



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

DISEÑO Y MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE UN MICROSATÉLITE

PRÁCTICA 2, PARTE 1
ESTRUCTURAS DE USO ESPACIAL

Autor: Daniel DEL RÍO VELILLA

Profesores: Elena ROIBÁS
Andrés GARCÍA
Alejandro GÓMEZ
Gustavo ALONSO

MADRID, 19 DE MAYO DE 2021

Índice

Índice de figuras	I
Índice de tablas	II
1. Introducción	1
2. Metodología	2
2.1. Parámetros de diseño	2
2.2. Metodología de diseño	3
2.3. Metodología de trabajo con Nastran-Patran	5
3. Resultados	8
3.1. Estudio paramétrico	8
3.2. Proceso de optimización	10
3.3. Bandeja final	12
3.3.1. Modelo FEM	12
3.4. Modos propios de la bandeja final	13
3.5. Análisis estático de la bandeja final	16
4. Conclusiones	18
Referencias	19

Índice de figuras

1.	Ejemplo de geometría.	1
2.	Geometría 1 (izda.). Geometría 2 (dcha). Dimensiones en milímetros.	4
3.	Dimensiones de rigidizador rectangular (izda.). Dimensiones de rigidizador en I (dcha).	4
4.	Modelo FEM de la Geometría 1 (izda.). Modelo FEM de la Geometría 2 (dcha).	6
5.	Organización de archivos dentro de la carpeta de un modelo.	7
6.	Variación porcentual de los resultados con el cambio de cada parámetro.	9
7.	Convergencia del proceso de optimización.	11
8.	Geometría final de la bandeja con rigidizadores en I.	12
9.	Modo 1, frecuencia de 168,79 Hz.	14
10.	Modo 2, frecuencia de 295.18 Hz.	15
11.	Visualización de tensiones para el análisis estático en el eje X.	16
12.	Visualización de tensiones para el análisis estático en el eje Y.	17
13.	Visualización de tensiones para el análisis estático en el eje Z.	17

Índice de tablas

1.	Valores de parámetros correspondientes a los márgenes de seguridad.	3
2.	Propiedades del Aluminio 7075-T6 [1].	4
3.	Propiedades del Titanio 6Al-4V [1], [2]	5
4.	Valores de los parámetros para la bandeja de refrecnia.	5
5.	Valor de parámetros en cada iteración.	9
6.	Valor de parámetros en cada iteración con rigidizadores interiores en I.	11
7.	Configuración geométrica de la bandeja final.	12
8.	Información sobre los elementos del modelo FEM.	13
9.	Modos propios obtenidos con el modelo FEM.	13
10.	Tensiones obtenidas en los ensayos estáticos.	16

1. Introducción

En este documento se presenta la realización de la Práctica 2, Parte 1 correspondiente a la asignatura Estructuras de uso Espacial del Máster Universitario de Sistemas Espaciales.

Su objetivo es realizar un proceso de diseño y optimización aplicado a la bandeja intermedia de un microsatélite, usando como referencia la estructura del *UPMSat – 2*, [3].

Esta bandeja servirá de soporte para los diversos equipos del satélite y deberá cumplir los siguientes requisitos geométricos y de diseño:

- Geometría cuadrada de 460 mm de lado.
- Rigidizadores de sección rectangular en el perímetro exterior.
- Rigidizadores interiores de configuración radial con octógonos interiores, Figura 1.
- Debe tener una masa de 12 kg localizada en el eje de simetría de la bandeja a una altura de 80 mm. Esta masa que representa a los equipos tendrá que fijarse a la bandeja en cuatro puntos.
- Primera frecuencia comprendida entre 150 y 175 Hz.
- Margen de seguridad para el valor máximo de tensión de Von Mises en el caso de carga más crítico esté situado entre 0 y 0.5.
- El objetivo de la optimización será conseguir una bandeja de la menor masa posible que cumpla con los requisitos anteriores.

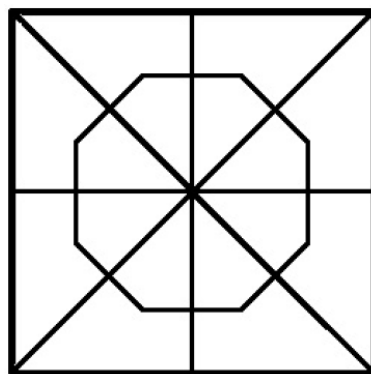


Figura 1: Ejemplo de geometría.

2. Metodología

2.1. Parámetros de diseño

Como se ha mencionado anteriormente, este trabajo consiste en un proceso de optimización cuyo objetivo es el de cumplir unos ciertos requisitos con la menor masa posible. Para llegar a esta masa mínima se irán variando una serie de parámetros de diseño hasta alcanzar la solución final.

Sin embargo, se han fijado una serie de invariantes de necesario cumplimiento y que, por lo tanto, serán siempre las mismas durante el proceso completo de diseño. Estos invariantes son las siguientes:

- La masa se va a unir a la estructura por elementos *RBE2* restringiendo los seis grados de libertad.
- Los puntos donde se unan los *RBE2* a la bandeja no van a cambiar durante el diseño.
- Las condiciones de contorno aplicadas sobre la bandeja no van a cambiar durante el proceso de diseño, siendo esta que la bandeja está simplemente apoyada en el perímetro exterior.
- Todas las bandejas van a ser sometidas a los mismos análisis de modos propios (primera frecuencia) y estáticos inerciales (tensión máxima de Von Mises), lateral de 50 g y longitudinal de 80 g.

Para el cálculo de los márgenes de seguridad se va a utilizar las siguientes expresiones extraídas de [1].

$$MoS_y = \left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_{VMmax} \times K_p \times K_M \times K_{LD} \times FOSY} \right) - 1, \quad (1)$$

$$MoS_u = \left(\frac{\sigma_U}{\sigma_{VMmax} \times K_p \times K_M \times K_{LD} \times FOSU} \right) - 1. \quad (2)$$

Dónde los valores de cada uno de los parámetros de las ecuaciones anteriores se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de parámetros correspondientes a los márgenes de seguridad.

Parámetro	Significado	Valor
K_P	Factor de proyecto	1,1
K_M	Factor de 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 [Pa]	Depende del material
σ_u	Resistencia última del material [Pa]	Depende del material
$\sigma_{VM\max}$	Máxima tensión de Von Mises obtenida	Solución de análisis

Una vez conocidos los invariantes del diseño se pasa a definir las propiedades y dimensiones que se van a poder modificar en el proceso de optimización:

- Cantidad y colocación de rigidizadores interiores.
- Material.
- Espesor de la bandeja.
- Dimensiones de la sección rectangular de los rigidizadores exteriores.
- Geometría de la sección y dimensiones de los rigidizadores interiores.

2.2. Metodología de diseño

La metodología de diseño seguida en el trabajo ha sido la siguiente:

1. Elección de dos disposiciones de rigidizadores diferentes. Las dos distribuciones de rigidizadores elegidas se pueden ver en la Figura 2.

En la Figura también se señalizan los puntos de unión del equipo con la bandeja además de las dimensiones de los octógonos interiores.

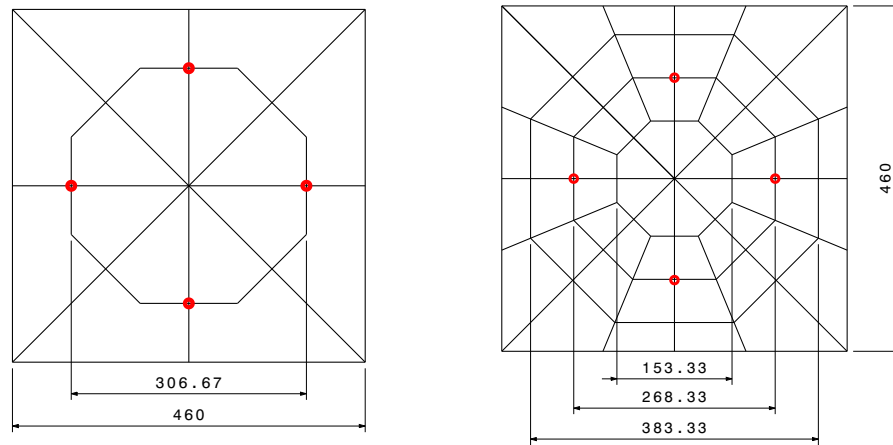


Figura 2: Geometría 1 (izda.). Geometría 2 (dcha). Dimensiones en milímetros.

2. Elección de dos posibles geometrías de rigidizadores interiores. Las secciones elegidas y sus dimensiones de diseño se pueden ver en la Figura 3.

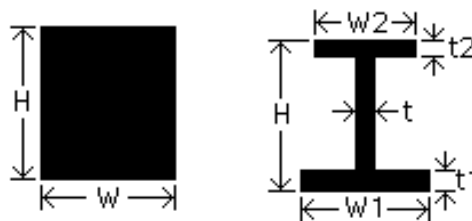


Figura 3: Dimensiones de rigidizador rectangular (izda.). Dimensiones de rigidizador en I (dcha).

3. Elección de dos materiales. Las propiedades de los dos materiales elegidos se pueden ver en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2: Propiedades del Aluminio 7075-T6 [1].

Material	Propiedad	Valor	Unidades
Al 7075-T6	Densidad	2800	kg/m ³
	Módulo de elasticidad	$7,1 \cdot 10^{10}$	Pa
	Coefficiente de Poisson	0,33	NA
	σ_y	$4,48 \cdot 10^8$	Pa
	σ_u	$5,23 \cdot 10^8$	Pa

Tabla 3: Propiedades del Titanio 6Al-4V [1], [2]

Material	Propiedad	Valor	Unidades
Ti 6Al-4V	Densidad	4430	kg/m ³
	Módulo de elasticidad	$1,1 \cdot 10^{10}$	Pa
	Coefficiente de Poisson	0,31	NA
	σ_y	$9,99 \cdot 10^8$	Pa
	σ_u	$1,103 \cdot 10^9$	Pa

4. Elección de parámetros iniciales para tener una bandeja de referencia. Se pueden ver los valores seleccionados en la Tabla 4, usando como guía [3].

Tabla 4: Valores de los parámetros para la bandeja de referencia.

Geometría	Material	Bandeja Espesor [mm]	Rigidizador exterior		Rigidizador interior		
			W [mm]	H [mm]	Sección	W [mm]	H [mm]
G1	Al	2	5	13	Rect	5	13

5. Comenzar el estudio paramétrico realizando un análisis por parámetro de diseño. En cada uno de estos análisis solo se variará un parámetro respecto a la bandeja de referencia y se realizará el análisis de modos propios y estático mencionado anteriormente. Para los parámetros geométricos se aumentará su valor en un 50 %.
6. Comparar la variación de la frecuencia, márgenes de seguridad y masa respecto a cada parámetro.
7. Una vez analizada la dependencia de los resultados respecto a cada parámetro se comenzará la optimización en base a los resultados obtenidos.
8. Tras alcanzar la configuración de bandeja óptima se procederá a una descripción detallada del modelo.

2.3. Metodología de trabajo con Nastran-Patran

El trabajo se ha realizado utilizando Nastran-Patran. El modelo de referencia de ambas geometrías se ha generado en Patran, sin embargo, durante todo el desarrollo de la práctica se han utilizado los ficheros *.bdf* para introducir las modificaciones en los parámetros de diseño.

También se ha utilizado Patran para visualizar los valores de tensión de Von Mises (Results → Fringe → Domine: None → Extrapolation: Centroid)

Los modelos FEM de referencia utilizados se pueden ver en la Figura 4.

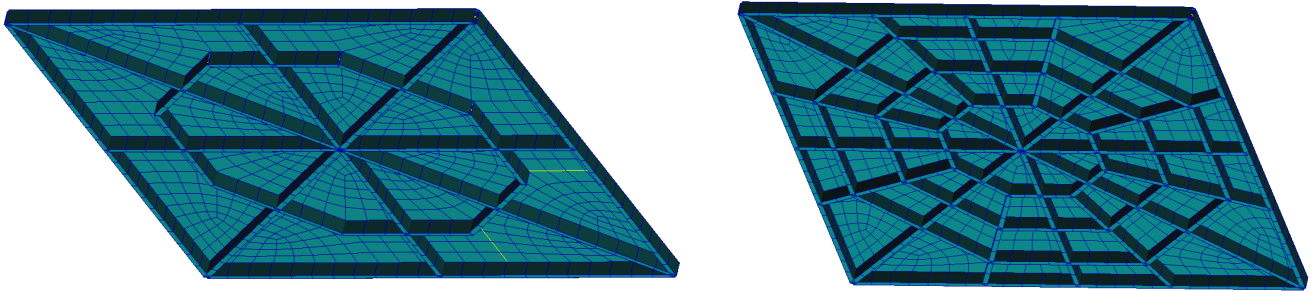


Figura 4: Modelo FEM de la Geometría 1 (izda.). Modelo FEM de la Geometría 2 (dcha).

Una vez se tienen los archivos *.bdf* de ambas geometrías, se han separado en los siguientes archivos:

- **Shell.bdf:** Contiene la propiedad de los elementos bidimensionales tipo *shell* y los nodos que forman la bandeja, con este archivo se modifica el espesor.
- **Rig_Ext.bdf:** Contiene la propiedad de los elementos unidimensionales tipo *beam* correspondiente a los rigidizadores exteriores y sus nodos. Con este archivo se modifican las dimensiones (H y W) de los rigidizadores exteriores.
- **Rig_Int.bdf:** Contiene la propiedad de los elementos unidimensionales tipo *beam* de los rigidizadores interiores junto a sus nodos. A través de este archivo se puede seleccionar tanto la geometría de los rigidizadores interiores como sus dimensiones.
- **main.bdf:** Este archivo incluye los tres archivos anteriores, material del que está hecha la bandeja, la información correspondiente a la masa que simula los equipos y los elementos *RBE2* utilizados. Con este archivo se puede modificar el material del que está fabricada la bandeja.

Para realizar los cuatro análisis requeridos se han creado cuatro cabeceros diferentes. Estos cabeceros contendrán la información de las condiciones de contorno, siempre las mismas, y el código que configura el análisis, cambiará entre los cabeceros. Los cabeceros están en una carpeta individual dentro de la carpeta que contiene el archivo *main.bdf* y apuntan a este archivo.

Los nombres de los archivos son los siguientes:

- **Cabecero_Modos.bdf:** Contiene las condiciones de contorno, elementos *RBE2* y la configuración del análisis de modos propios.
- **Cabecero_Inercial_X.bdf:** Contiene las condiciones de contorno, elementos *RBE2* y la configuración del análisis de estático inercial en dirección del eje X con una magnitud de 50 g.
- **Cabecero_Inercial_Y.bdf:** Contiene las condiciones de contorno, elementos *RBE2* y la configuración del análisis de estático inercial en dirección del eje Y con una magnitud de 50 g.

- ***Cabecero_Inercial_Z.bdf***: Contiene las condiciones de contorno, elementos *RBE2* y la configuración del análisis de estático inercial en dirección del eje X con una magnitud de 80 g.

Y su organización en el directorio se puede ver en la Figura 5.

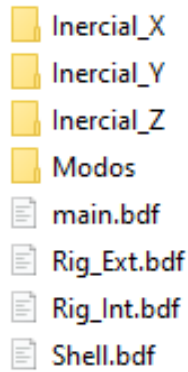


Figura 5: Organización de archivos dentro de la carpeta de un modelo.

Utilizando esta metodología de trabajo se tendrá una carpeta correspondiente a cada iteración de diseño en la que solo habrá que introducir los nuevos parámetros en el archivo *.bdf* correspondiente.

3. Resultados

3.1. Estudio paramétrico

Tras definir la metodología de trabajo y la estructura de carpetas se ha realizado el proceso de análisis paramétrico. Para ello se ha creado un modelo de referencia, *BA_Estudio_Ref*, y otros 8 modelos, *BA_Estudio_It_X*. Los parámetros geométricos se han variado en un 50 %.

Los cambios realizados y las propiedades de cada bandeja se pueden ver en la Tabla 5. Para la tensión de Von Mises solo se ha representado el valor máximo, que se ha dado siempre en los rigidizadores interiores, en las proximidades de la unión con los RBE2 de la masa, y en el análisis longitudinal.

La variación porcentual de los resultados respecto al modelo de referencia se ha representado en la Figura 6. En ella se observa de forma visual como afecta la variación de los parámetros a cada uno de los objetivos de diseño.

En esta figura se observa que el parámetro que más afecta a la masa es el espesor de la bandeja, ya que un aumento del 50 % en el espesor aumenta la masa aproximadamente un 150 %. Se podría reducir la masa reduciendo el espesor, pero reducirlo mucho puede complicar el proceso de fabricación, por lo que se va a fijar su límite inferior en 2 mm.

También se observa que variar la dimensión del rigidizador exterior afecta poco al diseño. Sin embargo, el rigidizador interior si que tiene un gran impacto sobre los resultados, aumentando en gran proporción los márgenes de seguridad y no tanto la masa. A su vez, se aprecia que el cambio de geometría de los rigidizadores interiores en forma de I hace disminuir la masa, frecuencia y márgenes.

El material del que está fabricada la bandeja afecta mucho a los márgenes de seguridad, siendo mucho mayores cuando la bandeja está fabricada con titanio, ya que sus tensiones máximas son superiores a las del aluminio. Por otro lado, al tener mayor densidad también aumenta la masa total de la bandeja.

Finalmente, se tiene que con la segunda geometría no se consigue una relación aumento de márgenes/aumento de masa favorable frente a la geometría simple, incluso disminuye el valor de la primera frecuencia.

Tabla 5: Valor de parámetros en cada iteración.

Iteración	Geometría	Material	Bandeja Espesor [mm]	Rigidizador exterior		Rigidizador interior			Resultados				
				W [mm]	H [mm]	Sección	W [mm]	H [mm]	Masa [kg]	Frec. [Hz]	$\sigma_{VM\max}$ [Pa]	MoS _y	MoS _u
Ref	G1	Al	2	5	13	Rect	5	13	2,11	122,06	$4,96 \cdot 10^8$	-0,32	-0,30
1	G1	Ti	2	5	13	Rect	5	13	3,06	148,10	$5,23 \cdot 10^8$	0,43	0,48
2	G1	Al	3	5	13	Rect	5	13	4,70	133,2	$4,37 \cdot 10^8$	-0,23	-0,21
3	G1	Al	2	7,5	13	Rect	5	13	2,28	123,7	$4,37 \cdot 10^8$	-0,30	-0,28
4	G1	Al	2	5	19,5	Rect	5	13	2,27	123,4	$4,83 \cdot 10^8$	-0,32	-0,30
5	G1	Al	2	5	13	Rect	7,5	13	2,40	142,8	$4,86 \cdot 10^8$	-0,05	-0,02
6	G1	Al	2	5	13	Rect	5	19,5	2,40	195,5	$3,56 \cdot 10^8$	0,31	0,35
7	G1	Al	2	5	13	I [t = 2 mm]	10	13	2,05	120	$7,16 \cdot 10^8$	-0,29	-0,27
8	G2	Al	2	5	13	Rect	5	13	2,65	113	$4,12 \cdot 10^8$	-0,20	-0,18

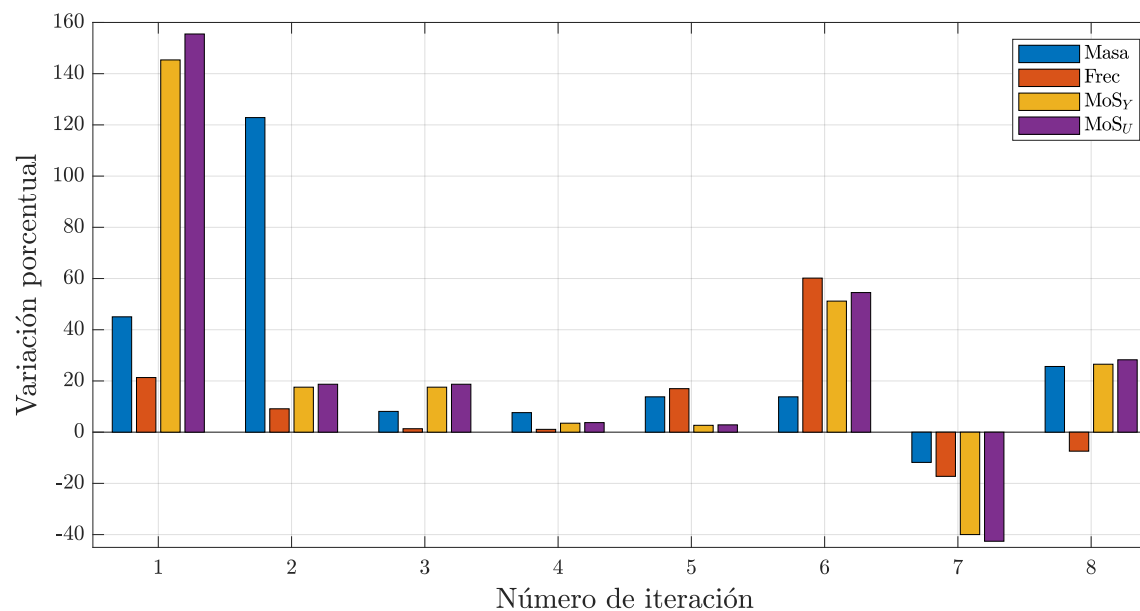


Figura 6: Variación porcentual de los resultados con el cambio de cada parámetro.

3.2. Proceso de optimización

Una vez analizados los resultados del estudio paramétrico se van a tomar una serie de decisiones para comenzar el proceso de optimización.

- El valor mínimo de espesores se fija en 2 mm. Esto aplica tanto a la bandeja como a los rigidizadores para evitar posibles problemas en la fabricación.
- La geometría 2 ha sido descartada ya que no aportaba una mejora de rigidez frente a la 1 y aumentaba masa y complejidad.
- La sección elegida para los rigidizadores interiores es la geometría en I. Esta decisión se ha tomado ya que ha sido el único parámetro que ha disminuído la masa y se puede compensar la caída del resto de propiedades aumentando su altura.
- En los rigidizadores interiores se va a considerar $W = W_1 = W_2$ y $t = t_1 = t_2$, Figura 3.
- Los rigidizadores interiores y exteriores tendrán la misma altura.
- La utilización de titanio ha sido descartada. Esta decisión se debe a que el parámetro que más afecta a la masa es el espesor de la bandeja, Figura 6. Para el valor mínimo de espesor permitido, 2 mm, la masa de la bandeja para el aluminio es de 1,185 kg y para titanio de 1,875 kg. Por lo tanto, al ser el valor mínimo tan superior en el titanio hace poco probable el que, al añadir los rigidizadores, se consiga una masa inferior al aluminio.

Tras comentar las decisiones tomadas observando los resultados del estudio paramétrico, se puede proceder al proceso final de optimización.

Los parámetros utilizados se pueden ver en la Tabla 6 y la convergencia en la Figura 7.

Tabla 6: Valor de parámetros en cada iteración con rigidizadores interiores en I.

Iteración	Geometría	Material	Bandeja Espesor [mm]	Rigidizador exterior		Rigidizador interior			Resultados				
				W [mm]	H [mm]	t [mm]	W [mm]	H [mm]	Masa [kg]	Frec. [Hz]	σ_{VMmax} [Pa]	MoSy	MoSu
1	G1	Al	2	5	20	2	10	20	2,35	183	$2,64 \cdot 10^8$	0,06	0,09
2	G1	Al	2	5	20	2	9	20	2,32	179	$2,81 \cdot 10^8$	-0,00	0,03
3	G1	Al	2	5	18	2	10	18	2,27	165	$3,05 \cdot 10^8$	-0,08	-0,06
4	G1	Al	2	5	20	1,8	10	20	2,29	176	$2,84 \cdot 10^8$	-0,01	0,01
5	G1	Al	2	5	20	2	12	18	2,37	171	$2,71 \cdot 10^8$	0,04	0,06
6	G1	Al	2	2	18	2	18	18	2,07	168	$2,79 \cdot 10^8$	0,01	0,03

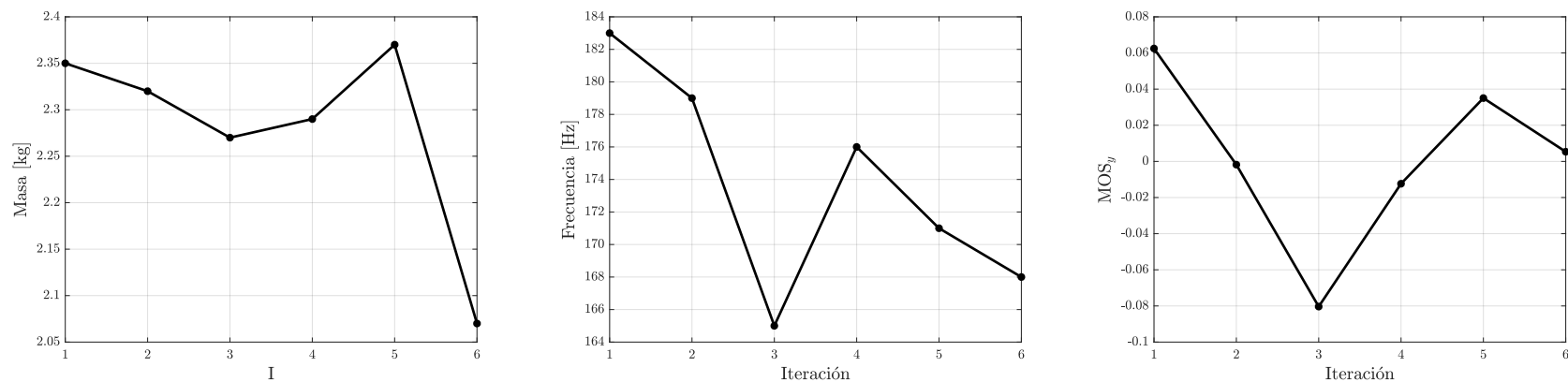


Figura 7: Convergencia del proceso de optimización.

3.3. Bandeja final

A continuación se va a describir el modelo FEM usado durante todo el proceso de optimización y los resultados de los análisis realizados en el modelo final.

3.3.1. Modelo FEM

1. Pre/Post Procesador del código FEM

Los programas utilizados para realizar el estudio han sido MSC PATRAN 2020 Student Edition y MSC NASTRAN 2020 Student Edition.

2. Asunciones e idealizaciones

Se han utilizado elementos bidimensionales tipo *shell*, *Quad4*, para modelar la bandeja. Por otro lado, para modelar los rigidizadores se ha optado por elementos unidimensionales tipo viga, *Bar2*.

El equipo que irá unido a la bandeja se ha modelado como un elemento cero-dimensional al que se le ha asignado la propiedad *masa*. Este se ha unido a la bandeja en cuatro puntos coincidentes con la intersección de rigidizadores mediante elementos rígidos *RBE2* restringiendo los seis grados de libertad.

3. Geometría

La geometría del modelo en Patran se puede ver en la Figura 8.

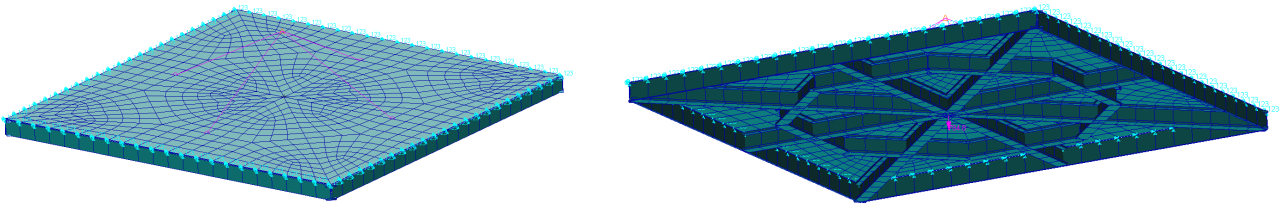


Figura 8: Geometría final de la bandeja con rigidizadores en I.

Los valores de los parámetros geométricos del modelo se puede ver en la Tabla 7

Tabla 7: Configuración geométrica de la bandeja final.

Geometría	Material	Bandeja	Rigidizador exterior		Rigidizador interior				Masa [kg]
		Espesor [mm]	W [mm]	H [mm]	Sección	t [mm]	W [mm]	H [mm]	
G1	Al	2	2	18	I	2	18	18	2,07

4. Cargas y condiciones de contorno

Las condiciones de contorno aplicadas han sido: contorno de la bandeja simplemente aplicado, restricción de los grados de libertad de desplazamiento en los nodos del perímetro exterior, como se puede ver en la Figura 8. Para el análisis de modos propios no ha sido necesaria la aplicación de ninguna carga. Sin embargo, para los análisis estáticos inerciales se han aplicado en direcciones X e Y una aceleración de 50 g y en Z de 80 g.

5. Material y propiedades

El material utilizado para la bandeja como para los rigidizadores es Al-7075 (Tabla 2). Los elementos utilizados en el modelo han sido *Quad4* bidimensionales para la bandeja, *Bar2* unidimensionales para los rigidizadores y un elemento *masa* puntual para representar la masa del equipo. Los elementos que tienen asociadas estas propiedades se pueden ver en la Tabla 8.

Tabla 8: Información sobre los elementos del modelo FEM.

Propiedad	Tipo	Espesor [mm]	Masa [kg]	Representa	Rango num.
Masa	Point	N/A	12	Equipo	1
1D_Beam_Int	Bar2	Tabla 8	N/A	Rigidizador interior	1000 - 1163
1D_Beam_Ext	Bar2	Tabla 8	N/A	Rigidizador exterior	1200 - 1287
2D_Shell	Quad4	2	N/A	Bandeja	2000 - 2783

3.4. Modos propios de la bandeja final

Una vez generado el modelo en Patran se procede a presentar los resultados obtenidos con Nastran para el análisis de modos propios. Los valores de las diez primeras frecuencias se pueden ver en la Tabla 9 y la representación de las dos primeras en las Figuras 9 y 10.

Tabla 9: Modos propios obtenidos con el modelo FEM.

Modo	Frecuencia [Hz]	Modo	Frecuencia [Hz]
1	168,79	6	924,10
2	295,18	7	936,96
3	295,18	8	945,10
4	900,56	9	953,99
5	924,10	10	955,86

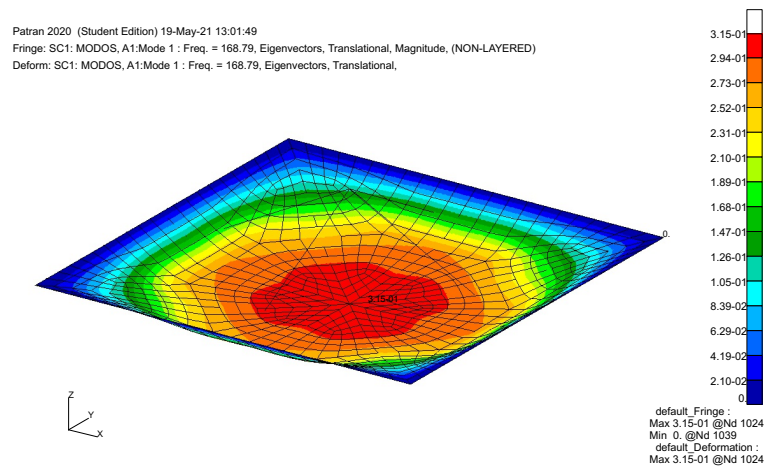
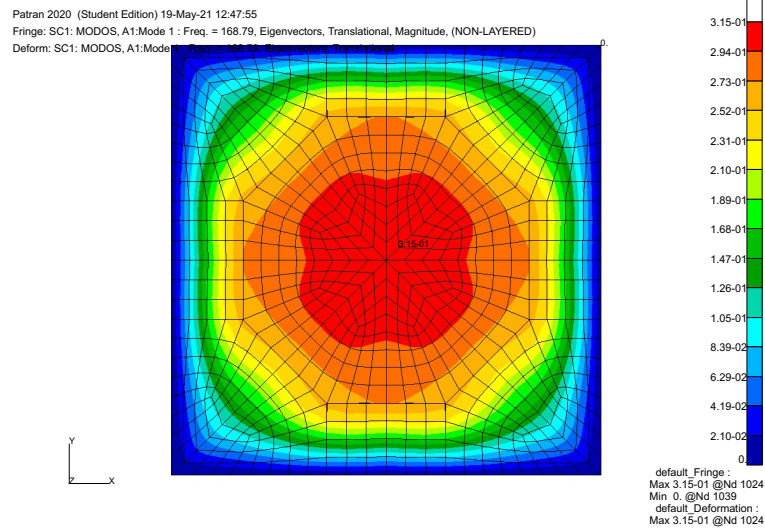
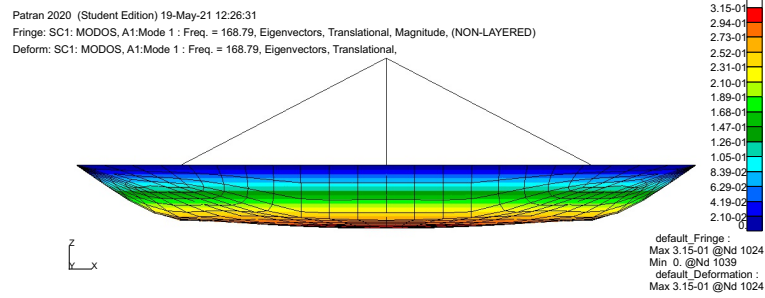


Figura 9: Modo 1, frecuencia de 168,79 Hz.

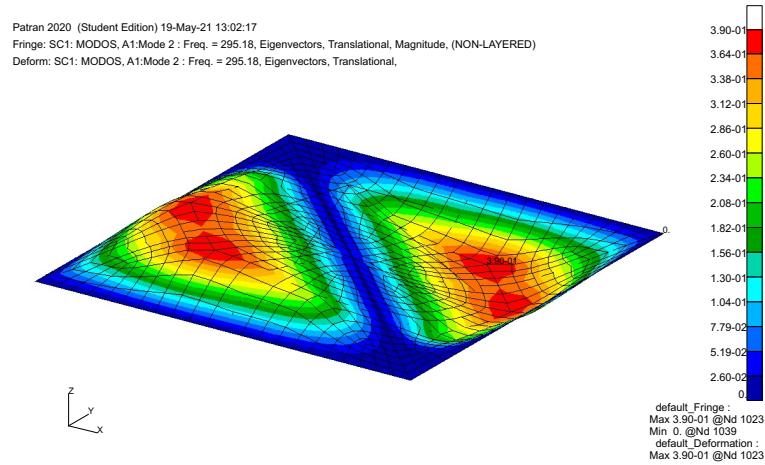
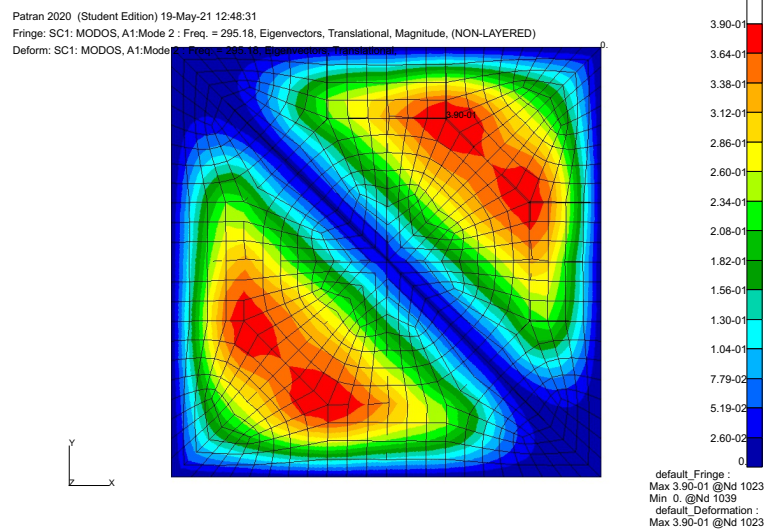
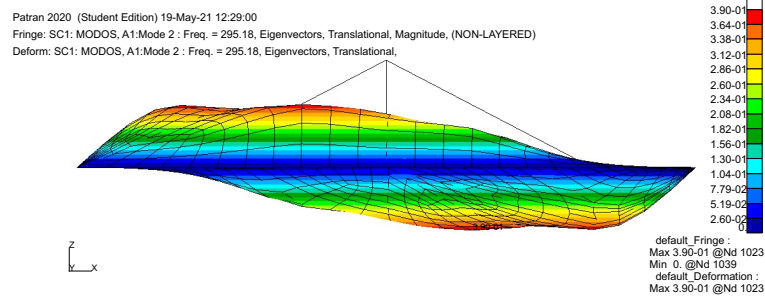


Figura 10: Modo 2, frecuencia de 295.18 Hz.

3.5. Análisis estático de la bandeja final

Tras realizar el análisis estático sobre el diseño final de la bandeja se presentaran las tensiones para cada una dirección en la Tabla 10. Por otro lado, se puede ver la distribución de tensiones en las Figuras 11, 12 y 13.

Tabla 10: Tensiones obtenidas en los ensayos estáticos.

Dirección	Magnitud [g]	$\sigma_{VMshell}$ [Pa]	$\sigma_{VMbar-min}$ [Pa]	$\sigma_{VMbar-max}$ [Pa]
X	50	$3,33 \cdot 10^7$	$5,71 \cdot 10^6$	$1,14 \cdot 10^8$
Y	50	$3,33 \cdot 10^7$	$5,71 \cdot 10^6$	$1,14 \cdot 10^8$
Z	80	$4,46 \cdot 10^7$	$1,46 \cdot 10^7$	$2,79 \cdot 10^8$

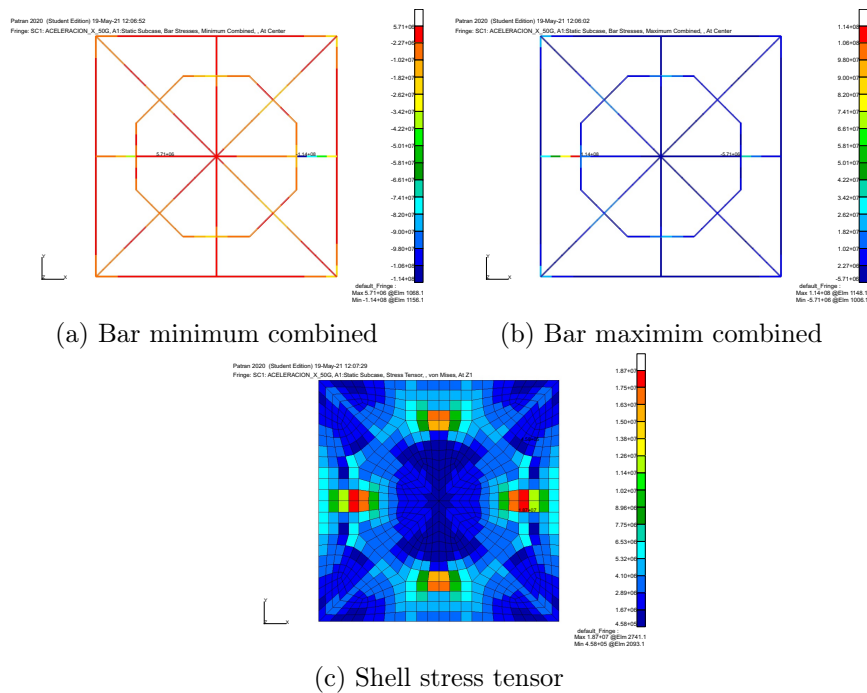


Figura 11: Visualización de tensiones para el análisis estático en el eje X.

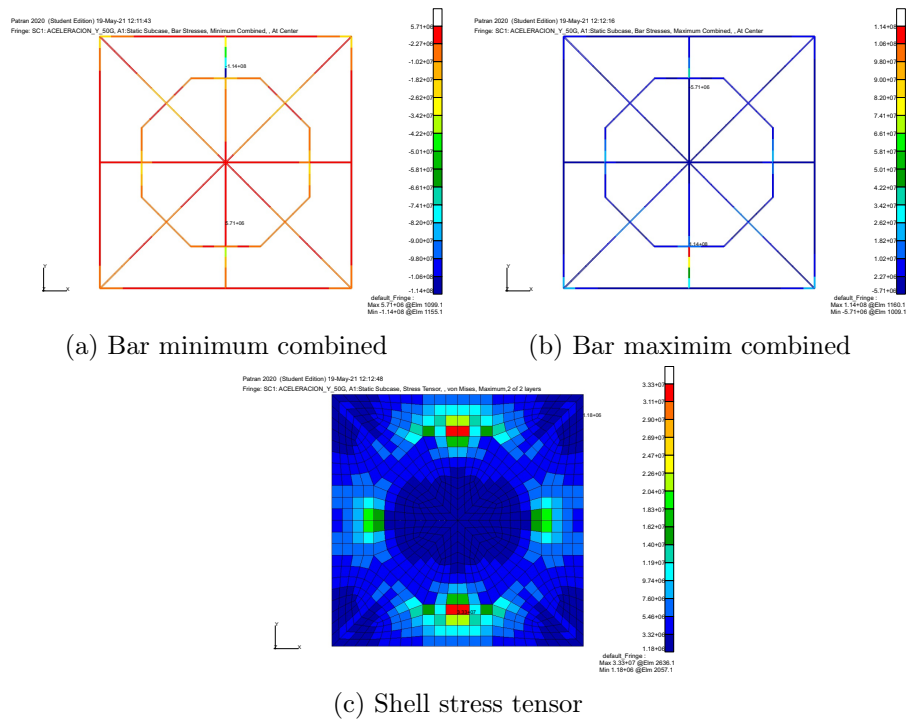


Figura 12: Visualización de tensiones para el análisis estático en el eje Y.

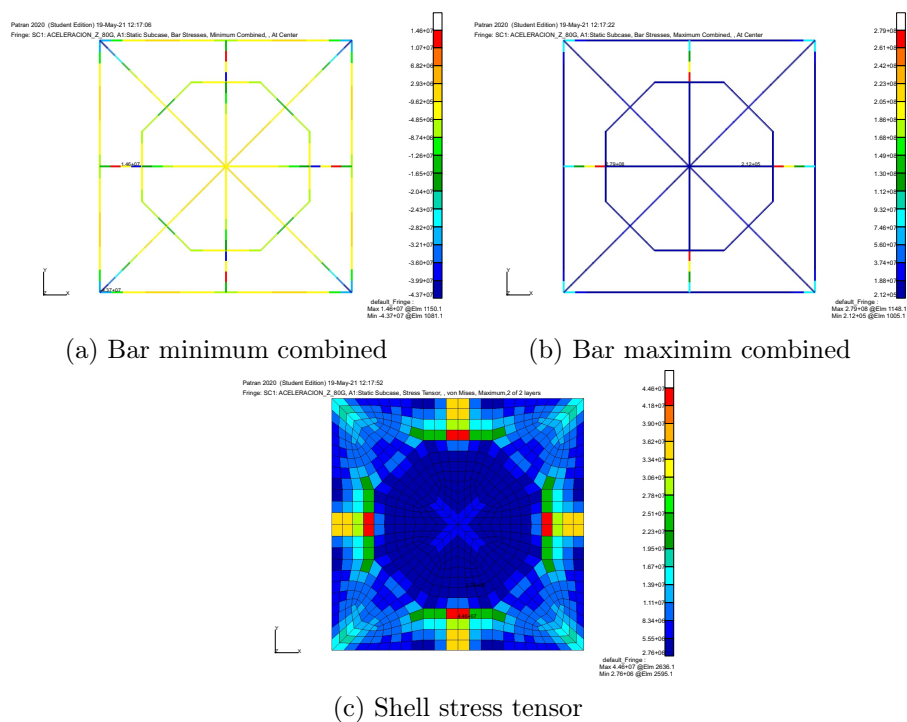


Figura 13: Visualización de tensiones para el análisis estático en el eje Z.

4. Conclusiones

Una vez completado el proceso de optimización obteniendo una bandeja que cumple tanto el requisito de frecuencia y márgenes para una masa mínima y presentados los resultados de los análisis pertinentes, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- La estricta organización de carpetas, junto a la separación del modelo en distintos archivos *.bdf* ha permitido que el proceso de estudio paramétrico y optimización se realice de forma eficiente y minimizando la posibilidad de errores humanos.
- La modificación del modelo por medio del archivo *.bdf* hace que el proceso de optimización sea más rápido que a través de la interfaz gráfica de Patran, sin embargo, es necesario seguir siempre la misma metodología a la hora de realizar estas modificaciones.
- El realizar un estudio paramétrico antes del proceso de optimización ha permitido tomar unas decisiones previas, basadas en los resultados del estudio, que después han ayudado a que la optimización converja en pocas iteraciones.
- Ha sido importante elegir límites inferiores de los parámetros geométricos para acotar la optimización.
- Como se había supuesto, el valor de la bandeja óptima en aluminio es solo un 10,4% superior al peso sin rigidizadores de la bandeja de titanio de mínimo espesor. Por lo tanto se puede decir que ha sido una decisión acertada el descartar la opción de titanio.

Referencias

- [1] A. García, J. J. Fernández, Manual de cálculo estructural.
- [2] U.S. Titanium Inc., Properties: Titanium Alloys - Ti6Al4V Grade 5 (2012).
URL <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1547>
- [3] A. García, J. J. Fernández, Manual de Cálculo Estructural, 1ª Edición, Parte 2, Anexos. 1 (2005)
1–87.