



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

PRÁCTICA 2.1: DISEÑO Y MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE UN MICROSATÉLITE.

ESTRUCTURAS DE USO AEROESPACIAL

Autora: María Elena Piqueras Carreño

Profesor: Elena Roibás
Andrés García
Alejandro Gómez

MADRID, 19 DE MAYO, 2021

Resumen

Se va a llevar a cabo el diseño y optimización de la bandeja inferior de un microsatélite de forma que se cumplan con los criterios estructurales y de optimización establecidos.

Índice

Índice de figuras	I
Índice de tablas	III
1. Introducción	1
1.1. Requisitos de diseño	2
1.2. Requisitos estructurales	2
2. Dimensionamiento de la bandeja	4
2.1. Descripción de la bandeja.	4
2.1.1. Descripción de las distintas opciones	5
2.2. Resultados de los análisis sobre la bandeja	7
2.2.1. Proceso de optimización y comparación de resultados	12
2.2.2. Modos propios de la elección final	19
2.2.3. Análisis estático de la elección final	20
3. Conclusiones	25
A. Metodología Patran-Nastran	26
B. Cabecero Estático	28
Referencias	29

Índice de figuras

1.	Representación de la configuración geométrica.	1
2.	Representación masas.	4
3.	Representación de los CBUSH.	5
4.	Rigidizador sección en I (izda.). Rigidizador sección rectangular (dcha.).	6
5.	Geometría 1(G1) (izda.). Geometría 2 (G2) (dcha.).	6
6.	Sensibilidad del modelo en función del parámetro modificado para la bandeja G1, con rigidizadores interiores con sección rectangular y de aluminio 7075	9
7.	Sensibilidad del modelo en función del parámetro modificado para la bandeja G1, con rigidizadores interiores con sección en I y de Ti 6al-4V	10
8.	Sensibilidad del modelo en función del parámetro modificado para la bandeja G2, con rigidizadores interiores con sección en I y de Al 7075	11
9.	Representación de la convergencia de la últimas iteraciones realizadas para la bandeja G1 de aluminio y rigidizadores interiores en I.	15
10.	Geometría final de la bandeja.	17
11.	Modelización de los equipos y de la masa del satélite.	18
12.	Modelización de la unión con el separador.	18
13.	Representación Modo 1 ($f = 150,93$ Hz)	19
14.	Representación Modo 2($f = 150,93$ Hz)	20
15.	Representación Modo 3 ($f = 394,69$ Hz)	20
16.	Visualización Shell Stress Tensor para el análisis estático en la dirección X	21
17.	Visualización Bar Stress Maximum Combined (izda.) y Bar Strss Minimum Combined (dcha.) para el análisis estático en la dirección X.	22
18.	Visualización Shell Stress Tensor para el análisis estático en la dirección Y	22
19.	Visualización Bar Stress Maximum Combined (izda.) y Bar Strss Minimum Combined (dcha.) para el análisis estático en la dirección Y.	23
20.	Visualización Shell Stress Tensor para el análisis estático en la dirección Z	23
21.	Visualización Bar Stress Maximum Combined (izda.) y Bar Strss Minimum Combined (dcha.) para el análisis estático en la dirección Z.	24
22.	Organización de directorios y archivos . <i>pdf</i>	27

23. Modificación del cabecero de estático para el Análisis de la bandeja	28
--	----

Índice de tablas

1.	Dimensiones de la bandeja y masa de los equipos	1
2.	Análisis Estático	2
3.	Valores de parámetros correspondientes a los márgenes de seguridad.	3
4.	Requisitos Estructurales	3
5.	Criterios de optimización	3
6.	Propiedades del aluminio 7075-T6 [1].	5
7.	Propiedades del Titanio 6Al-4V [1], [2]	5
8.	Medidas iniciales de referencia utilizadas como punto de partida para la iteración (Rigidizador interior de sección rectangular, G1 y Al-7075).	6
9.	Medidas iniciales de referencia utilizadas como punto de partida para la iteración (Rigidizador interior en I, G1 y Ti-6Al-4V).	7
10.	Medidas iniciales de referencia utilizadas como punto de partida para la iteración (Rigidizador interior en I, G2 y Al-7075).	7
11.	Estudio de la sensibilidad de cada parámetros para la bandeja G1, con rigidizadores con sección rectangular y Al-7075.	9
12.	Estudio de la sensibilidad de cada parámetros para la bandeja G1, con rigidizadores interiores con sección I y de Ti 6Al-4V.	10
13.	Estudio de la sensibilidad de cada parámetros para la bandeja G2, con rigidizadores en I y de Al-7075.	11
14.	Resultados optimizados alcanzados para la bandeja G1 y con rigidizadores de sección rectangular en función del material.	14
15.	Resultados optimizados alcanzados para la bandeja G1 y con rigidizadores de sección I en función del material.	14
16.	Resultados optimizados alcanzados para la bandeja G2 y con rigidizadores de sección I para el Aluminio.	14
17.	Estudio de la convergencia para la bandeja G1 con Al-7075 y rigidizadores en I.	15
18.	Bandeja seleccionada tras el proceso de iteración	16
19.	Propiedades del aluminio 7075-T6 [1].	16
20.	Bandeja seleccionada tras el proceso de iteración	17
21.	Modelo FEM	19

22.	Frecuencias obtenidas del análisis de modos propios de la bandeja.	19
23.	Resultado del análisis estático para cada uno de los ejes.	21

1. Introducción

Esta práctica consiste en el diseño de la bandeja de un microsatélite de forma que con la combinación de los diferentes parámetros de diseño se cumplan los requisitos estructurales y las condiciones impuestas, minimizando la masa estructural lo máximo posible. En concreto, nuestro grupo de trabajo partía de la configuración geométrica radial más octógonos representada en la Figura 1. Las dimensiones de la bandeja y la masa permanecerán constantes y están recogidos en la Tabla 1. Además, los rigidizadores exteriores tienen que ser de sección rectangular.

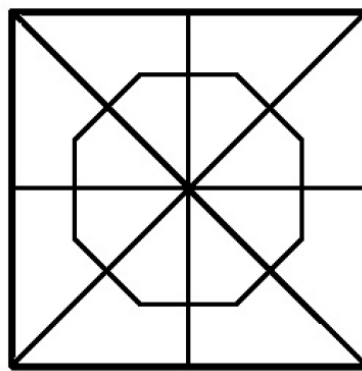


Figura 1: Representación de la configuración geométrica.

Tabla 1: Dimensiones de la bandeja y masa de los equipos

Masa Equipos [kg]	12
Dimensiones bandeja [mm]	460×460

El material empleado, la sección de los rigidizadores así como el diseño de la geometría no es fija, y por tanto, serán los parámetros de diseño utilizados para optimizar la bandeja. Además, concretamente, este informe se centra en el diseño y optimización de la bandeja inferior. Como referencia se han tomado las dimensiones iniciales de la bandejas del UPMSat-2.

A la hora de diseñar la bandeja, se escogieron para ambas bandejas, tanto la intermedia como la inferior, los mismo parámetros de iteración, es decir, las mismas geometrías, materiales, y secciones de rigidizadores, partiendo, por tanto, para ambos diseños, de la misma bandeja, no obstante, como se mostrará posteriormente, los resultados finales obtenidos de optimización son diferentes. Para asegurar que ambas bandejas tiene el mismo mallado exterior, y por tanto, facilitar así la integración con el satélite completo que se realizará en la siguiente práctica, se ha decidido realizar el diseño conjunto de ambas bandejas, para después iterar de forma individual con cada uno de los parámetros escogidos.

Para poder entender mejor tanto la elección de parámetros utilizada como la metodología seguida a la hora de iterar con los mismos con Patran-Nastran, se va a introducir en primer lugar, los requisitos de diseño impuestos.

1.1. Requisitos de diseño

Variables de diseño a estudiar para conseguir el diseño óptimo:

- Cantidad y colocación de rigidizadores interiores siguiendo el esquema de la Figura 1.
- Material.
- Espesor de la bandeja.
- Dimensiones de la sección rectangular de los rigidizadores exteriores.
- Diseño y dimensiones de la sección de los rigidizadores interiores.

1.2. Requisitos estructurales

Los diferentes diseños de la bandeja se van a someter a dos tipos de análisis:

- Análisis de modos propios
- Análisis estático en cada eje para el cálculo de los márgenes de seguridad.

Tabla 2: Analisis Estático

Dirección	Aceleración (g)
Lateral	50
Longitudinal	80

A la hora de calcular los valores de los márgenes de seguridad se han utilizado las siguiente expresiones extraídas del Manual de Cálculo [1]:

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

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

en donde el significado de cada uno de los parámetros se recoge en la Tabla 3.

Tabla 3: 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

Además, para cualquier diseño escogido se tiene que cumplir los requisitos recogidos en la Tabla 4.

Tabla 4: Requisitos Estructurales

Requisitos	Valores
Frecuencias propias	$f_n > 150$ Hz
Márgenes de seguridad	$MoS_i > 0$

Habiéndose establecido como criterio de optimización al menos uno de los requisitos recogidos en la Tabla 5.

Tabla 5: Criterios de optimización

Requisitos	Valores
Frecuencias propias	$f_n = 150 - 175$ Hz
Márgenes de seguridad	$MoS_i = 0 - 0.5$

2. Dimensionamiento de la bandeja

2.1. Descripción de la bandeja.

El objetivo del trabajo es minimizar la masa del satélite , y en concreto se va estudiar la bandeja inferior, a la que se le va a colocar un instrumento de 12 kg. Sin embargo, a diferencia de la bandeja intermedia, se tiene que incluir una segunda masa que representa la masa de las 3 bandejas, los 2 equipos, los 4 paneles laterales y las 4 vigas en L. El valor de esta masa se puede calcular a partir de la expresión (3) y cuya valor para el problema de estudio es 43.32 kg.

$$M_2[kg] = M_{\text{equipo}} [kg] (2 + 3,5 * L_{\text{bandeja}} [m]) \quad (3)$$

Esta masa se representa en PATRAN mediante RBE2 a todo el contorno, y se encuentra situada en el centro de la bandeja a una altura de 0.38 m respecto al plano de la bandeja. En la Figura 2 se representan ambas masas con sus RBE2 correspondientes.

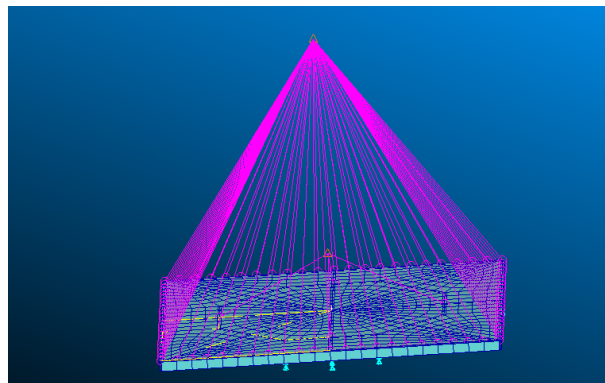


Figura 2: Representación masas.

Además de esta segunda masa extra, también se han añadido elementos CBUSH que representan los tornillos que unirán la bandeja al adaptador del sistema de separación, el segundo nodo que representa estos tornillos tienen que estar situados a 20 mm por debajo de la bandeja , y a estos nodos inferiores se le han aplicado las restricciones en los 6 grados de libertad. En la Figura 3 se representan los 12 CBUSH, con los grados de libertad restringidos y su posicionamiento.

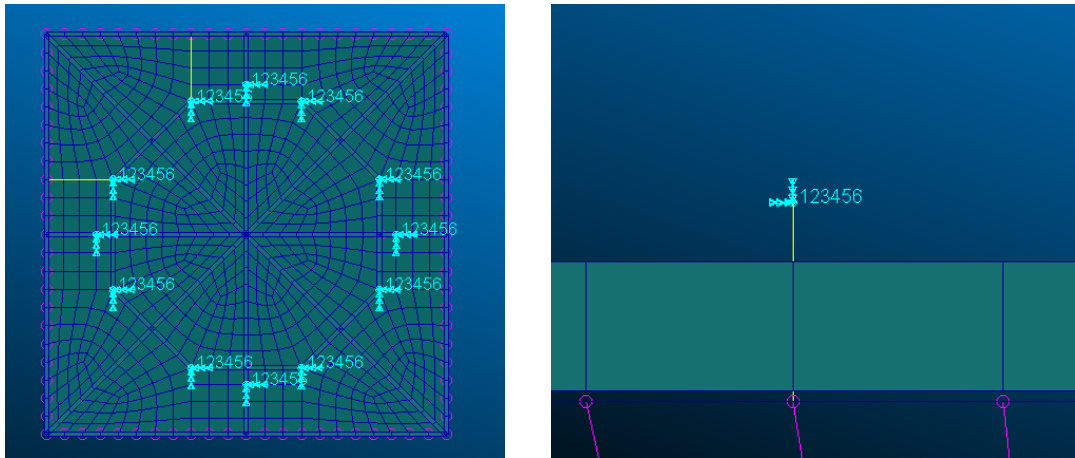


Figura 3: Representación de los CBUSH.

2.1.1. Descripción de las distintas opciones

Conocidas las restricciones de la bandeja, a la hora de llevar a cabo un estudio paramétrico y de optimización se han seleccionado las siguientes opciones:

1. Elección de materiales: Se han escogido el aluminio 7075-T6 y el Ti-6Al-4V y sus propiedades se encuentran en las siguientes Tablas:

Tabla 6: 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 7: Propiedades del Titanio 6Al-4V [1], [2]

Material	Propiedad	Valor	Unidades
Ti 6Al-4V	Densidad	4430	kg/m ³
	Módulo de elasticidad	$1,1 \cdot 10^{11}$	Pa
	Coefficiente de Poisson	0,31	NA
	σ_y	$9,99 \cdot 10^8$	Pa
	σ_u	$1,103 \cdot 10^9$	Pa

2. Geometría de los rigidizadores interiores: Se han escogido dos geometrías, una rectangular como los rigidizadores exteriores y otra en sección de I. En la Figura 4 se muestran los parámetros de cada uno de ellos, los cuales se van a modificar para estudiar su comportamiento en el proceso de optimización.

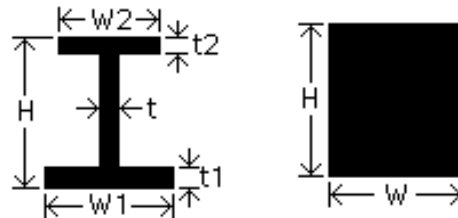


Figura 4: Rigidizador sección en I (izda.). Rigidizador sección rectangular (dcha.).

3. Elección de la geometría: Inicialmente se diseñaron en Patran dos tipos geometrías, variando el número de rigidizadores interiores y los cuales de representan en la Figura 5

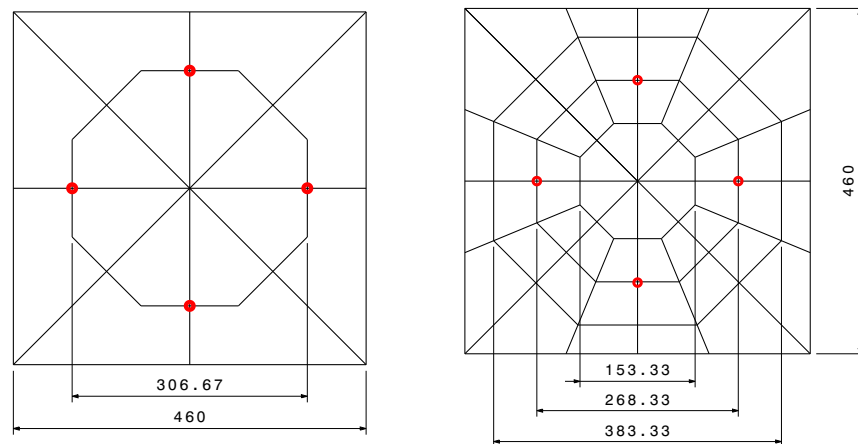


Figura 5: Geometría 1(G1) (izda.). Geometría 2 (G2) (dcha.).

En la Figura 5 se muestra en rojo los puntos sobre los que va a ir enganchado la masa de los equipos.

4. Elección medidas iniciales : Se ha escogido como valores iniciales aproximados las medidas de las bandejas del UPMSat-2 como punto de partida.

Tabla 8: Medidas iniciales de referencia utilizadas como punto de partida para la iteración (Rigidizador interior de sección rectangular, G1 y Al-7075).

Geometría	Material	Espesor base bandeja [mm]	Rigidizador exterior		Rigidizador interior		
			W [mm]	H [mm]	Sección	W [mm]	H [mm]
G1	Al-7075	2	5	13	Rect	5	13

Tabla 9: Medidas iniciales de referencia utilizadas como punto de partida para la iteración (Rigidizador interior en I, G1 y Ti-6Al-4V).

Geometría	Material	Espesor base bandeja [mm]	Rigidizador exterior		Rigidizador interior		
			W [mm]	H [mm]	t [mm]	W [mm]	H [mm]
G1	Ti-6Al-4V	2	5	13	2	10	13

Tabla 10: Medidas iniciales de referencia utilizadas como punto de partida para la iteración (Rigidizador interior en I, G2 y Al-7075).

Geometría	Material	Espesor base bandeja [mm]	Rigidizador exterior		Rigidizador interior		
			W [mm]	H [mm]	t [mm]	W [mm]	H [mm]
G2	Al-7075	2	5	13	2	10	13

2.2. Resultados de los análisis sobre la bandeja

Metodología de Diseño

Una vez definidos los parámetros de diseño, se va explicar la metodología seguida para estudiar cómo afecta cada uno de los diferentes parámetros escogidos a los márgenes de seguridad, la masa y la frecuencia. Para ello se ha llevado a cabo los siguientes pasos:

- Modificación de un 100 % del valor inicial de cada uno de los parámetros de las placas de referencia (Tablas 8, 9 y 10) para ver su influencia.
- Estudio de la influencia de cada uno de los parámetros.
- Modificación de la referencia con el objetivo de llegar a la bandeja optimizada final teniendo en cuenta la sensibilidad de los parámetros.

En caso de que sea de interés, en el Anexo A, se recoge todo la metodología de trabajo utilizada a la hora de organizar los diferentes archivos en Patran, así como la organización de directorios utilizada en el trabajo.

Resultados del estudio paramétrico

En primer lugar se llevó a cabo un estudio de la influencia de cada uno de los parámetros para la bandeja con la geometría 1 (G1), rigidizadores interiores con sección rectangular y de aluminio. En la Tabla 11 y Figura 6 se recogen los resultados obtenidos de este análisis de sensibilidad. Posteriormente, se llevó a cabo un estudio de sensibilidad de la influencia de los parámetros de la bandeja de titanio con sección en I para los rigidizadores interiores. En la Tabla 12 y Figura 7 se recogen los resultados obtenidos de este análisis de sensibilidad. De estos resultados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El parámetro que más aumenta la frecuencia es la altura del rigidizador interior, seguido del espesor. En el caso del rigidizador interior en I, el aumento del espesor t , provoca una variación porcentual del mismo orden que el aumento del espesor, pero con el beneficio de que el aumento de la masa es menor.
- El parámetro que más aumenta la masa de la bandeja en ambos casos es el espesor de la bandeja, seguido de la anchura y la altura de los rigidizadores interiores, y por último la altura y anchura de los rigidizadores exteriores.
- Los parámetros que más aumentaban el $MoSy$ y el $MoSu$ es el valor de la anchura de los rigidizadores interiores.
- El aumento de la altura y anchura de los rigidizadores exteriores principalmente provoca un aumento de la masa, sin afectar significativamente en la frecuencia o en los márgenes de seguridad.

Se llevó a cabo el mismo estudio para el caso de los de la segunda geometría, con rigidizador en I y material de Aluminio, ya que era la combinación de parámetros resultante tras el estudio de optimización de la bandeja G1 que mejor resultados daban en relación al peso de la bandeja, comprobándose que la variación de los parámetros tenía un comportamiento similar a la primera geometría, pero en cambio, el aumento de la masa con respecto al aumento de la frecuencia era mucho mayor. Los resultados se recogen en la Tabla 13 y Figura 8. Aunque se llevó a cabo también un proceso de optimización para llegar a un resultado final que cumpliera con los requisitos de diseño, y con al menos de uno de los criterios de optimización, a la vista de los resultados se puede apreciar que la bandeja resultante tendrá una mayor masa.

En las Figuras 6, 7, 8 se muestra la variación porcentual frente a la referencia que se recogen en sus respectivas tablas en color azul. Además, en las Tablas 11, 12, 13 en amarillo se muestra el parámetro modificado para el estudio.

Tabla 11: Estudio de la sensibilidad de cada parámetros para la bandeja G1, con rigidizadores con sección rectangular y Al-7075.

Iteración	Geometría	Material			Bandeja	Rigidizador exterior		Rigidizador interior		Resultados				
		Material	σ_y [Pa]	σ_u [Pa]	Espesor [m]	W [m]	H [m]	W [m]	H [m]	Masa [kg]	f [Hz]	σ_V [Pa]	MoS_y	MoS_u
Ref	G1	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.002	0.005	0.013	0.005	0.013	2.10	49.88	$1.62 \cdot 10^9$	-0.83	-0.82
1	G1	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.004	0.005	0.013	0.005	0.013	3.29	64.61	$1.20 \cdot 10^9$	-0.77	-0.76
2	G1	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.002	0.01	0.013	0.005	0.013	2.31	49.83	$1.62 \cdot 10^9$	-0.83	-0.82
3	G1	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.002	0.005	0.026	0.005	0.013	2.44	49.83	$1.62 \cdot 10^9$	-0.83	-0.82
4	G1	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.002	0.005	0.013	0.01	0.013	2.70	64	$8.84 \cdot 10^8$	-0.68	-0.67
5	G1	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.002	0.005	0.013	0.005	0.026	2.69	96.48	$4.98 \cdot 10^8$	-0.44	-0.42

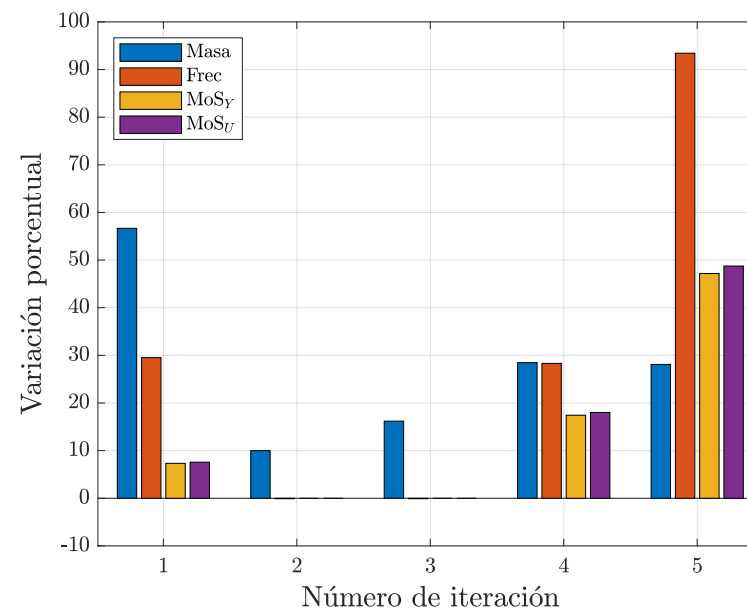


Figura 6: Sensibilidad del modelo en función del parámetro modificado para la bandeja G1, con rigidizadores interiores con sección rectangular y de aluminio 7075

Tabla 12: Estudio de la sensibilidad de cada parámetros para la bandeja G1, con rigidizadores interiores con sección I y de Ti 6Al-4V.

Iteración	Geometría	Material			Bandeja	Rigidizador exterior		Rigidizador interior I			Resultados				
		Material	σ_y [Pa]	σ_u [Pa]	Espesor [m]	W [m]	H [m]	t [m]	W [m]	H [m]	Masa [kg]	f [Hz]	σ_V [Pa]	MoSy	MoSu
Ref	G1	Ti 6Al-4V	$9.99 \cdot 10^8$	$1.10 \cdot 10^9$	0.002	0.005	0.013	0.002	0.01	0.013	3.23	57.45	$1.40 \cdot 10^9$	- 0.55	-0.57
1	G1	Ti 6Al-4V	$9.99 \cdot 10^8$	$1.10 \cdot 10^9$	0.004	0.005	0.013	0.002	0.01	0.013	5.11	75.64	$9.65 \cdot 10^8$	- 0.35	-0.37
2	G1	Ti 6Al-4V	$9.99 \cdot 10^8$	$1.10 \cdot 10^9$	0.002	0.01	0.013	0.002	0.01	0.013	3.77	57.37	$1.40 \cdot 10^9$	- 0.55	-0.57
3	G1	Ti 6Al-4V	$9.99 \cdot 10^8$	$1.10 \cdot 10^9$	0.002	0.005	0.026	0.002	0.01	0.013	3.77	57.37	$1.40 \cdot 10^9$	- 0.55	-0.57
4	G1	Ti 6Al-4V	$9.99 \cdot 10^8$	$1.10 \cdot 10^9$	0.002	0.005	0.013	0.004	0.01	0.013	3.83	69.97	$9.91 \cdot 10^8$	- 0.37	-0.39
5	G1	Ti 6Al-4V	$9.99 \cdot 10^8$	$1.10 \cdot 10^9$	0.002	0.005	0.013	0.002	0.02	0.013	3.81	62.25	$8.50 \cdot 10^8$	- 0.26	-0.29
6	G1	Ti 6Al-4V	$9.99 \cdot 10^8$	$1.10 \cdot 10^9$	0.002	0.005	0.013	0.002	0.01	0.026	3.60	95.91	$5.87 \cdot 10^8$	0.07	0.04

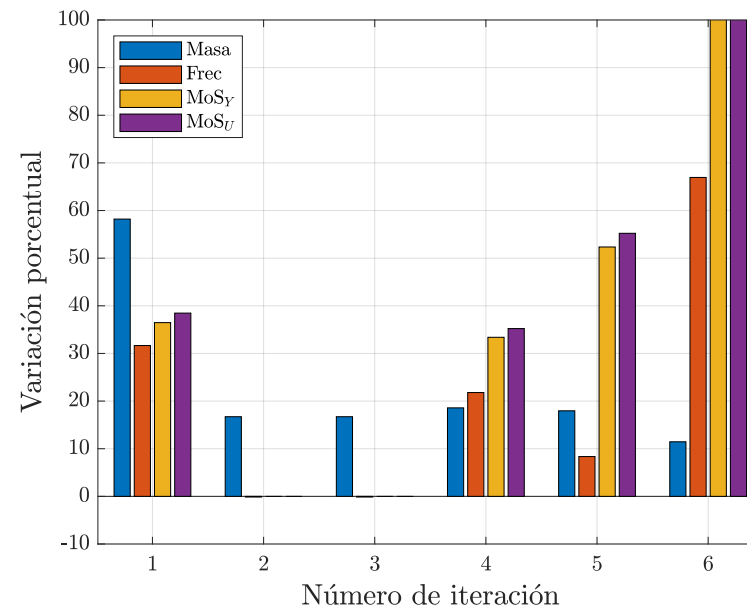


Figura 7: Sensibilidad del modelo en función del parámetro modificado para la bandeja G1, con rigidizadores interiores con sección en I y de Ti 6al-4V

Tabla 13: Estudio de la sensibilidad de cada parámetros para la bandeja G2, con rigidizadores en I y de Al-7075.

Iteracion	Geometria	Material		Bandeja		Rigidizador exterior		Rigidizador interior I			Resultados				
		Material	σ_y [Pa]	σ_u [Pa]	Espesor [m]	W [m]	H [m]	t [m]	W [m]	H[m]	Masa [kg]	f [Hz]	σ_V [Pa]	MoSy	MoSu
Ref	G2	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.002	0.005	0.013	0.002	0.01	0.013	2.53	47.27	$1.04 \cdot 10^9$	-0.73	-0.76
1	G2	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.004	0.005	0.013	0.002	0.01	0.013	3.71	58.80	$8.16 \cdot 10^8$	-0.66	-0.70
2	G2	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.002	0.01	0.013	0.002	0.01	0.013	2.86	47.23	$1.04 \cdot 10^9$	-0.73	-0.76
3	G2	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.002	0.005	0.026	0.002	0.01	0.013	2.86	47.23	$1.04 \cdot 10^9$	-0.73	-0.76
4	G2	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.002	0.005	0.013	0.004	0.01	0.013	3.26	56.59	$7.38 \cdot 10^8$	-0.62	-0.67
5	G2	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.002	0.005	0.013	0.002	0.02	0.013	3.22	53.58	$6.05 \cdot 10^8$	-0.54	-0.59
6	G2	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.002	0.005	0.013	0.002	0.01	0.026	2.98	85.3	$4.01 \cdot 10^8$	-0.30	-0.38

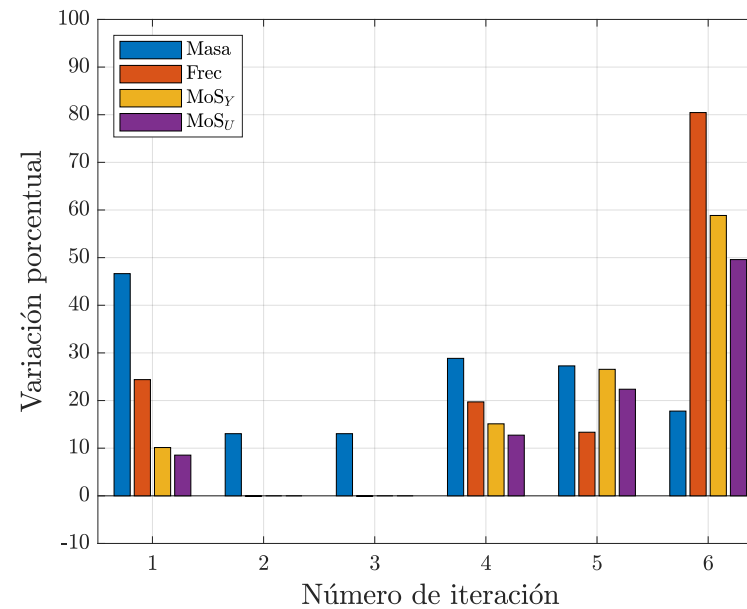


Figura 8: Sensibilidad del modelo en función del parámetro modificado para la bandeja G2, con rigidizadores interiores con sección en I y de Al 7075

2.2.1. Proceso de optimización y comparación de resultados

A la vista de los resultados obtenidos, se establecieron los siguientes criterios a la hora de llevar a cabo la optimización:

- El valor mínimo para cualquiera de las dimensiones de la bandeja es de 2 mm.
- La altura de los rigidizadores interiores y de los rigidizadores exteriores va a ser la misma.
- Para los rigidizadores en forma de I (Figura 4) se va considerar que $t_1 = t_2 = t$ y que $W_2 = W_1 = W$

En primer lugar, se llevó a cabo la optimización de la bandeja con la geometría 1 (G1), tanto para la opción con rigidizadores interiores con sección rectangular como en I, para ambos materiales. Los resultados obtenidos se recogen en las Tablas 14 y 15. Tras el proceso de optimización se pudo concluir que:

- En ambos casos, para un mismo valor de la frecuencia, la masa al utilizar Ti-6Al-4V como material, provocaba un aumento significativo de la masa de la bandeja.
- Los márgenes de seguridad obtenidos con Ti-6Al-4V son bastante superiores a los obtenidos con la bandeja de material de aluminio. Tras numerosas iteraciones no fue posible disminuirlos por debajo de 1 sin que se dejase de cumplir el criterio de frecuencia mínima mayor que 150 Hz.
- La bandeja con la que se consiguieron unos mejores resultados fue la bandeja de aluminio con rigidizadores interiores en forma de I. En la que la disminución de la masa frente al resto de opciones es bastante significativa (Tabla 15).
- Para el caso de la bandeja con la segunda geometría (G2), se escogió optimizar únicamente la bandeja de Al-7075 con rigidizadores interiores con sección en I, ya que fue la opción con la se consiguió una menor masa con la geometría 1.
- En la Tabla 15 se puede observar como para el caso del aluminio se consiguió llegar a dos soluciones de optimización, cuya principal diferencia es el valor de la masa y el volumen ocupado. Finalmente, se ha decidido tomar como bandeja mejor optimizada la primera opción de dicha tabla, ya que aunque la altura de los rigidizadores es mayor que la segunda opción del aluminio, se ha conseguido reducir la masa en 0.5 kg, y como el objetivo final es la optimización de la masa se ha considerada esta la mejor iteración. No obstante, en caso de querer reducir el volumen de la bandeja se presenta la segunda opción recogida en dicha tabla.
- En la Tabla 17 y Figura 9 se presenta el proceso de iteración llevado a cabo para el caso de la bandeja de aluminio con rigidizadores en I, cabe destacar que solo se plasman algunas de las

iteraciones finales, una vez que se había conseguido alcanzar rangos de frecuencia dentro de los límites de optimización. El mismo procedimiento se ha llevado a cabo con las diferentes opciones para llegar a los resultados presentados en este trabajo.

Tabla 14: Resultados optimizados alcanzados para la bandeja G1 y con rigidizadores de sección rectangular en función del material.

Geometría	Material			Bandeja	Rigidizador exterior		Rigidizador interior R		Resultados				
	Material	σ_y [Pa]	σ_u [Pa]	Espesor [m]	W [m]	H [m]	W [m]	H [m]	Masa [kg]	f [Hz]	σ_V [Pa]	MoSy	MoSu
G1	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.0044	0.01	0.028	0.01	0.028	6.58	150.75	$1.94 \cdot 10^8$	0.45	0.49
G1	Ti 6Al-4V	$9.99 \cdot 10^8$	$1.10 \cdot 10^9$	0.004	0.01	0.022	0.01	0.022	8.70	150.607	$2.91 \cdot 10^8$	1.15	1.09

Tabla 15: Resultados optimizados alcanzados para la bandeja G1 y con rigidizadores de sección I en función del material.

Geometría	Material			Bandeja	Rigidizador exterior		Rigidizador interior I			Resultados				
	Material	σ_y [Pa]	σ_u [Pa]	Espesor [m]	W [m]	H [m]	t [m]	W [m]	H [m]	Masa [kg]	f [Hz]	σ_V [Pa]	MoSy	MoSu
G1	Al-7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.003	0.002	0.048	0.004	0.006	0.048	4.15	150.92	$1.83 \cdot 10^8$	0.53	0.57
G1	Al-7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.004	0.002	0.04	0.005	0.006	0.04	4.68	150.1	$1.94 \cdot 10^8$	0.45	0.49
G1	Ti 6Al-4V	$9.99 \cdot 10^8$	$1.10 \cdot 10^9$	0.003	0.002	0.04	0.0035	0.005	0.038	5.47	150.54	$2.95 \cdot 10^8$	1.12	1.06

Tabla 16: Resultados optimizados alcanzados para la bandeja G2 y con rigidizadores de sección I para el Aluminio.

Geometria	Material			Bandeja	Rigidizador exterior		Rigidizador interior I			Resultados				
	Material	σ_y [Pa]	σ_u [Pa]	Espesor [m]	W [m]	H[m]	t[m]	W [m]	H [m]	Masa [kg]	f [Hz]	σ_V [Pa]	MoSy	MoSu
G2	Al 7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.003	0.002	0.048	0.003	0.005	0.048	4.98	154.5	$1.51 \cdot 10^8$	0.86	0.63

Tabla 17: Estudio de la convergencia para la bandeja G1 con Al-7075 y rigidizadores en I.

Iteracion	Geometria	Material			Placa	Rigidizador exterior		Rigidizador interior I			Resultados				
		Material	σ_y [Pa]	σ_u [Pa]	Espesor	W [m]	H [m]	t [m]	W [m]	H [m]	Masa [kg]	f [Hz]	σ_V [Pa]	MoSy	MoSu
1	G1	Al-7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.003	0.005	0.045	0.004	0.02	0.045	5.77	156	$1.18 \cdot 10^8$	1.38	1.44
2	G1	Al-7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.003	0.002	0.045	0.004	0.015	0.045	4.67	154	$1.37 \cdot 10^8$	1.05	1.10
3	G1	Al-7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.003	0.002	0.045	0.004	0.01	0.045	4.3	150.28	$1.65 \cdot 10^8$	0.70	0.75
4	G1	Al-7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.003	0.002	0.048	0.004	0.008	0.048	4.3	153.96	$1.66 \cdot 10^8$	0.69	0.74
5	G1	Al-7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.003	0.002	0.048	0.004	0.005	0.048	4.12	150.03	$1.88 \cdot 10^8$	0.49	0.53
6	G1	Al-7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.004	0.002	0.04	0.005	0.006	0.04	4.68	150.1	$1.94 \cdot 10^8$	0.45	0.49
7	G1	Al-7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.003	0.002	0.048	0.004	0.006	0.048	4.15	150.92	$1.83 \cdot 10^8$	0.53	0.57

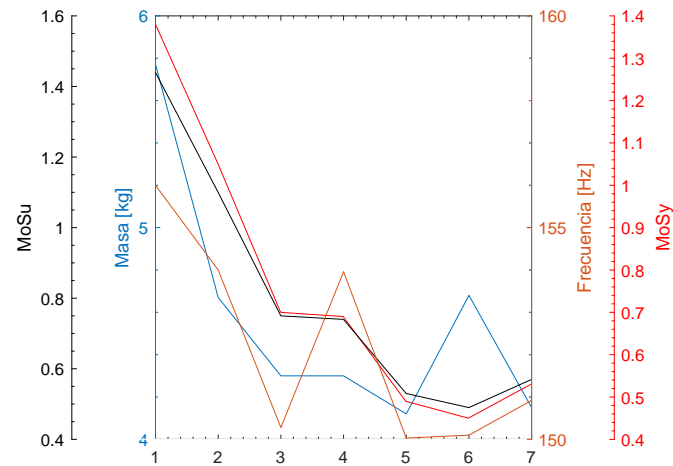


Figura 9: Representación de la convergencia de la últimas iteraciones realizadas para la bandeja G1 de aluminio y rigidizadores interiores en I.

Bandeja seleccionada

Finalmente, por todos los argumentos anteriormente expuestos, se ha elegido como bandeja final la recogida en la Tabla 18, la cual corresponde a la geometría 1, con rigidizadores interiores con sección en forma de I y material de Al-7075.

Tabla 18: Bandeja seleccionada tras el proceso de iteración

Geometría	Material			Bandeja	Rigidizador exterior		Rigidizador interior I			Resultados				
	Material	σ_y [Pa]	σ_u [Pa]	Espesor [m]	W [m]	H [m]	t [m]	W [m]	H [m]	Masa [kg]	f [Hz]	σ_V [Pa]	MoSy	MoSu
G1	Al-7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.003	0.002	0.048	0.004	0.006	0.048	4.15	150.92	$1.83 \cdot 10^8$	0.53	0.57

Modelo FEM de la bandeja seleccionada

- **Software empleado:** El programa utilizado a la hora de realizar el análisis ha sido MSC PATRAN y MSC NASTRAN ambos con la versión estudiante de 2020 (Student Edition 2020).
- **Sistema de unidades del modelo FEM:** Se ha utilizado en todo momento las unidades del sistema internacional.
- **Sistema de coordenadas del modelo FEM:** Únicamente existe un sistema de coordenadas.
- **Masa:** Se considera que la bandeja está formada por dos masa, una masa correspondiente a los equipos y de valor de 12 kg a una distancia de 80 mm y una segunda masa que representa la masa de las 3 bandejas, los 2 equipos, los 4 paneles laterales y las 4 vigas en L y que se va a colocar 0.38 m de la superficie de la bandeja.
- **Parámetros de los materiales estructurales del modelo:**

Tabla 19: 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

A la hora de crear el modelo FEM, se han llevado a cabo los siguientes pasos.

- **Idealización del modelo:** A la hora de representar la base de la bandeja se han utilizado elementos 2D tipo *Quad4* asignándoles la propiedad de elemento 2D tipo *shell*. Tanto los rigidizadores interiores como exteriores se han modelado como elementos 1D de tipo *bar*.

- **Geometría:** Tras el proceso de optimización, la geometría de la bandeja consiste en rigidizadores interiores en sección en I, y rigidizadores exteriores con sección rectangular. En la Tabla 20 y Figura 10 se representan las medidas y la geometría final de la bandeja.

Tabla 20: Bandeja seleccionada tras el proceso de iteración

	Material			Bandeja	Rigidizador exterior		Rigidizador interior I			Resultados				
Geometría	Material	σ_y [Pa]	σ_u [Pa]	Espesor [m]	W [m]	H [m]	t [m]	W [m]	H [m]	Masa [kg]	f [Hz]	σ_V [Pa]	MoSy	MoSu
G1	Al-7075	$4.48 \cdot 10^8$	$5.23 \cdot 10^8$	0.003	0.002	0.048	0.004	0.006	0.048	4.15	150.92	$1.83 \cdot 10^8$	0.53	0.57

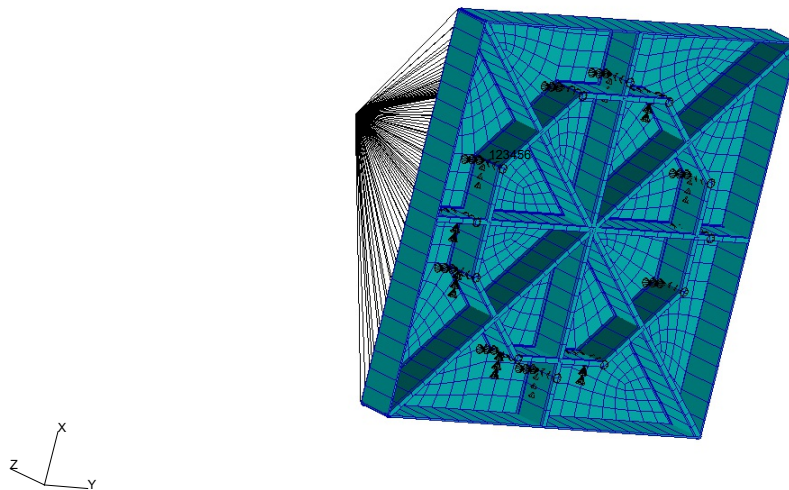


Figura 10: Geometría final de la bandeja.

- **Condiciones de contorno:** Para poder aplicar la condiciones de contorno se han creado dos ligaduras de tipo MPC, mediante elementos RBE2. En este caso, la masa de los equipos se han unido a la bandeja en cuatro puntos, mientras que la segunda masa que representa la masa del resto de la estructura se ha repartido mediante RBE2 a lo largo de todo el contorno de la bandeja, tal y como se muestra en la Figura 11 . Asimismo, se han modelado los tornillos que unen la bandeja al adaptador mediante 12 CBUSH, cuyo nodo inferior se encuentra a 20 mm por debajo de la bandeja inferior, y a los cuales se les han restringido los 6 grados de libertad, tal y como se muestra en la Figura 12.

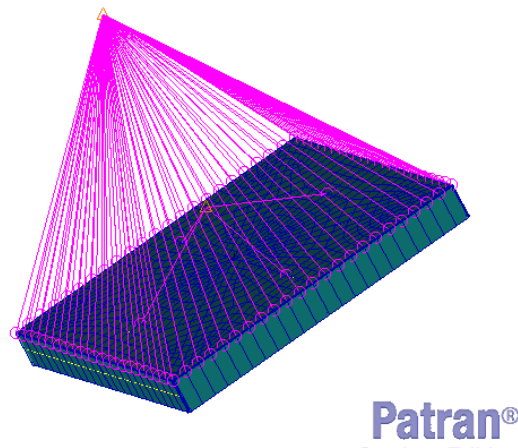


Figura 11: Modelización de los equipos y de la masa del satélite.

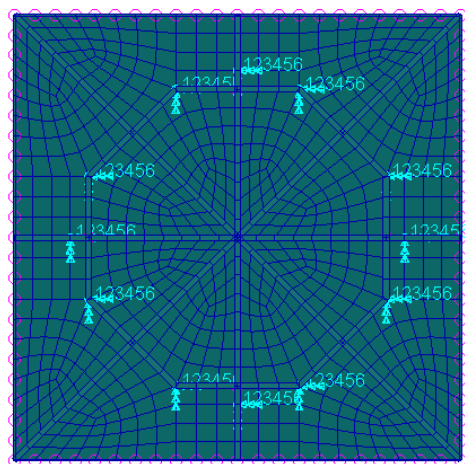


Figura 12: Modelización de la unión con el separador.

- **Comprobaciones:** Durante el proceso de diseño de las bandejas se ha llevado a cabo la verificación de que todas las normales apuntan en el mismo sentido, así como se verifican los elementos *Quad4* para verificar que no falla ninguno.

En la Tabla 21 se recoge un resumen del modelo FEM desarrollado.

Tabla 21: Modelo FEM

GRUPO	Propiedad	Tipo Elemento	Elem.Shape	IDs
Bandeja				
	0D_Mass_12Kg	Mass	Point	Elm 1
	0D_Mass_43.32Kg	Mass	Point	Elm 2784
	1D_Beam_Ext	Beam	Bar2	Elm 1200:1287
	1D_Beam_Int	Beam	Bar2	Elm 1000:1163
	2D_Shell	Shell	Quad4	Elm 2000:2783
CBUSH				
	1D_CBUSH	Bush	Bar	Elm 2:13

2.2.2. Modos propios de la elección final

A continuación, se representan en las Figuras 13, 14 y 15 los primeros 3 modos propios de la bandeja. Asimismo, en la Tabla 22 se recogen las 3 primeras frecuencias.

Tabla 22: Frecuencias obtenidas del análisis de modos propios de la bandeja.

	Frecuencia [Hz]
Modo 1	150.93
Modo 2	150.93
Modo 3	394.69

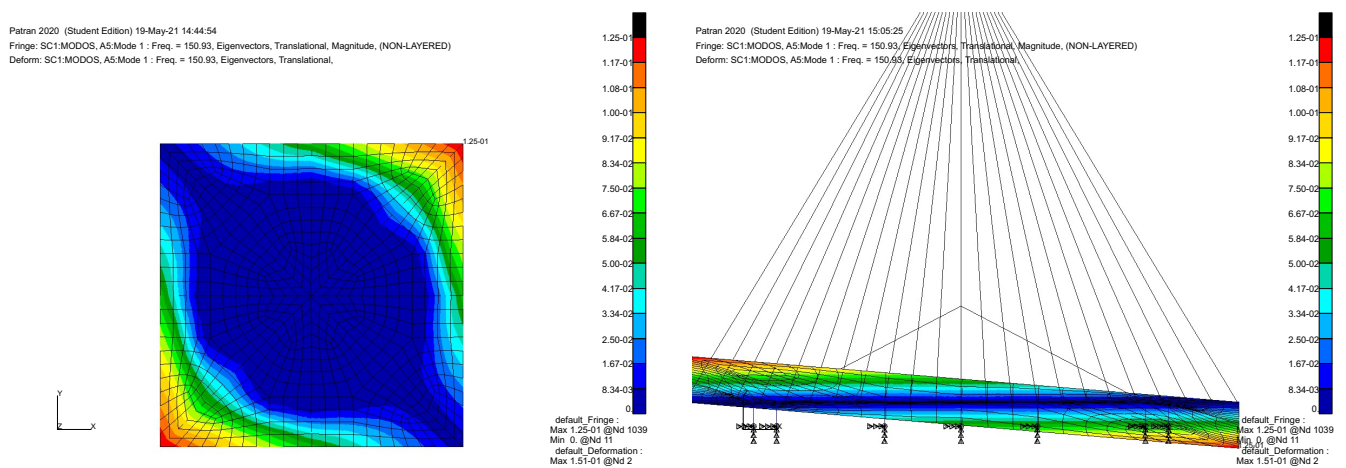


Figura 13: Representación Modo 1 ($f = 150,93$ Hz)

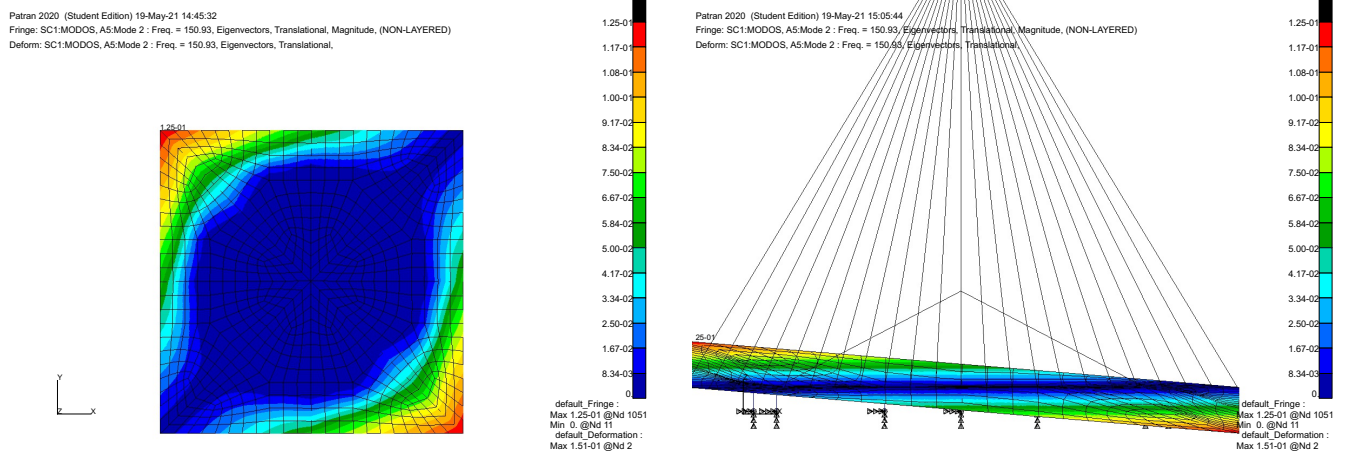


Figura 14: Representación Modo 2 ($f = 150,93$ Hz)

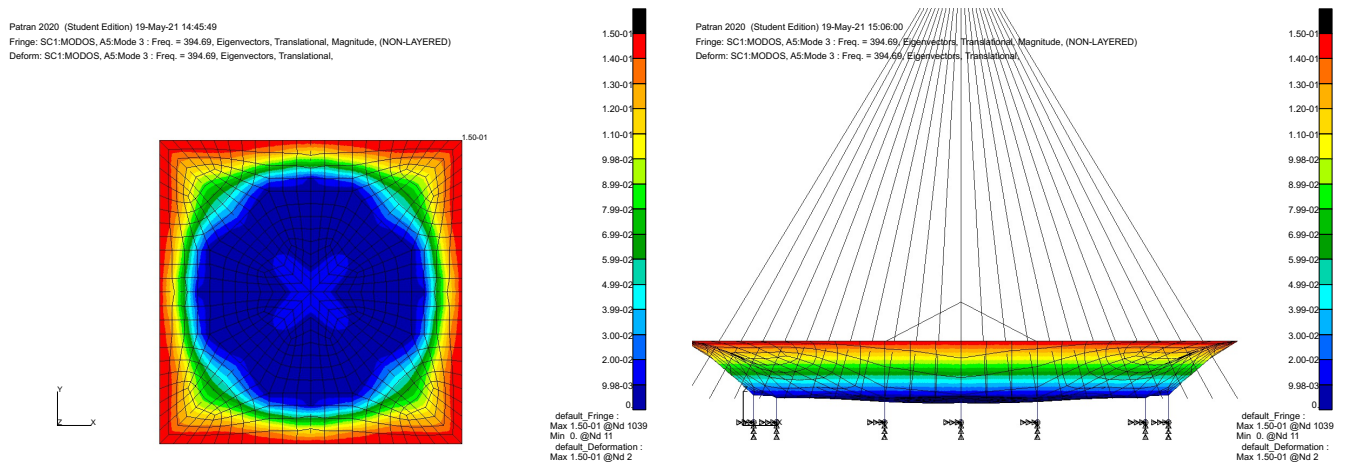


Figura 15: Representación Modo 3 ($f = 394,69$ Hz)

2.2.3. Análisis estático de la elección final

Para llevar a cabo el análisis estático, se ha sometido a la bandeja a las cargas definidas en la Tabla 2. El cabecero utilizado a la hora de realizar el análisis estático se encuentra recogido en el Anexo B. En la Tabla 23 se recogen los valores obtenidos para la tensión de Von Mises en los elementos Shell, así como el mínimo y el máximo combinado de los elemento tipo bar para cada uno de los casos de carga. A la hora de representar estos resultados, se ha configurado la pestaña de resultados de Patran con las siguientes características:

- Result ->Create ->Fringe

- Averaging definition: Domain->None. Method: Derive/Averge
- Extrapolation: Centroid

Para poder visualizar mejor los Bar Stress Maximum/Minimum combined se ha aumentado el ancho de los bordes en la pestaña de atributos. En las Figuras 16, 18, 20, 17, 19 y 21 se muestran los resultados obtenidos tras el análisis estático.

Tabla 23: Resultado del análisis estático para cada uno de los ejes.

	Aceleración [g]	$\sigma_{VM-Shell}$ [Pa]	$\sigma_{VM-Max-Bar}$ [Pa]	$\sigma_{VM-Min-Bar}$ [Pa]	MoSy	MoSu
Eje X	50	$6.34 \cdot 10^7$	$1.83 \cdot 10^8$	$-1.83 \cdot 10^8$	0.53	0.57
Eje Y	50	$4.45 \cdot 10^7$	$1.83 \cdot 10^8$	$-1.83 \cdot 10^8$	0.53	0.57
Eje Z	80	$2.13 \cdot 10^7$	$5.68 \cdot 10^7$	$-5.89 \cdot 10^7$	3.94	4.07

A la hora de obtener los valores máximos de la tensión de Von Misses, tanto en los *Shell*, como en los *bar*, se ha utilizado la configuración anteriormente especificado y se ha utilizado del archivo .xdb generado tras el análisis. Tras realizar el análisis estático de la bandeja, se puede concluir que las mayores tensiones se dan en los elementos tipo *bar*, siendo los mayores valores en el eje X e Y, ya que para ambos casos son coincidentes.

Patran 2020 (Student Edition) 19-May-21 14:28:46

Fringe: SC1:QSTATIC_X, A2:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, Maximum,2 of 2 layers

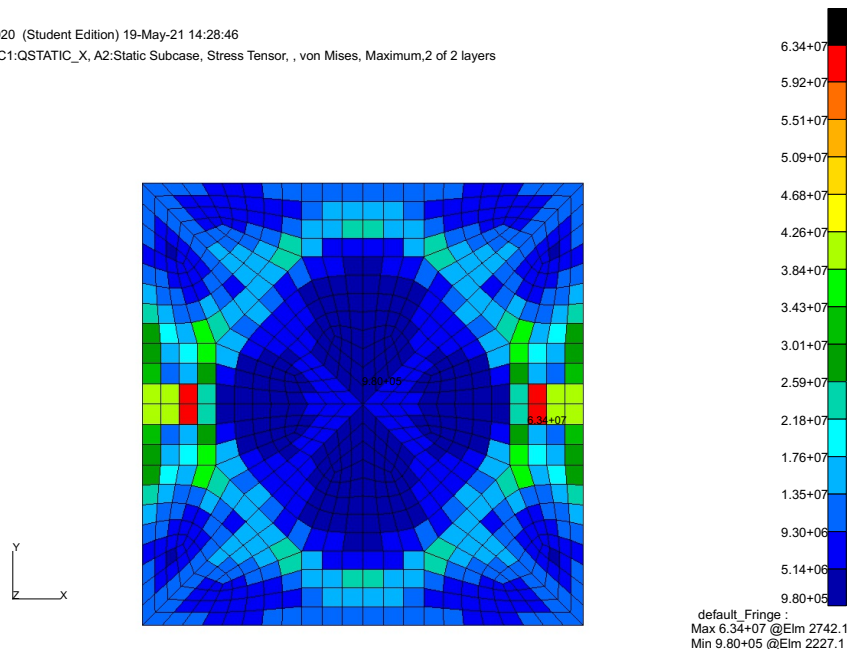


Figura 16: Visualización Shell Stress Tensor para el análisis estático en la dirección X

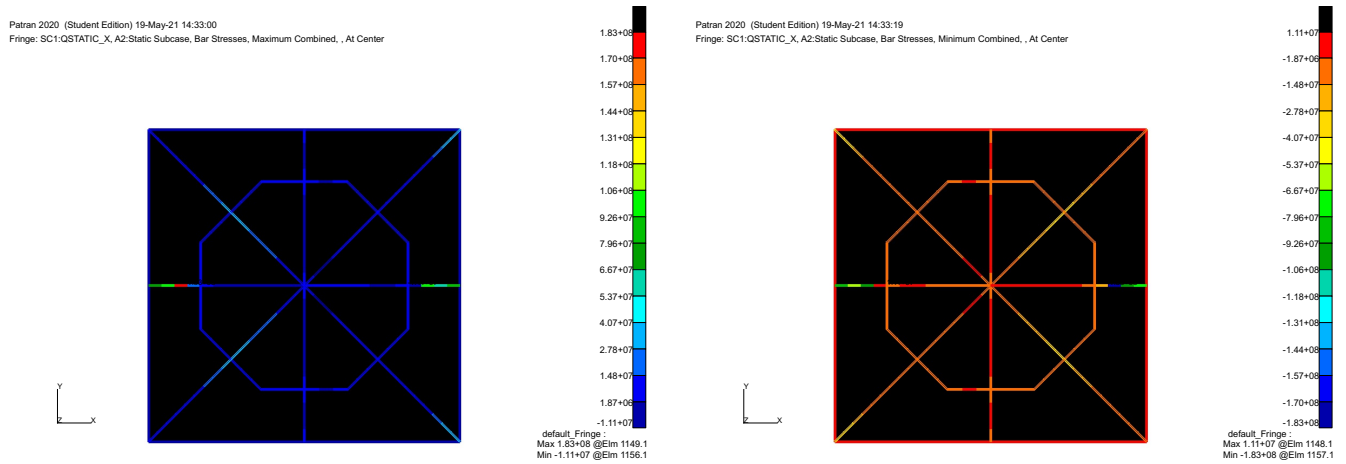


Figura 17: Visualización Bar Stress Maximum Combined (izda.) y Bar Stress Minimum Combined (dcha.) para el análisis estático en la dirección X.

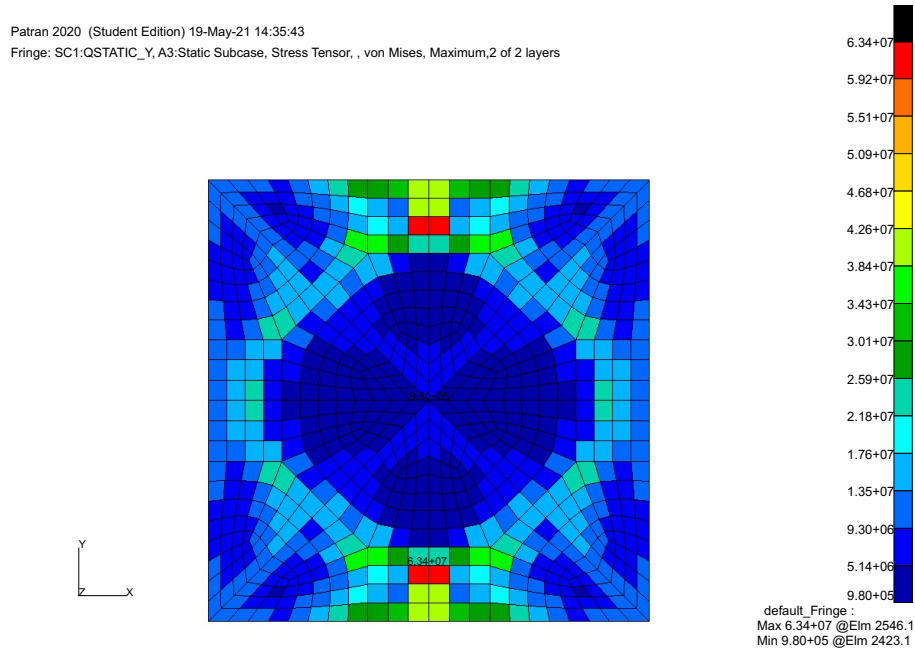


Figura 18: Visualización Shell Stress Tensor para el análisis estático en la dirección Y

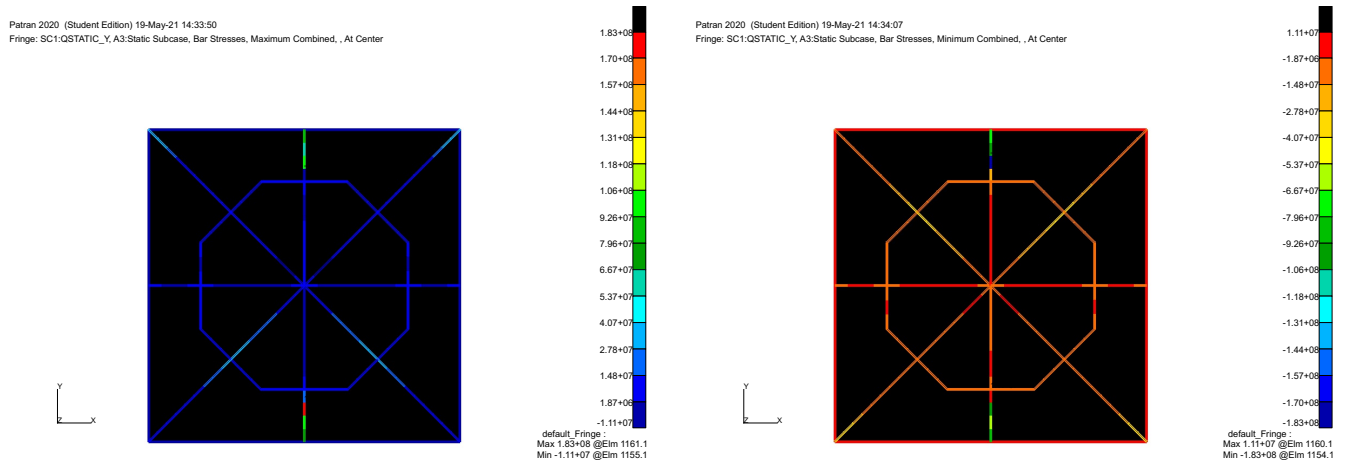


Figura 19: Visualización Bar Stress Maximum Combined (izda.) y Bar Strss Minimum Combined (dcha.) para el análisis estático en la dirección Y.

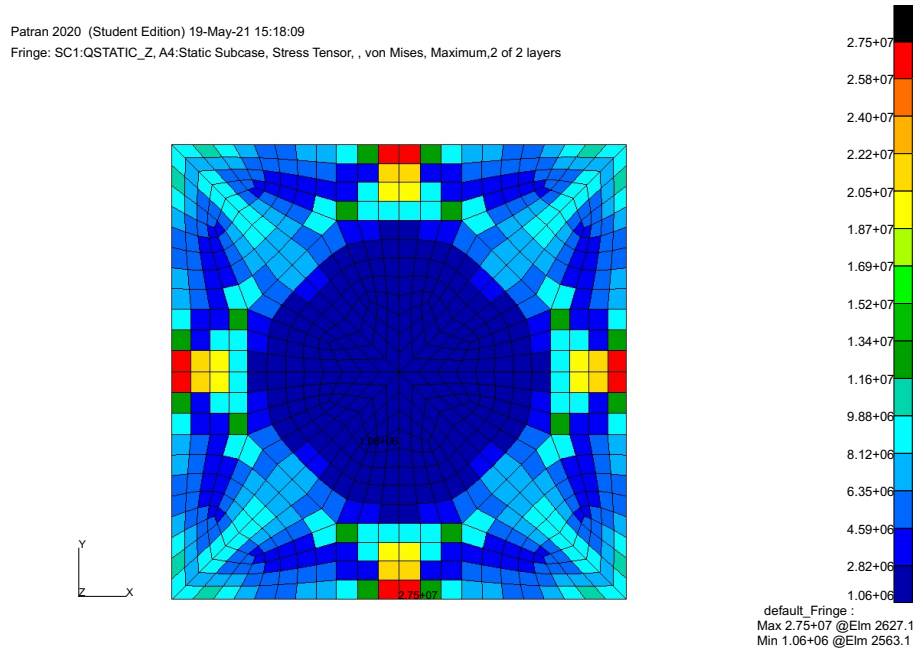
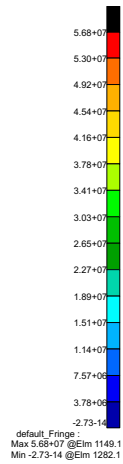
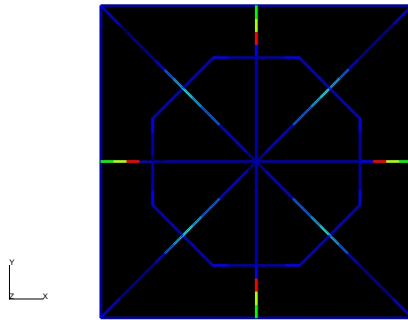


Figura 20: Visualización Shell Stress Tensor para el análisis estático en la dirección Z

Patran 2020 (Student Edition) 19-May-21 14:34:28
Fringe: SC1:QSTATIC_Z_A4:Static Subcase, Bar Stresses, Maximum Combined, , At Center



Patran 2020 (Student Edition) 19-May-21 14:34:54
Fringe: SC1:QSTATIC_Z_A4:Static Subcase, Bar Stresses, Minimum Combined, , At Center

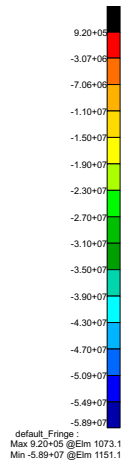
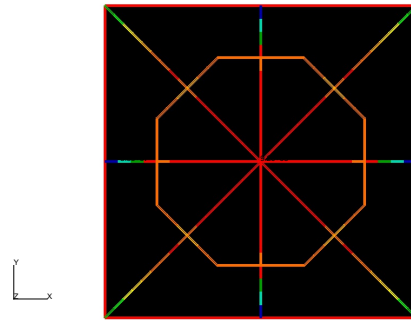


Figura 21: Visualización Bar Stress Maximum Combined (izda.) y Bar Strss Minimum Combined (dcha.) para el análisis estático en la dirección Z.

3. Conclusiones

Tras el estudio paramétrico de la bandeja se puede concluir:

- La gran importancia de realizar un estudio previo de la sensibilidad de cada uno de los parámetros, para conocer así cómo afectan a los requisitos estructurales y poder optimizar de forma correcta cada uno de los parámetros.
- El gran consumo de tiempo invertido al realizar este tipo de optimización de forma manualmente. Teniendo en cuenta además, que en este informe solo se han modificado algunos de los muchos posibilidad que habría para el diseño, como puede ser modificar el número de CBUSH o su colocación, o desarrollar otras geometrías. Además, solo ha sido posible estudiar dos tipos de rigidizadores interiores así como dos tipos de materiales.
- Se ha realizado un gran esfuerzo para no solo cumplir con los requisitos de frecuencias y márgenes de seguridad impuestos, así como con el requisito de optimización de que la frecuencia estuviese entre 150 Hz y 175 Hz, si no que una vez conseguido esto, se han llevado a cabo numerosas iteraciones hasta poder reducir la masa de la bandeja lo máximo posible, siendo este el objetivo final, resultando finalmente una bandeja de 4.15 kg. aunque no se ha conseguido que los márgenes de seguridad estuvieran por debajo de 0.5, si que se han aproximado mucho a este valor.
- Los márgenes de seguridad del titanio no se han podido reducir en la mayoría de los casos a valores inferiores a 1 ya que las combinaciones de parámetros probadas daban como resultado que la frecuencia de la bandeja se saliese del rango de aceptación.
- Se intentó llevar a cabo otro diseño (G2), con una mayor cantidad de rigidizadores interiores con el fin de poder cumplir los requisitos impuesto utilizando una menor masa, sin embargo, el incremento de la masa frente al aumento de la frecuencia era mayor en todas las iteraciones realizadas, no llegando a ningún resultado en masa que fuera inferior a la elección final de bandeja con la geometría 1. Por tanto, finalmente se descartó esta geometría.
- Como se ha mostrada en el apartado de proceso de optimización, la bandeja elegida tiene una altura de rigidizadores de 0.048 m, dando como resultado que ocupe un gran volumen, pero ha sido la opción de parámetros que ha permitido una menor masa. En caso de que se quisiera llegar a una solución de compromiso entre el volumen y la masa de la bandeja, como se ha mostrado anteriormente, existen otras posibilidades de parámetros para esa misma bandeja, que aunque aumentan la masa en 0.5 kg, la altura total de la bandeja sería de 6 cm menos.

A. Metodología Patran-Nastran

Como se ha explicado, va a ser necesario llevar a cabo numerosas iteraciones para ser capaz de llegar a la geometría optimizada. Para facilitar este proceso, se ha seguido el siguiente procedimiento. En primer lugar, tras diseñar las diferentes geometrías, elección de rigidizadores tanto interiores como exteriores, y el material en Patran, se han creado sus correspondientes archivos. *bdf*.

Se ha decidido dividir el archivo *.bdf* en 4 archivos para facilitar su edición, sobretodo a la hora de tener en cuenta la variación de los *offset* de los rigidizadores con el espesor y la altura de los mismos.

Los archivos son los siguientes:

- **BB_GX_YY**: Este archivo es el main y contiene toda la información del modelo menos la de las propiedades unidimensionales tipo *beam* utilizadas para los rigidizadores y los tipo *shell* que forman la base de la bandeja. Dentro de este archivo se encuentran 3 llamadas **Rig_Ext.bdf**, **Rig_Int.bdf** y **Shell.bdf**. La nomenclatura utiliza es, BB (bandeja inferior), GX, en donde X cambiará en función de si es la G1 o la G2, YY correspondiente a material, pudiendo ser Ti o Al.
- **Rig_Int.bdf**: En este archivo se almacena toda la información de los rigidizadores interiores definidos como elementos tipo *beam*. Se ha utilizado este *.bdf* para modificar las dimensiones y los **offset** de los rigidizadores.
- **Rig_Ext.bdf**: En este archivo se almacena toda la información de los rigidizadores exteriores definidos como elementos tipo *beam*. Se ha utilizado este *.bdf* para modificar las dimensiones y los **offset** de los rigidizadores exteriores.
- **Shell.bdf**: En este archivo se recoge toda la información sobre los elementos **Shell** y de los cuales va a ser posible modificar su espesor.

Por otro lado, para poder llevar a cabo cada uno de los análisis, tanto el de modos propios como el análisis estático en los 3 ejes, se han dividido en 4 directorios, cada uno de ellos con su correspondiente *.bdf*. Para el caso del análisis estático se ha utilizado los cabeceros proporcionados para este análisis. En la Figura ?? se muestra un ejemplo de la organización de carpetas.

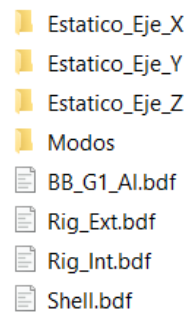


Figura 22: Organización de directorios y archivos *.bdf*

B. Cabecero Estático

```
C: > EUEP2 > Git > EUE > Practica_2 > BB > definitiva > it.38 > Cabeceros_I > Estatico_Eje_X > MODEL_quasistatic_x.dat
1  $ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
2  NASTRAN SYSTEM(151)=1
3  NASTRAN BUFFSIZE=65537
4  NASTRAN DBCFACT=4
5  SOL 101
6  CEND
7  $ Direct Text Input for Global Case Control Data
8  TITLE = Quasi_Static_X
9  ECHO = NONE
10 LINES=50000
11 SUBCASE 1
12 $Subcase name : QStatic_X
13   SUBTITLE=QStatic_X
14   SPC = 2
15   LOAD = 11
16 $ DISPLACEMENT(SORT1,REAL)=ALL
17 SET 102 = 2 THRU 13
18 SPCFORCES(SORT1,PHASE)=ALL
19 FORCES(SORT1,PHASE)=102
20 STRESS(PLOT,SORT1,REAL,VONMISES,BILIN)=ALL
21 WEIGHTCHECK(PRINT, SET=ALL) = YES
22 BEGIN BULK
23 $ Direct Text Input for Bulk Data
24 PARAM POST 0
25 PARAM PRTMAXIM YES
26 $ Loads for Load Case : Modos
27 SPCADD 2 1
28 $ Loads for Load Case : QStatic_X
29 LOAD 11 9.81 1. 2 0. 3 0. 4
30 $-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$
31 $ Displacement Constraints of Load Set : BC_123456
32 SPC1 1 123456 11 THRU 22
33 $-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$
34 $ Gravity Loading of Load Set : QStatic_69.3gOoP
35 GRAV 2 50.0 1. 0. 0.
36 $ Gravity Loading of Load Set : QStatic_69.3gIP_0deg
37 GRAV 3 50.0 0. 1. 0.
38 $ Gravity Loading of Load Set : QStatic_69.3gIP_90deg
39 GRAV 4 80.0 0. 0. 1.
40 $-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$$-----$
41 INCLUDE '../BB_G1_A1.bdf'
42 $
43 ENDDATA
44
```

Figura 23: Modificación del cabecero de estático para el Análisis de la bandeja

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>