



Universidad Politécnica de Madrid

ESTRUCTURAS DE USO ESPACIAL

**Diseño y modelización de la
estructura de un microsatélite:
bandeja inferior**

Autores:

Inés Arauzo Andrés
Guillermo García del Río
Tomás Ley Oliver

Índice

1. Introducción	1
2. Enunciado	1
3. Iteración y solución	4
4. Conclusiones	8

Índice de figuras

2.1. Configuración ortogonal $\pm 45^\circ$	1
3.1. Secciones empleadas en las iteraciones.	4
3.2. Geometrías propuestas.	5
3.3. Primer modo propio y distribución de tensiones en la bandeja.	7

Índice de tablas

2.1. Características de la bandeja asignada.	1
2.2. Requisitos estructurales de la bandeja intermedia.	2
2.3. Aceleraciones en función de la dirección de aplicación.	2
2.4. Parámetros para el cálculo de los márgenes de seguridad.	3
3.1. Propiedades de los materiales propuestos para la bandeja.	4
3.2. Parametros de las iteraciones de la bandeja intermedia.	6
3.3. Parámetros de diseño de solución encontrada.	6
3.4. Propiedades de la bandeja final.	6

1. Introducción

En este informe se presenta el proceso de diseño e iteración llevado a cabo en *MSC PATRAN-NASTRAN* para el cumplimiento de los requisitos de frecuencias propias y factores de seguridad. En primer lugar se repasarán los requisitos, posteriormente se mostrará el proceso iterativo y se finalizará con la presentación de los resultados obtenidos.

2. Enunciado

Se ha de diseñar una bandeja cuadrada que corresponda a la bandeja inferior del microsatélite. Esta bandeja tendrá por tanto que soportar tanto una masa puntual correspondiente a los equipos que se sitúen sobre ella como una segunda masa que simule el peso del resto del satélite. Además, con el fin de modelizar la unión de la bandeja al sistema de separación, se han de incluir una serie de elementos *CBUSH* que simulen los tornillos. Las dimensiones de la bandeja, la masa de los equipos y del satélite y la configuración de los rigidizadores interiores ha sido asignada en función del grupo de trabajo, siendo la descrita en este informe la que se muestra en la Tabla 2.1 y Figura 2.1.

Tabla 2.1: Características de la bandeja asignada.

Configuración	Masa equipos [kg]	Masa estructura [kg]	Dimensiones [mm]
Ortogonal ($\pm 45^\circ$)	11	39.325	450 × 450

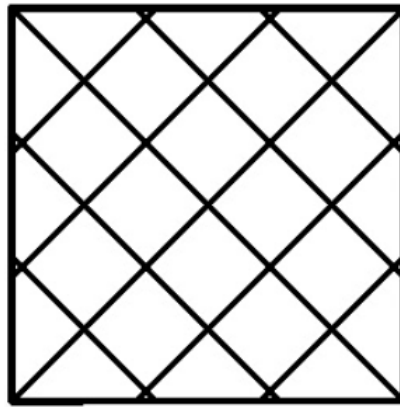


Figura 2.1: Configuración ortogonal $\pm 45^\circ$

Las masas puntuales especificadas en la Tabla 2.1 han de colocarse de la siguiente forma:

- La masa del equipo se modeliza igual que en el caso de la bandeja intermedia, esto es, colocando una masa puntual ubicada en el eje de simetría de la bandeja, a una distancia de 80 mm sobre la superficie. Para lograr la unión entre el equipo y la bandeja, se utiliza un elemento rígido RBE2, conectados a 4 puntos de la bandeja. Los puntos de conexión en la bandeja son seleccionados por cada grupo, siendo preferible que estén en el cruce de los rigidizadores.
- La masa del resto de la estructura se simula incluyendo una segunda masa puntual que representa la masa del resto del satélite (3 bandejas rigidizadas, 2 equipos, 4 paneles laterales

y 4 vigas en L) que se apoya sobre el contorno exterior de esta bandeja inferior mediante un elemento rígido RBE2. Esta segunda masa está situada en el eje central, a una distancia de 0.38 m con respecto al plano de la bandeja

El número de elementos *CBUSH* de la union adaptador-bandeja ha de oscilar entre 8 y 12, estando los nodos superiores de estos elementos situados en la bandeja y los inferiores a 20 mm de la misma. Sobre estos últimos nodos se aplican restricciones a los 6 grados de libertad

Los requisitos estructurales que debe de cumplir el diseño propuesto se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Requisitos estructurales de la bandeja intermedia.

Requisitos	Valores
Frecuencias propias	$f_n > 100$ Hz
Márgenes de seguridad en los principales análisis estructurales	$MoS_i > 0$

Los análisis que se deben realizar son los siguientes:

- Análisis de modos propios, para el cálculo de las frecuencias propias.
- Análisis estáticos (uno en cada eje), para el cálculo de los márgenes de seguridad de tensiones. Las aceleraciones utilizadas para los análisis estáticos en función de la dirección se muestra en la .

Tabla 2.3: Aceleraciones en función de la dirección de aplicación.

Dirección	Aceleración [g]
Lateral (paralelo a la bandeja)	50
Longitudinal (normal a la bandeja)	80

Para el cálculo de los márgenes de seguridad, se debe aplicar las fórmulas obtenidas de [1].

$$MoS_y = \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{VMmax} K_p K_m K_{LD} FOSY} \right) - 1, \quad (2.0.1)$$

$$MoS_u = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_{VMmax} K_p K_m K_{LD} FOSU} \right) - 1. \quad (2.0.2)$$

Todos los parámetros de estas ecuaciones se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Parámetros para el cálculo de los márgenes de seguridad.

Parámetro	Significado	Valor
K_p	Factor de proyecto	1.1
K_M	Factor del modelo	1.2
K_{LD}	Factor de diseño local	1.1
$FOSY$	Factor de seguridad del límite elástico	1.1
$FOSU$	Factor de seguridad de la carga última	1.25
σ_y	Límite elástico del material	Depende del material
σ_u	Resistencia última del material	Depende del material
σ_{VMmax}	Máxima tensión de Von Mises obtenido de un análisis determinado	Solución de cada análisis

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se debe determinar el diseño óptimo de la bandeja. Las variables que se deben variar para conseguir el diseño son:

- Cantidad y colocación de rigidizadores interiores (respetando la configuración mostrada en la Figura 2.1).
- Material.
- Espesor de la placa de la bandeja.
- Dimensiones de la sección rectangular de los rigidizadores exteriores.
- Diseño de la sección de los rigidizadores interiores y sus correspondientes dimensiones.

Como objetivo de la optimización de la bandeja intermedia, se debe conseguir cumplir con **al menos uno** de los siguientes criterios:

- La primera frecuencia propia se sitúe entre 100 y 125 Hz.
- El margen de seguridad para el valor máximo de tensión de Von Mises en el **caso de carga más crítico** se sitúe entre 0 y 0.5.

3. Iteración y solución

En primer lugar, se propusieron dos posibles materiales para la bandeja, Al-6061 y Ti64, cuyas propiedades se muestran en la Tabla 3.1. No obstante desde un principio la idea era hacer la bandeja de aluminio, cosa que, como se verá en las iteraciones no ha sido posible.

Tabla 3.1: Propiedades de los materiales propuestos para la bandeja.

Material	E [Pa]	σ_y [Pa]	ρ [kg/m ³]	ν [-]
Al 6061	$70 \cdot 10^9$	$55 \cdot 10^6$	2700	0.33
Ti 64	$1.138 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^8$	4430	0.342

Respecto a los rigidizadores, las secciones empleadas a lo largo de las iteraciones se muestran en la Figura 3.1. Destacar que en el caso de los rigidizadores exteriores se han empleado secciones cuadradas exclusivamente mientras que en los interiores se ha iterado bastante modificando el tipo de sección, aunque finalmente se ha implementado también una sección rectangular hueca.

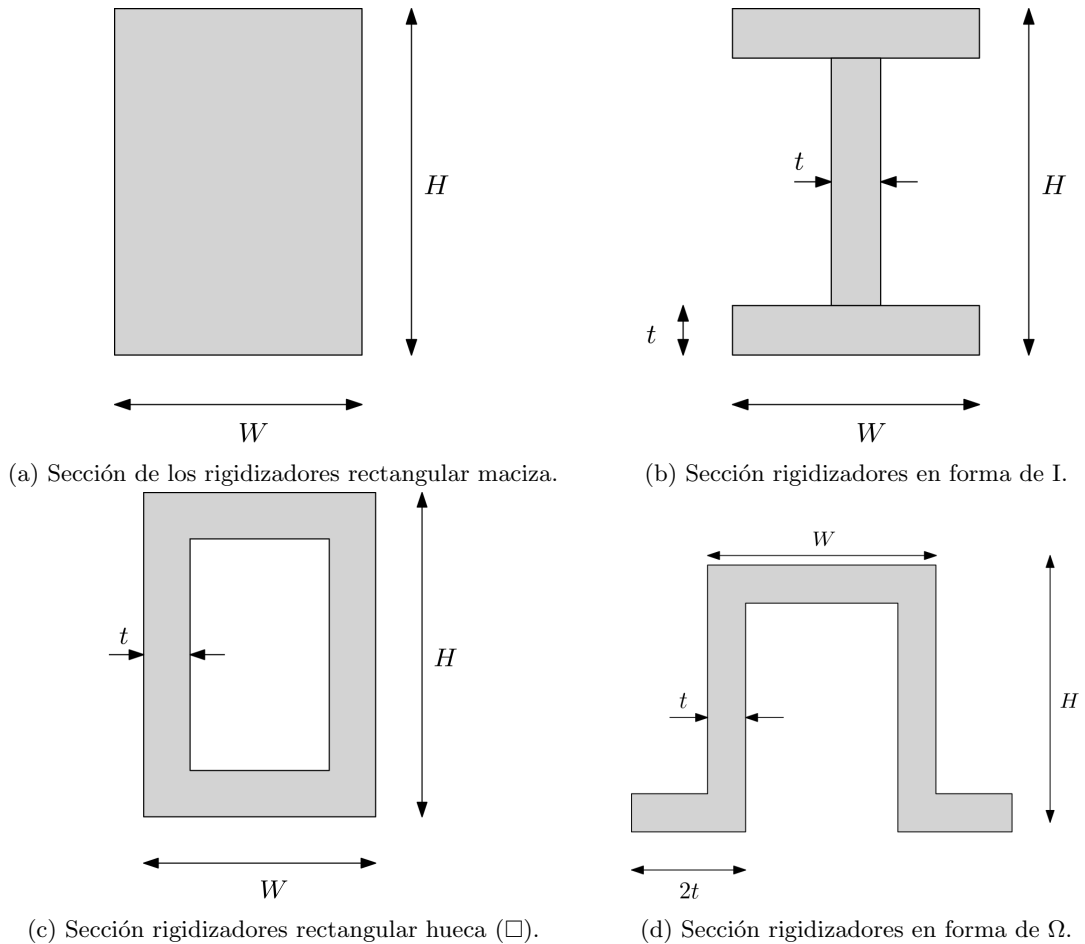
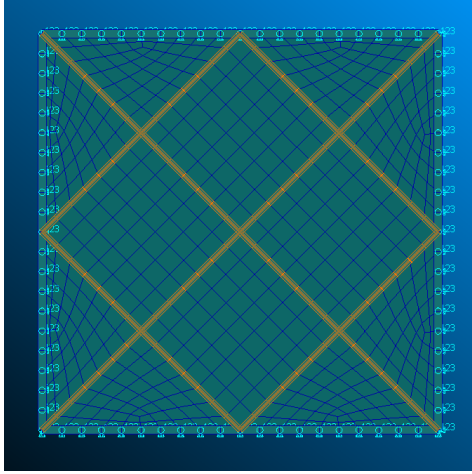


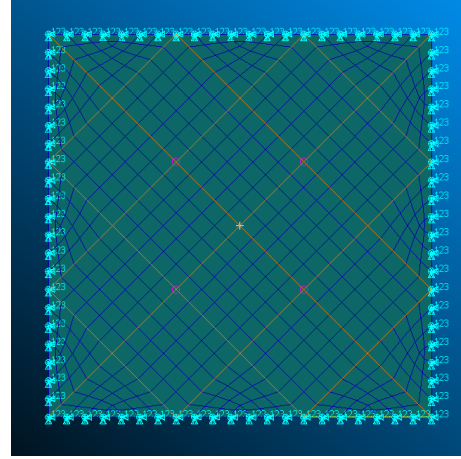
Figura 3.1: Secciones empleadas en las iteraciones.

El proceso iterativo se focalizó en la modificación del espesor de la bandeja y las dimensiones

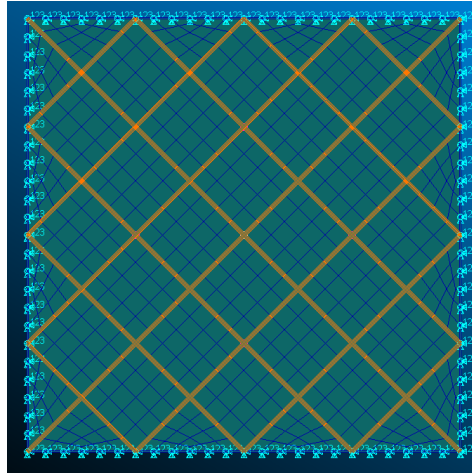
de los rigidizadores, tanto internos como externos, manteniendo fijo en un principio el número de rigidizadores. No obstante, tras varias iteraciones se determinó que con la disposición de rigidizadores propuesta era inviable cumplir los requisitos estructurales, por lo que se optó por aumentar el número de rigidizadores tal y como se muestra en la Figura 3.2.



(a) Primer número de rigidizadores propuesto.



(b) Segundo número de rigidizadores propuesto.



(c) Tercer y último número de rigidizadores propuesto.

Figura 3.2: Geometrías propuestas.

Con todo esto, en la Tabla 3.2 se muestra el proceso iterativo para esta bandeja hasta llegar al cumplimiento de ambos requisitos y la optimización de al menos uno de ellos. Además, muchas de las primeras iteraciones fueron llevadas a cabo en vano, ya que no se estaban comprobando todos los esfuerzos que se tenían que comprobar en la bandeja y sólo se estaban consultando los soportados por los elementos 2D.

Tabla 3.2: Parametros de las iteraciones de la bandeja intermedia.

It.	n_{rig}^o	t [m]	Material	Rig. Exterior [m]			Rig. Interior [m]				M [kg]	f_o [Hz]	$MOS_{y,lat}$	$MOS_{y,long}$
				W	H	Sección	H	W	t					
1	1	$3.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$9.50 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	I	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$7.00 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	2.58E+00	$2.80 \cdot 10^{+1}$	$-9.36 \cdot 10^{-1}$	$-9.03 \cdot 10^{-1}$	
2	1	2.00E+00	Al6061	$9.50 \cdot 10^{+1}$	$1.30 \cdot 10^{+1}$	I	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$8.00 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	2.03E+00	$2.49 \cdot 10^{+1}$	-	-	
3	1	$4.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	I	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$7.00 \cdot 10^{-3}$	$3.00 \cdot 10^{-3}$	3.13E+00	$3.39 \cdot 10^{+1}$	-	-	
4	1	$3.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$9.50 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	I	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$7.00 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	3.37E+00	$3.30 \cdot 10^{+1}$	-	-	
5	1	$4.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$9.50 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	I	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$7.00 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	3.67E+00	$3.54 \cdot 10^{+1}$	-	-	
6	1	$4.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$9.50 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	I	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$7.00 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	3.57E+00	$4.05 \cdot 10^{+1}$	-	-	
7	1	$4.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	I	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$7.00 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	3.27E+00	$4.10 \cdot 10^{+1}$	-	-	
8	1	$4.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	I	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$3.00 \cdot 10^{-3}$	3.97E+00	$5.52 \cdot 10^{+1}$	-	-	
9	1	$4.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	Ω	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$7.00 \cdot 10^{-3}$	$3.00 \cdot 10^{-3}$	4.67E+00	$5.56 \cdot 10^{+1}$	-	-	
10	1	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	Ω	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$7.00 \cdot 10^{-3}$	$3.00 \cdot 10^{-3}$	5.59E+00	$6.13 \cdot 10^{+1}$	-	-	
11	1	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$3.00 \cdot 10^{-3}$	2.58E+00	$6.86 \cdot 10^{+1}$	-	-	
12	1	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	$2.00 \cdot 10^{-2}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$3.00 \cdot 10^{-3}$	2.03E+00	$5.70 \cdot 10^{+1}$	-	-	
13	1	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	$2.00 \cdot 10^{-2}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$3.00 \cdot 10^{-3}$	3.13E+00	$7.81 \cdot 10^{+1}$	-	-	
14	1	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	$2.00 \cdot 10^{-2}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-3}$	3.37E+00	$8.14 \cdot 10^{+1}$	-	-	
15	1	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	$2.00 \cdot 10^{-2}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-3}$	3.67E+00	$7.90 \cdot 10^{+1}$	-	-	
16	1	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.50 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	$2.00 \cdot 10^{-2}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-3}$	3.57E+00	$8.14 \cdot 10^{+1}$	-	-	
17	1	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	2.25 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-3}$	3.27E+00	$8.72 \cdot 10^{+1}$	-	-	
18	1	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	2.50 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-3}$	5.59E+00	$9.52 \cdot 10^{+1}$	-	-	
19	1	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	2.60 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-3}$	2.58E+00	$9.84 \cdot 10^{+1}$	-	-	
20	2	$2.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	\square	1.20 · 10 ⁻²	$5.00 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	1.63E+00	7.34 · 10 ⁺¹	-	-	
21	2	$3.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	\square	1.30 · 10 ⁻²	$5.00 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	1.64E+00	1.34 · 10 ⁺²	$-9.87 \cdot 10^{-1}$	$-9.68 \cdot 10^{-1}$	
22	2	$2.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$5.00 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	\square	1.40 · 10 ⁻²	$5.00 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	1.14E+00	7.34 · 10 ⁺¹	-	$-9.86 \cdot 10^{-1}$	
23	2	$2.50 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$5.00 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	\square	1.40 · 10 ⁻²	$5.00 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	1.36E+00	1.02 · 10 ⁺²	$-9.91 \cdot 10^{-1}$	-	
24	2	$3.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$5.00 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	\square	1.00 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	1.36E+00	1.02 · 10 ⁺²	$-9.91 \cdot 10^{-1}$	-	
25	2	$4.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	1.50 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	3.91E+00	6.70 · 10 ⁺¹	$-8.19 \cdot 10^{-1}$	-	
26	2	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	1.50 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	4.00E+00	7.04 · 10 ⁺¹	-	-	
27	2	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	1.50 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	4.00E+00	7.04 · 10 ⁺¹	-	-	
28	2	$6.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	1.50 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	4.00E+00	7.58 · 10 ⁺¹	-	-	
29	3	$3.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	1.50 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	4.00E+00	8.96 · 10 ⁺¹	-	-	
30	3	$3.50 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	1.50 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	4.00E+00	9.33 · 10 ⁺¹	-	-	
31	3	$3.50 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.10 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-2}$	\square	1.60 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	4.00E+00	9.76 · 10 ⁺¹	-	-	
32	3	$3.50 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.10 \cdot 10^{-2}$	1.60 · 10 ⁻²	\square	1.60 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	4.36E+00	1.04 · 10 ⁺²	$-5.21 \cdot 10^{-1}$	-	
33	3	$3.50 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.60 \cdot 10^{-2}$	1.60 · 10 ⁻²	\square	1.60 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	4.81E+00	1.11 · 10 ⁺²	$-5.21 \cdot 10^{-1}$	-	
34	3	$4.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	1.60 · 10 ⁻²	\square	1.60 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	4.41E+00	1.03 · 10 ⁺²	$-4.26 \cdot 10^{-1}$	-	
35	3	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	1.60 · 10 ⁻²	\square	1.60 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	4.96E+00	1.12 · 10 ⁺²	$-3.45 \cdot 10^{-1}$	3.10 · 10 ⁻²	
36	3	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	1.60 · 10 ⁻²	\square	1.60 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	5.41E+00	1.36 · 10 ⁺²	$-1.28 \cdot 10^{-1}$	-	
37	3	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	2.00 · 10 ⁻²	\square	2.00 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	5.41E+00	1.36 · 10 ⁺²	$-1.28 \cdot 10^{-1}$	-	
38	3	$5.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	1.50 · 10 ⁻²	2.50 · 10 ⁻²	\square	2.50 · 10 ⁻²	1.50 · 10 ⁻²	2.00 · 10 ⁻³	6.52E+00	1.78 · 10 ⁺²	$-1.26 \cdot 10^{-1}$	-	
39	3	$1.00 \cdot 10^{-3}$	Al6061	$1.00 \cdot 10^{-2}$	2.00 · 10 ⁻²	\square	2.00 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	4.24E+00	1.42 · 10 ⁺²	$-5.53 \cdot 10^{-1}$	-	
40	3	$2.00 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$1.00 \cdot 10^{-2}$	2.00 · 10 ⁻²	\square	2.00 · 10 ⁻²	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$	2.72E+00	1.03 · 10 ⁺²	1.63 · 10 ⁻¹	1.25E+00	

Finalmente, tras un total de **40 iteraciones** se llegó a la solución con los parámetros mostrados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Parámetros de diseño de solución encontrada.

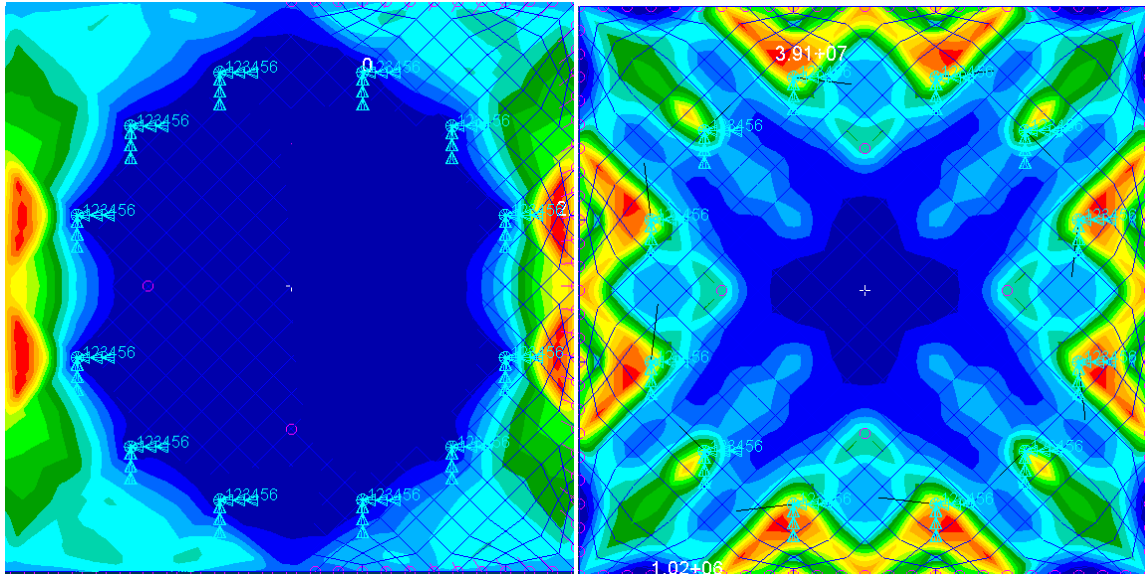
n_{rig}^o	Espesor [m]	Material	Rig. Exterior [m]		Rig. Interior [m]			
			H	W	Sección	H	W	t
3	$2 \cdot 10^{-3}$	Ti64	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	\square	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Con estos parámetros se ha conseguido optimizar la masa a la vez que se optimiza el criterio del margen de seguridad más critico, tal y como se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Propiedades de la bandeja final.

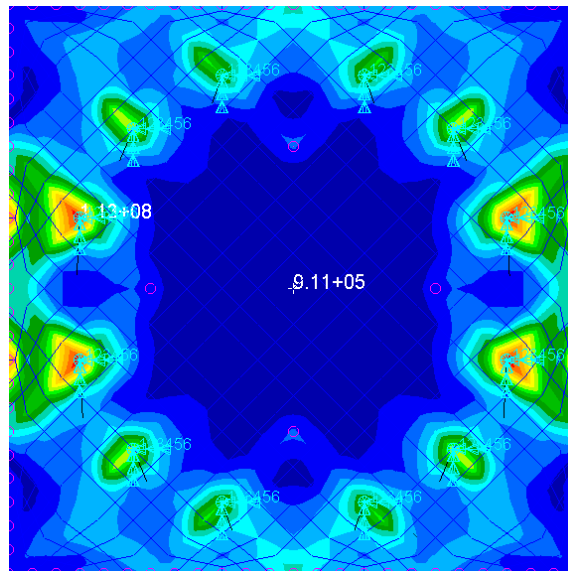
Masa [kg]	1 ^a f. propia [Hz]	$MOS_{y,long}$	$MOS_{y,lat}$
2.72	103.12	1.25	$1.63 \cdot 10^{-1}$

Cabe destacar que las mayores tensiones se han visto los ensayos laterales sobre los elementos placa cercanos a los laterales de la bandeja. En la Figura 3.3 se muestran el primer modo propio de la bandeja (Figura 3.3a) y la distribución de tensiones en estos casos mencionados (Figura 3.3b longitudinal y Figura 3.3c lateral) .



(a) Modo propio de respiración.

(b) Análisis estático longitudinal.



(c) Análisis estático lateral.

Figura 3.3: Primer modo propio y distribución de tensiones en la bandeja.

4. Conclusiones

Tras finalizar el proceso iterativo de esta bandeja se concluye que los esfuerzos que esta ha de soportar son considerablemente más elevados que en el caso de la bandeja intermedia y superior, por lo que es inviable hacerla de aluminio. Por otra parte, cabe destacar de nuevo la relevancia de la disposición y tamaño de los rigidizadores, que, tal y como se muestra en Tabla 3.2, permite disminuir el espesor de la bandeja según se aumenta la cantidad de rigidizadores.

Bibliografía

- [1] A. García Pérez y J. J. Fernández de Toro Espejel, *Manual de cálculo estructural*. Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva”.