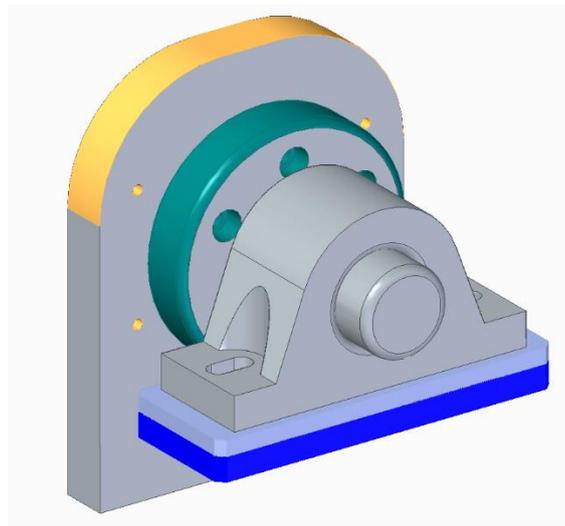
#### PRIMER BLOQUE

Se comenzará hablando sobre el entorno con el bastidor inferior. Se trata en este caso de la interacción entre el soporte INA y los pilares del bastidor inferior. Esta unión es atornillada mecánicamente a través de dos pletinas de acero. El soporte INA apenas admite holguras en este caso, de tal manera que prácticamente se mueve solidario con el pilar. Los análisis de elementos finitos indican que no hay una excesiva concentración de tensiones en esta parte por lo que no es una interacción que nos vaya a dar muchos problemas en la unión. Este apartado no tiene mucha más relevancia y no se toma ninguna medida correctiva en el diseño para tratarlo. Es por ello por lo que anteriormente se ha excluido la influencia del módulo del bastidor inferior, de este segmento de uniones flexibles.

#### SEGUNDO BLOQUE

Se centrará la atención ahora en la interacción entre el soporte INA y el eje. Se trata de una unión entre dos geometrías bastante simples. Un eje sometido a esfuerzos flectores se introduce en un agujero tratando de lograr un empotramiento. Ha de permitirse el giro relativo entre ambos, impidiendo el desplazamiento en las demás direcciones. En este caso si nos hemos encontrado concentración de tensiones a lo largo de los análisis.

Este segundo bloque es una parte bastante influyente en la flexibilidad de la unión. Un diseño poco optimizado es un mal punto de partida para nuestro modelo. Por suerte en esta interacción las geometrías son muy simples y prácticamente no hay margen para cambios muy complicados. A continuación, se visualiza esta unión (Ilustración 120).



**Ilustración 120- Ensamble soporte INA y eje.**

Se va a mostrar ahora la ciencia que gobierna el comportamiento del contacto.

## Ley de Hertz

Anteriormente, en el apartado de las alternativas, se ha comentado que en este contacto se han encontrado repetidas veces puntos de tensión máxima. A través de esta interacción se trasladan todos los esfuerzos y descansa todo el peso suspendido de la estructura.

En 1882 Hertz resolvió el problema del contacto entre dos cuerpos elásticos con superficies curvas (Ilustración 122 e Ilustración 121), entre los que se encuentra nuestro caso [11]. La mecánica de contacto es una disciplina fundamental en la ingeniería para el diseño de sistemas técnicos basados en la seguridad y el ahorro de energía [12].

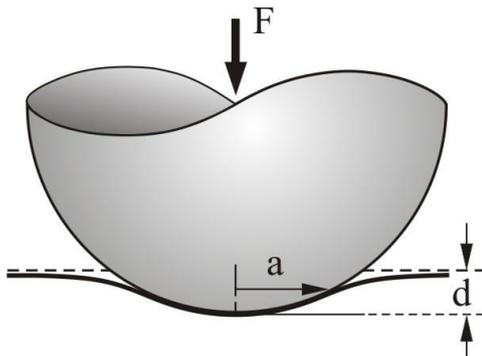


Ilustración 121- Contacto esfera-plano.

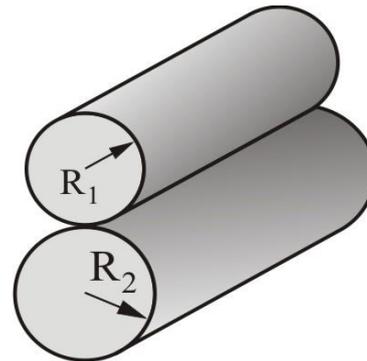


Ilustración 122- Contacto cilindro-cilindro.

Si se centra la atención en el contacto, se encuentra realmente una interacción entre dos cilindros de ejes paralelos. La ley de Hertz definirá de que parámetros dependen las tensiones que encontramos.

En el contacto entre dos cilindros de ejes paralelos, la fuerza es linealmente proporcional a la profundidad de la hendidura:

$$F = \frac{\pi}{4} * E * L * d \quad (2)$$

Los radios de curvatura no aparecen en esta relación. El radio de contacto está definido a través de la relación:

$$a = \sqrt{Rd} \quad (3)$$

Donde:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

Finalmente, la presión adopta la forma:

$$p = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{1/2} \quad (5)$$

Donde  $p_0$  es la presión máxima:

$$p_0 = \left(\frac{E * F}{L * R * \pi}\right)^{1/2} \quad (6)$$

E= Módulo de elasticidad.

L=Longitud del contacto entre cilindros.

d=Deformación en el contacto.

$R_x$ =Radio del cilindro.

El interés de esta expresión se encuentra en la dependencia de la geometría. Se aprecia que la presión y la presión máxima varían con la raíz cuadrada del cociente de la longitud y el radio del cilindro, por lo que al aumentando estas dimensiones, se verá reducida la concentración de tensiones en esta zona evitando en gran medida las deformaciones en esta zona y contribuyendo en buena parte a rigidizar la unión.

La deformación es inversamente proporcional a la longitud del eje y a su diámetro. La idea, por lo tanto, es reducir la superficie de contacto entre soporte INA y eje. A mayor superficie de contacto para la misma carga, se obtendrá una mejor distribución de la tensión y un empotramiento más rígido.

En el modelo, esta superficie de contacto viene determinada por dos dimensiones, ancho del soporte y diámetro del eje. No queda más que aumentar cada una de ellas para obtener mejores resultados. En el capítulo anterior, la etapa de diseño, se han mostrado las dos etapas en las que se han producido estos cambios. Finalmente, las dimensiones han sido de 68Lx55D.

Por último, es importante darse cuenta de que, en este bloque, por tratarse de una unión de estas características, puede haber fuentes de error de otras naturalezas. Puede encontrarse algún fallo de fabricación como, por ejemplo, una pequeña holgura que provoque un mal ajuste entre las dos superficies. Por otro lado, también la vida útil será previsiblemente más limitada que la del resto de la estructura; si en algún momento el conjunto deja de ser útil es posible que los fallos empiecen por esta parte. Se trata de una unión ajustada entre dos superficies que transmitirán un sensible volumen de carga.

### TERCER BLOQUE

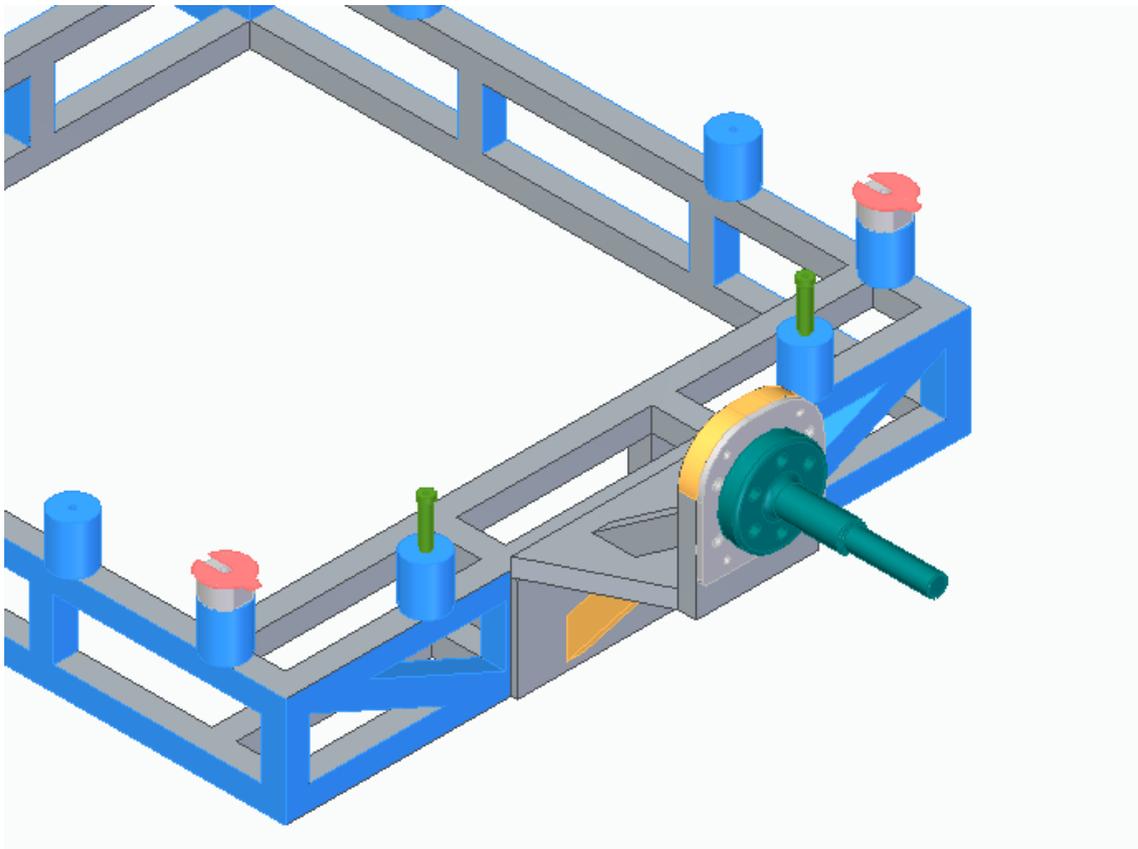
Finalmente se llega al tercer bloque afectado por las uniones flexibles. Se hablará ahora principalmente de la unión soldada entre el eje y el bastidor superior y sus características.

Es en este bloque dónde, en parte, residen las causas de la asimetría entre las dos uniones flexibles. El bastidor superior tiene geometrías diferentes en un lado y en el otro, lo que provoca esta diferencia en el reparto de deformaciones. En capítulos anteriores, con el objetivo de justificar las modificaciones en algunos módulos, se han mencionado algunas de las cuestiones de las que se hablará a continuación. Ahora se volverán a comentar de forma más ordenada.

Lo primero que hay que dejar claro acerca de esta interacción es que se trata de una unión soldada. El módulo de los ejes que se han conocido hasta ahora es en realidad una parte integral del bastidor superior. Evidentemente, las tensiones que se producirán tendrán que atravesar esta soldadura para poder llegar hasta el soporte por lo que el cordón de soldadura que comunique ambos módulos debe ser lo más extenso posible y ejecutarse con buenas garantías.

El segundo aspecto dominante en esta unión es la morfología del bastidor superior en el entorno de la soldadura. El cuerpo del eje es un volumen robusto reforzado con cuatro nervios; difícilmente se deformará. En su lugar, obligará al entorno del bastidor superior a asumir esta deformación por él ya que es una zona significativamente más débil. Lo forman barras huecas de sección cuadrada propensas a deformarse ante los esfuerzos de flexión. Por ello es importante un diseño adecuado en esta zona. La cantidad de material y su disposición en este entorno influirá en su comportamiento. El cerchado irregular propuesto en el modelo de partida dispuesto aparentemente de manera arbitraria, no logra evitar esta deformación.

Se va a explicar la manera de disponer el cerchado en esta zona. Primero, para poder clarificar el problema al que nos enfrentamos, va a visualizarse una imagen del estudio de elementos finitos en este entorno en la parte de la ventana.



**Ilustración 123- Entorno con bastidor superior.**

La Ilustración 123 se corresponde con el modelo de bastidor propuesto en el modelo modificado M02. Los cerchados laterales se han eliminado y ya no intervienen en la estructura. Se elige este ejemplo porque se considera el más genérico de todo el proyecto.

La zona que se va a estudiar es la que se encuentra afectada en mayor medida por la concentración de tensiones (amarillo y verde); incluso se aprecia aquí la zona de tensiones máximas. Toda esta zona se encuentra sometida a un estado multiaxial de tensiones muy complicado de calcular. El objetivo es entender el problema únicamente a nivel cualitativo y dejar la parte del cálculo al programa de elementos finitos. Como habíamos dicho, el cuerpo del eje es suficientemente rígido, lo que obliga al entorno del bastidor superior a asumir la deformación por él. Se van a intentar exponer los esfuerzos que están detrás de este comportamiento para poder actuar en consecuencia. Para ello se representa un sencillo croquis (Ilustración 124) del perfil en el que se indican los esfuerzos existentes.

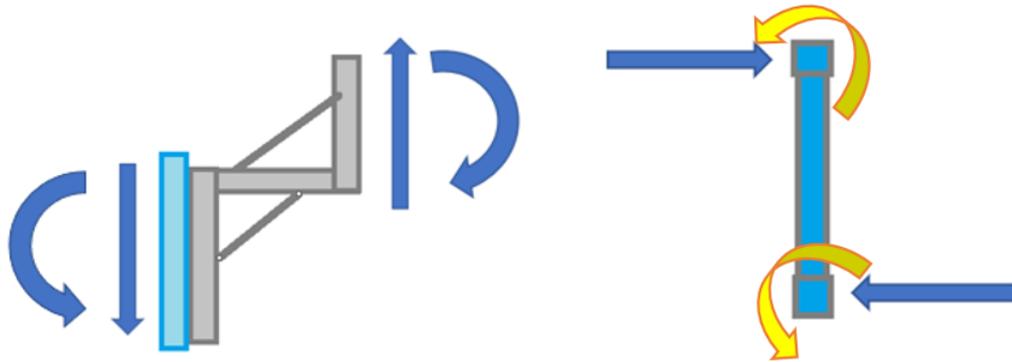


Ilustración 124- Croquis momentos flectores.

En el croquis viene representado este tercer bloque. Se han dibujado los momentos flectores consecuencia del peso del bastidor. Estos momentos flectores se trasladan hacia los perfiles de la estructura provocando un giro y dando lugar también a un momento torsor (amarillo) sobre ellos. Se aprecia por tanto que dentro de la estructura conviven todo tipo de esfuerzos. A continuación se describe brevemente como se considera que afectan:

*Esfuerzos cortantes:* siempre se van a encontrar a lo largo de toda la estructura; por otro lado, van a dar lugar a tensiones mucho menores que los flectores y torsores. No hay grandes propuestas para poder eliminar estos esfuerzos; se debe más bien, convivir con ellos.

*Esfuerzos flectores:* en este caso ocurre algo parecido que en el caso de los cortantes. La manera de abordarlos es introduciendo inercia tal y como se propone en las últimas tres modificaciones del bastidor superior.

*Esfuerzos de torsión:* la torsión es la principal responsable del mapeado que se encuentra en el cálculo de elementos finitos. La unión soldada del eje está provocando un momento tanto en el cordón superior como en el inferior, ambos unidos por el pilar vertical. Son los principales protagonistas en este apartado.

Matemáticamente, los cortantes generados en un perfil cerrado de pared delgada cuando se impone un giro en una sección:

$$\tau = \frac{G \cdot J \cdot \varphi}{L \cdot 2 \cdot t \cdot \Omega} \quad (7)$$

Dónde

$L$  = Longitud de la sección en la que se calcula el esfuerzo cortante.

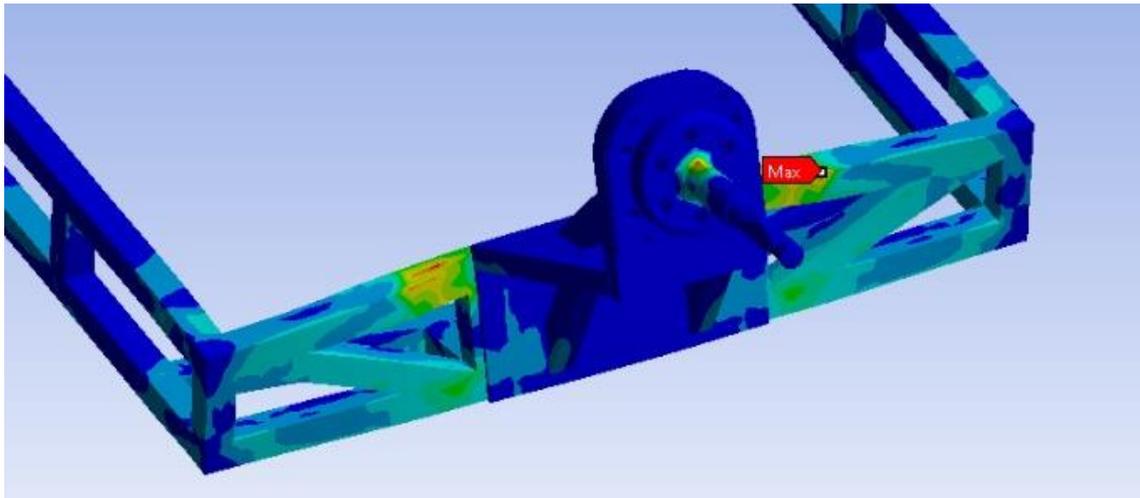
$J$  = Módulo de torsión.

$G$  = Módulo de elasticidad transversal del material.

$T$  = Espesor de la sección.

$\Omega$  = Área total encerrada por la línea media de la sección tubular.

$\varphi$  = Ángulo girado.



**Ilustración 125- Deformación lado de la ventana.**

Todos estos esfuerzos provocan el comportamiento flexible de las uniones (véase Ilustración 125). Se estima que este comportamiento es el que más error introduce en nuestro diseño. Es importante abordarlo con garantías para poder obtener unos resultados satisfactorios. Las modificaciones 2, 3 y 4 del bastidor superior introducen refuerzos en el lado de la ventana con el objetivo de eliminar estos esfuerzos. Se introduce un cerchado diagonal y simétrico en ambos lados y un refuerzo transversal en la zona de la ventana. Los cálculos hechos hasta ahora muestran que un correcto diseño de esta parte ayuda a conseguir mejores resultados en cuanto a deformaciones y tensiones en la maqueta. La idea es rigidizar en la medida de lo posible toda esta parte, logrando un modelo más robusto.

### 9.1.2 Deformación en los pilares

Como en todos los pórticos, las cargas viajarán a través de los pilares. Estos pilares se deformarán y contribuirán a la deformación de la viga que mantienen. El peso suspendido del bastidor superior y la maqueta viajarán hasta el eje y el soporte INA, efectuando en la unión un momento flector. Estos esfuerzos se traducirán en la unión flexible como la suma de otro momento flector y una carga vertical.

#### Momento flector

Por coherencia con el croquis del pórtico, se tendrán los pilares sometidos a un flector constante. Este flector deformará la estructura provocando un giro en el extremo superior. La expresión de este giro adopta entonces la forma de:

$$\theta = \frac{M_z \cdot h}{E \cdot I_z} \quad (8)$$

Donde

$M_z$  = Momento flector

H = Altura a la que se calcula el giro

E = Módulo de elasticidad del material

$I_z$  = Inercia de la sección

Vemos que la expresión es proporcional a la altura e inversamente proporcional a  $I_z$ . La solución ante un giro excesivo es por tanto aumentar la inercia de esta sección. Siguiendo este

razonamiento se entiende el por qué se incluyó un refuerzo en esta zona en el modelo 3 de bastidor.

### Compresión simple

Los pesos que soportan estos ejes repercuten también de forma directa a través de cargas axiales. La expresión de la deformación ante un esfuerzo axial es simplemente:

$$\delta = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{E \cdot A} \quad (9)$$

Siendo

F = Fuerza de compresión.

E = Módulo de elasticidad del material.

A = Área de la sección.

Como podía preverse, esta deformación es inversamente proporcional al área de la sección. A pesar de todo, se tiene un bastidor de acero con un módulo elástico muy alto, por lo que este efecto difícilmente será significativo. Por otro lado, encontramos una deformación axial proveniente de una compresión simple, efecto que en principio no interferiría sobre nuestro objetivo de no desviación de la maqueta ya que, en realidad, de ser apreciable, influiría paralelamente en ambos pilares.

### Pandeo

El pandeo es un particular fenómeno que se da en piezas sometidas a esfuerzos de compresión. Cuando estos esfuerzos alcanzan un valor determinado, un posterior incremento de estos da lugar a la aparición de una curvatura en la pieza.

Euler fue el primer investigador que proporcionó un análisis de estabilidad de una columna sometida a compresión. Su estudio, aun cuando se refería a un caso idealizado, se le conoce con el nombre de columna de Euler. Pretende determinar para que valor de la carga P es posible el equilibrio en una configuración ligeramente flexionada.

En este caso, se consideran los pilares de la estructura como biempotrados, por lo que la carga crítica adopta la forma:

$$P_{cr} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \quad (10)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del material.

L = Longitud del pilar.

I = Menor inercia de la sección.

En principio, la estructura no debería tener inestabilidades derivadas de problemas de pandeo, puesto que sus dimensiones no la hacen suficientemente esbeltas en ningún punto.

En base al proceso de experimentación durante los primeros modelos de bastidor y con buen criterio, se introducen unos grandes refuerzos para los pilares en los conjuntos 3 y 4. Se coloca un pesado refuerzo al lado con el objetivo de aportar inercia al pilar. Si bien la idea es correcta,

el aporte de peso es de aproximadamente 35 kilogramos, considerado muy sobredimensionado para un problema que podría resolverse con una geometría simple a través de un par de refuerzos verticales. Este es uno de los motivos por el que existen modificaciones en el bastidor inferior.

### 9.1.3 Flexión bastidor (debido al peso propio)

Por último, queda por comentar la causa de deformación más intuitiva de todas. El hecho de tener suspendido un cuerpo sometido a su propio peso supondrá directamente un motivo de deformación. Es decir, una viga biapoyada o biempotrada y sometida a su propio peso, sufrirá una determinada flexión que evidentemente dará lugar a la deformación. Esta circunstancia es insalvable puesto que es el centro de todo el proyecto, donde reside el problema y la solicitud clientelar. La maqueta debe estar suspendida para poder girar.

Si se profundiza un poco más en esta idea, es capaz de verse que directamente el peso propio viene condicionando también la eficiencia de las uniones y la flexión de los pilares. Un bastidor superior más robusto y pesado que a priori ahorraría la flexión de la viga, previsiblemente influirá de manera negativa en estos otros dos aspectos. El ejemplo perfecto se encuentra en la propuesta de evolución de los conjuntos bastidor-maqueta; el hecho de ir progresivamente introduciendo refuerzos que hagan más pesado el modelo ha influido generando tensiones y mayores deformaciones. Este problema justifica en parte el trabajo de ingeniería. Se debe encontrar una distribución adecuada de las cargas para poder minimizar esta situación.

La deformación por flexión de una viga biempotrada (Ilustración 126) viene dada por la siguiente expresión:

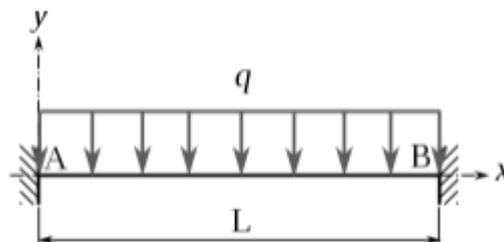


Ilustración 126- Esquema barra biempotrada

$$y = -\frac{q \cdot x^2}{24 \cdot E \cdot I} * (L - x)^2 \quad (11)$$

$$y_{max} = -\frac{q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (12)$$

Dónde:

E = Módulo de elasticidad del material.

I = Inercia de la sección.

L = Longitud del perfil biempotrado.

q = Carga por unidad de longitud asociada al peso propio.

Se aprecia que directamente la deformación y la deformación máxima son inversamente proporcionales a la inercia de la sección. Si bien es cierto que en este caso no estamos hablando estrictamente de una viga al uso y las ecuaciones no son válidas a nivel cuantitativo, sigue existiendo una fuerte analogía, manteniendo la misma dependencia entre los parámetros; se mantendrá la proporcionalidad inversa de la inercia.

Una vez consideradas suficientemente rígidas las uniones, y evitada la flexión de los pilares, el problema es relativamente fácil de solucionar. La deformación estará definida principalmente por un parámetro inercial que residirá en el bastidor superior. Se llega a este punto en la modificación número 7, donde se empieza a variar únicamente una dimensión directamente proporcional a la inercia. Finalmente, los resultados se muestran satisfactorios.

## 9.2 FASES DEL DESARROLLO DEL TRABAJO

El proyecto se ha desarrollado siguiendo las etapas que se exponen a continuación:

### 1. Recopilación de información.

- 1.1 Recopilación de archivos CAD.
- 1.2 Recopilación de imágenes.
- 1.3 Recopilación de información específica de diferentes naturalezas



### 2. Preparación del archivo CAD.

- 2.1 Traducción del formato.
- 2.2 Limpieza del archivo ensamble.



### 3. Análisis de los 4 bastidores

- 3.1 Preparación de los ensamblajes CAD
- 3.2 Ejecución del cálculo
- 3.3 Reflexión sobre los resultados



### 4. Interpretación de los resultados

- 4.1 Segmentación del problema
- 4.2 División del bastidor en partes
- 4.3 Reflexión sobre el comportamiento de cada parte (segmento)



### 5. Etapa de diseño

- 5.1 Diseño modular.
- 5.2 Ensamblaje de los módulos



### 6. Análisis del modelo

- 6.1 Ejecución del cálculo
  - 6.1.1 Interpretación de las deformaciones del conjunto
  - 6.1.2 Interpretación de las tensiones a nivel modular
- 6.2 Reflexión sobre los resultados.



### 7. Redacción del proyecto.



### 8. Fin



### 9.2.1 Descripción de las fases.

#### 1. Recopilación de información

Estos seis meses de estancia en CIDUT han sido una temporada de continuo aprendizaje. El entorno y el formato son muy concretos y realistas. Por la planta pasaban continuamente proyectos de utillaje diferentes. Esta primera fase ha sido de recopilación de todo tipo de información relativa a la actividad de la planta: sobre el funcionamiento de sus productos, de los proyectos que se llevaban a cabo, labores de investigación y desarrollo alternativas, relativa a los archivos CAD de trabajo, imágenes realistas que ilustraban los resultados y formas de trabajo, etc.

El hecho de ser un entorno tan realista enriquece ampliamente el proyecto; la posibilidad de ser útil en el campo de trabajo también lo hace muy interesante. Es importante ir en consonancia con esta idea y por eso se ha invertido tiempo en esta fase, recopilando para luego exponer información realista y veraz, tanto de manera verbal como gráfica, que explique diferentes cuestiones que atañen a la temática principal.

#### 2. Preparación del archivo CAD

Esta fase ha supuesto preparar el archivo CAD en todos los aspectos para luego poder ser utilizado en los softwares de trabajo.

Llevar a cabo esta preparación ha significado primero la traducción del formato de los archivos. Inicialmente estos documentos se encontraban con una extensión *.step*. Esto hacía su tratamiento directo más complicado, puesto que es un formato general que se usa principalmente como modo universal para exportar, mover o enviar, pero no para manipular. La traducción ha supuesto ahorrar tiempo cada vez que se ha tenido que cargar uno de estos archivos CAD, tanto en Solid Edge como en ANSYS workbench.

Ha supuesto también la limpieza de los ensamblajes generales. Como se ha comentado en capítulos anteriores, estos archivos son archivos directamente comerciales, con un alto nivel de detalle y con mucho peso, llegando a suponer gigabytes de volumen. Su manipulación se volvía lenta y trabajosa, requiriendo prácticamente de todos los recursos del ordenador simplemente para poder cargarlo en cualquiera de los dos programas que hemos utilizado. Limpiarlo y acondicionarlo ha supuesto retirar aquellas partes del ensamblaje que no nos interesaban estructuralmente. Ha facilitado el trabajo, haciéndolo mucho más fluido y llevándonos a tiempos de espera mucho menores en el momento de calcular las sucesivas estructuras.

Por último, en la preparación de estos archivos CAD también se incluye su arreglo para poder introducirlos en el programa de elementos finitos. Por circunstancias muy específicas, algunos componentes de los ensamblajes no eran válidos para el estudio de elementos finitos, por lo que también ha habido un trabajo de identificación de estos componentes erróneos y su reacondicionamiento o su rediseño integral. Esta última no ha sido una tarea sencilla; ha supuesto una labor de análisis y búsqueda particular de las fuentes de error, en ocasiones de naturalezas diversas.

En este contexto hay que tener también en cuenta mi inexperiencia a nivel personal dentro del uso de estos programas. Ha sido también un trabajo de ensayo y error que ha significado encontrarse constantemente con problemas desconocidos, alargando esta fase más de lo deseado en un comienzo.

### 3. Análisis de los 4 bastidores

Una vez que los archivos CAD están listos para usarse, llega el momento de analizarlos a nivel estructural. Se tienen cuatro modelos de bastidor. Como ya se ha comentado, los tres primeros pertenecen a un proyecto y el cuarto y último a otro. El objetivo también es ver el grado de error que se maneja en cada uno de ellos y como ha ido cambiando a lo largo de la evolución del modelo.

Para el análisis han sido cargados en ANSYS workbench, se han identificado sus pesos y algunas de sus dimensiones, se ha inducido una malla de elementos que se ajuste a su envergadura y se han calculado sus tensiones y sus deformaciones. Cada análisis ha tratado de efectuarse en condiciones similares, pero a la vez respetando las diferencias entre los modelos. Si el modelo era más grande y requería más elementos para el mismo nivel de detalle, se ha introducido una malla que se ajustase a esta necesidad.

Posteriormente a estos cálculos se ha observado y reflexionado a cerca de los resultados. En esta etapa nos fijamos en el volumen de deformaciones y en la concentración de tensiones. Los resultados han entrado dentro de lo esperado en un primer momento, con unas tolerancias fuera de lo reconocido como aceptable y dejando a su vez patente el problema de diseño durante su evolución. La creación de un modelo de envergadura no ha sido suficiente para salvar el problema.

### 4. Preparación del enfoque del nuevo diseño

En este punto se tiene ya un modelo de partida para rediseñar. Se parte del cuarto bastidor por ser el que mayor luz debe salvar y encontrarnos por tanto en una situación más conservadora. Es momento de decidir cómo proceder. Una buena planificación a partir de aquí es fundamental para disponer un trabajo claro y sobre todo efectivo.

Lo primero es comenzar con una reflexión sobre el problema. En un principio identificarlo con claridad se hace más bien difícil, por lo que se opta por intentar segmentarlo para abordarlo de manera más eficiente. La idea es fragmentarlo en partes más pequeñas e intuitivas para poder tratarlas por separado. Esto supondrá también una manera más ordenada de trabajar en la etapa de diseño.

Si el problema principal es la deformación de la estructura, segmentar el problema supone directamente dividir la estructura en partes. Se trata de un diseño modular. Se identifican diferentes componentes dentro del conjunto bastidor-maqueta que se cree que pueden influir de manera independiente dentro del conjunto. La modificación de la estructura tendrá que darse necesariamente a través la modificación de alguno de estos módulos. De esta manera se da prioridad a los módulos antes que, al conjunto, haciendo un seguimiento directamente a cada uno de ellos.

Cada uno de estos componentes es pensado de manera independiente. Se analiza como su geometría e interacción con el resto de los módulos influye dentro del problema general. De esta manera se sacan las conclusiones pertinentes en cuanto a que modificaciones hay que ir imponiendo para acercarnos al resultado que deseamos.

### 5. Etapa de diseño

En esta fase entramos en un proceso iterativo. Alternativamente se van diseñando los diferentes módulos y calculando las estructuras resultantes [13]. En función de este resultado

se incorporan nuevas modificaciones en los módulos o se mantienen como estaban. Si los cálculos en ese segmento del problema son satisfactorios, se continúa con esa solución. Si en ese segmento estos resultados son considerados ineficientes se vuelve a este punto, a la etapa de diseño, para poder redefinir el modelo.

Estos módulos son a nivel CAD totalmente independientes unos de otros; la unión geométrica entre ellos se impone a través de lo que se conoce como restricciones. Aquí se encuentra también la labor de hacer coincidir de manera coherente cada una de las modificaciones que se van produciendo.

## 6. Análisis del modelo

Dentro del bucle, después de la etapa de diseño se encuentra el análisis del modelo. Se da alternativamente con la fase de diseño, recalculando una y otra vez el conjunto cada vez que se introducen nuevas modificaciones. De este modo el desarrollo es más seguro, identificándose fácilmente los puntos débiles y las partes a reforzar.

Dentro del análisis del modelo se encuentran también dos fases, la ejecución del cálculo y la interpretación de los resultados. La ejecución del cálculo supone la adaptación de las circunstancias del programa al modelo a calcular. Si el conjunto a examen es de más detalle, se requerirá un mayor número de elementos. Por otro lado, experimentalmente se ha comprobado que un nivel de detalle alto en cada una de las modificaciones de los diferentes módulos requiere de un mayor número de elementos para poder modelizarlo con exactitud. Esto se traduce en un cálculo en cierto modo personalizado para cada caso.

Por otro lado, la interpretación de los resultados se basa principalmente en un principio: para conseguir un diseño eficiente de bastidor, las cargas dentro de la estructura deben estar lo más repartidas posible. Esto implica prestar especial atención a la concentración de tensiones y emplear esfuerzos en intentar diluirlas. Si hay elementos o zonas que no trabajan, conviene también suprimirlas en la medida de lo posible.

## 7. Redacción del proyecto

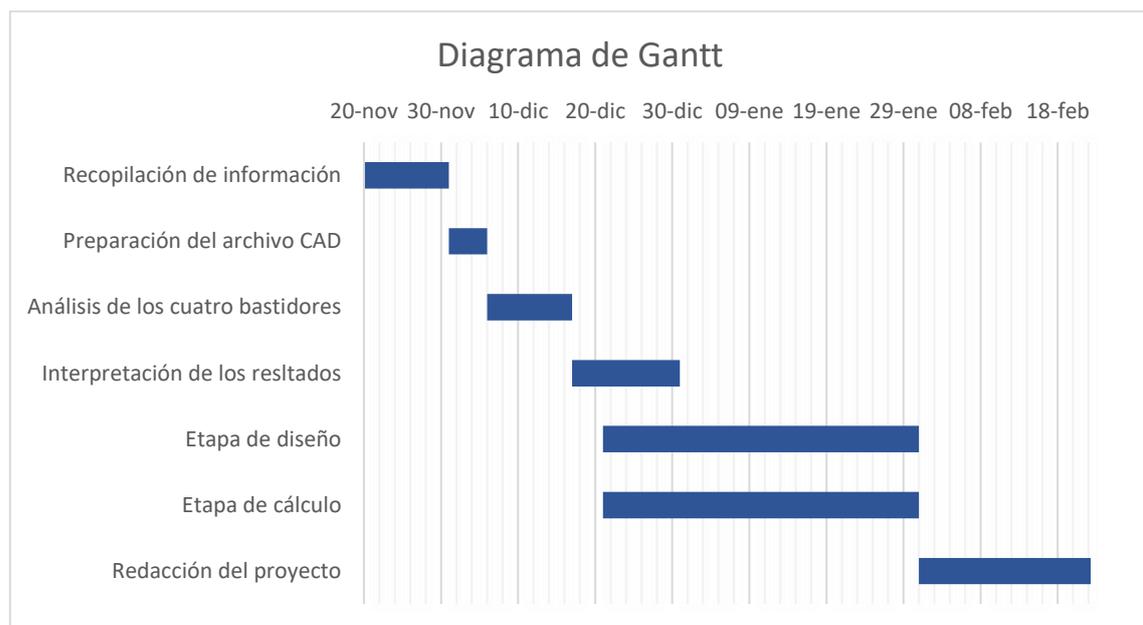
En esta última fase el objetivo es plasmar por escrito todas aquellas ideas que se han ido trabajando hasta el momento. Se dejan por escrito algunas formalidades, así como las razones de ser del proyecto: objetivos, alcance, beneficios, conclusiones o metodologías seguidas.

### 9.2.2 Diagrama de Gantt

A continuación, se presentan las fases comentadas anteriormente en un diagrama de Gantt. Como se ha comentado, las fases de diseño y cálculo se solapan entre sí, y en parte con la interpretación de los resultados. Por lo demás, todas las etapas tienen su correspondiente posterior y predecesora. El proyecto abarca desde el 20 de noviembre de 2021 hasta el 22 de febrero de 2022, fecha que se considera ya finalizado.

FASE	Fecha inicio	Duración (días)	Fecha final
<b>Recopilación de información</b>	<b>20-nov</b>	11	30-nov
<b>Preparación del archivo CAD</b>	01-dic	5	05-dic
<b>Análisis de los cuatro bastidores</b>	06-dic	11	16-dic
<b>Interpretación de los resultados</b>	17-dic	14	31-dic
<b>Etapas de diseño</b>	21-dic	41	30-ene
<b>Etapas de cálculo</b>	21-dic	41	30-ene
<b>Redacción del proyecto</b>	31-ene	23	<b>22-feb</b>

Tabla 7- Fases del proyecto.



## 10. ASPECTOS ECONÓMICOS

El objetivo principal de este proyecto era el diseño y comprobación de un bastidor que cumpliera las condiciones de no deformación exigidas por cliente para los calibres de control que fabrica CIDUT.

En un principio también se ha comentado lo que implica el sector productivo. Siempre se busca maximizar el margen de beneficios por lo que en cada operación de este proceso productivo hay que buscar reducir costes para finalmente poder maximizar el margen de beneficio. Por ello, si bien no es el objetivo principal, también se pone el foco en el ahorro económico en proceso de fabricación del bastidor.

### 10.1 DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO

En este apartado se expondrá un pequeño desglose de los gastos que se han producido durante el desarrollo del proyecto. Para el desarrollo de este proyecto se ha requerido de:

- Ingeniero superior
- Graduado
- Ordenador
- Licencias de software
- Material de oficina

Diferenciaremos tres tipos de gastos diferentes: horas internas, medios materiales y amortizaciones.

Horas internas	Horas	Precio (€/h)	Precio (€)	
Ingeniero superior	30	50	1.500	
Graduado	600	25	15.000	
<b>Medios materiales</b>				<b>Precio (€)</b>
Material de oficina				10
Ordenador				900
Amortizaciones	Horas	Precio (€/h)	Coste	Precio (€)
Ordenador	580,00	0,073	180€/año	42,34
Licencia Solid Edge	265,00	0,126	229€/año	33,39
Licencia Ansys workbench	315,00	0,625	1000€/año	196,87
<b>Subtotal (€)</b>				<b>17.682,6</b>
<b>Imprevistos (5%) (€)</b>				<b>884,13</b>
<b>Total (€)</b>				<b>18.566,73</b>

En cuanto a las horas internas, se desglosa el trabajo de dos personas. La denominada ingeniera superior se corresponde con la directora del trabajo, mientras que el graduado se corresponde con el propio autor del documento.

Finalmente, teniendo en cuenta todo lo arriba indicado y una partida del 5% para posibles imprevistos, se estiman unos gastos de 18.566,73 euros.

## 10.2 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

Estimar el precio del bastidor propuesto es una tarea realmente difícil. Muchas veces, las relaciones comerciales entre empresas de esta naturaleza están afectadas por diferentes particularidades o circunstancias concretas que hacen variar el precio o presupuesto en una dirección u otra. Además, este precio puede ser diferente en función de muchas circunstancias de fabricación: tipo de proceso, herramientas utilizadas, transporte... Por eso, manejarse en términos económicos con una unidad de medida monetaria se hace un tema complicado. Sin embargo, sí que se puede estimar una mejora en el coste del bastidor si se comparan otros términos que definen su precio, términos que dependan únicamente de la morfología del bastidor.

Principalmente se va a centrar la atención en dos parámetros que se tratarán de estimar en el caso del cuarto modelo propuesto por CIDUT, y la décima modificación planteada en este proyecto. Estos dos parámetros son:

- *Peso del bastidor:* Evidentemente, el material utilizado en cada modelo llevará un coste asociado. Como en casi cualquier transacción comercial, a mayor peso, mayor coste. Además, un peso mayor en muchos casos suele conllevar más riesgos o incluso cargas económicas derivadas, tales como encarecimientos en el transporte, problemas de espacio... etc.
- *Longitud de las soldaduras:* En estos modelos de bastidor, todos los perfiles suelen incorporar uniones soldadas. Salvo en aquellas zonas en las que las uniones se den a través de tornillería, en el resto se requiere de un proceso de soldado, normalmente lento y costoso. Si bien existen otros procesos de fabricación por medio, tales como el plegado y corte de las chapas que forman los perfiles, se considera más difícil de cuantificarlos y no se tendrán en cuenta puesto que se cree que tampoco suponen una diferencia significativa en número.

Recopilando los datos de los sucesivos cordones de soldadura y pesos:

	Soldadura bastidor inf. (m)	Soldadura bastidor sup. (m)	Peso (kg)
<b>Modelo 4</b>	6,08	52,632	520
<b>Modificación 10</b>	2,88	37,252	422

Tabla 8- Ahorro final en soldaduras y peso.

Teniendo en cuenta esto último, se ha reducido el peso en un 18,8% y la longitud de las soldaduras en un 31,6%. Se han contabilizado únicamente las zonas modificadas de los bastidores superior e inferior en ambos modelos. El resto de las soldaduras no varían en el proceso de transformación por lo que no se han tenido en cuenta.

Sería interesante atreverse a cuantificar un parámetro frente a otro para poder ser conscientes del nivel de mejora económica. Sin embargo, no se han conseguido unos datos fiables para describir esta relación, y al ser dos cuestiones de naturaleza muy diferente no es realista proponer ningunos valores sin poseer esta información de primera mano. A pesar de eso, quedan cuantificados dos parámetros que, como se ha dicho, influyen en gran medida en el coste final del producto. Se trata de unos porcentajes suficientemente satisfactorios.

## 11. CONCLUSIONES

---

Finalmente, en este proyecto se ha logrado diseñar un modelo de bastidor que cumpla la exigente restricción de 0,15 milímetros de tolerancia. Esta condición se justifica a través de un estudio de deformaciones con un software de elementos finitos. Se han expuesto de forma detallada los razonamientos que nos han seguido para introducir las modificaciones que nos han conducido al modelo final. Llegados a este punto del proceso se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Previo al análisis de elementos finitos la solución para lidiar con la deformación era introducir refuerzos que introdujeran inercia. De esta manera se consigue un efecto contraproducente, aumentando el peso y provocando más esfuerzos en las uniones, la parte más crítica.
- Se ha llegado a la solución siguiendo un diseño modular. Para ello se han identificado los problemas estructurales fuentes de error (uniones flexibles, flexión de los pilares y flexión pura debido al peso propio) y se han definido las diferentes partes físicas a las que afectaban. El tratamiento de cada uno de estos módulos ha sido independiente. De esta manera se ha conseguido un proceso más limpio y con una buena trazabilidad para poder corregir cambios en caso de no haber avanzado en la dirección deseada.
- La solución final cumple lo marcado en el capítulo de objetivos; se tienen unas deformaciones máximas de 0.243 y unas deformaciones relativas de 0.138. Por otra parte, los ahorros de peso en acero y de cordones de soldadura han sido de 18.8% y 31.6% respecto del punto de partida.
- El presupuesto del proyecto asciende a 18.566,73 € habiéndose tomado una partida del 5% para imprevistos.
- Si bien es cierto que el contexto de cada problema influye profundamente en las acciones correctivas que se toman, estamos ante un proceso de diseño basado en ensayo y error. El hecho de no haber abordado el problema de diseño con las herramientas adecuadas y el rigor que requiere provoca un amplio retraso en la entrega del proyecto, pérdida de tiempo y un gasto económico extra. Si se hubieran tomado las medidas (ya no preventivas, sino correctivas) adecuadas, el trabajo habría salido adelante sin mucha más dilación. Se extrae, por tanto, la conclusión de que un trabajo riguroso termina siendo más rentable que el mencionado ensayo y error.

En cuanto a mi experiencia en el plano personal, en general ha sido un proyecto realmente interesante y gratificante que me ha servido como prueba de la importancia de tener las ideas claras y la buena organización, tanto a nivel conceptual como en la gestión del tiempo.

## 12. REFERENCIAS

---

- [1] J. C. Fariñas, «FUNCAS,» 2013. [En línea]. Available: [https://www.funcas.es/wp-content/uploads/Migracion/Articulos/FUNCAS\\_PEE/144art04.pdf](https://www.funcas.es/wp-content/uploads/Migracion/Articulos/FUNCAS_PEE/144art04.pdf).
- [2] CaixaBank, «Caixa,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.caixabankresearch.com/es/analisis-sectorial/industria/radiografia-industria-manufacturera-espanola>.
- [3] «Instituto Nacional de Estadística,» 2019. [En línea]. Available: [https://www.ine.es/prodyser/espa\\_cifras/2019/30/](https://www.ine.es/prodyser/espa_cifras/2019/30/).
- [4] «CIDUT- Technical tools,» 2021. [En línea]. Available: <https://cidut.es/es>.
- [5] G. Antolín, 2022. [En línea]. Available: <https://www.grupoantolin.com/>.
- [6] «Siemens Solid Edge,» 2021. [En línea]. Available: <https://solidedge.siemens.com/es/>. [Último acceso: 2022].
- [7] «ANSYS,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/products/ansys-workbench>. [Último acceso: 2022].
- [8] R. Arguelles, LA ESTRUCTURA METALICA HOY, Bellisco, 2015.
- [9] P. Martí, Análisis de Estructuras, SINTESIS, 2020.
- [10] L. Alacaráz, R. Ansola, J. Canales, J. Tárrago y E. Vegería, Cálculo elástico de sólidos, 2015.
- [11] H. Hertz, «Über die Berührung fester elastischer Körper,» *Journal für die reine und angewandte*, 1881.
- [12] C. Angulo, L. de Lacalle, J. Agirrebeitia y C. Pinto, Elementos de máquinas, 2016.
- [13] L. Alcaraz, R. Ansola, J. Tárrago, J. Canales y E. Vegería, Elasticidad y resistencia de materiales, 2015.