

PRÁCTICA 2: DISEÑO Y MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE UN MICROSATÉLITE

1 Propósito

Esta práctica se realiza en dos partes: la primera parte consiste en diseñar una bandeja con rigidizadores que cumpla con los requisitos estructurales y las condiciones impuestas y que se consiga con la menor masa estructural posible. La segunda parte consiste en realizar el modelo FEM de la estructura de un microsatélite similar al UPMSat-2, tomando como referencia los pasos indicados en el anexo 1 del ‘Manual de cálculo estructural’ para la creación del modelo. Se deben formar grupos de dos personas para realizar este trabajo.

Grupo	Integrantes
Grupo 1	Noelia Martínez Figueira
	Pablo Romero Ramos
Grupo 2	Diego Mataix Caballero
	José María Vergara Pérez
Grupo 3	David Huergo Perea
	Miguel Ramiro Aguirre
Grupo 4	Daniel del Río Velilla
	María Elena Piqueras Carreño
Grupo 5	Marina Merchán Bravo
	Siro Muela Márquez
Grupo 6	Pablo Zapatero Montaña
	Gonzalo Moreno Arriaga
Grupo 7	Andrea Bravo Asián
	Laura García Moreno
Grupo 8	María Páez López
	Andrés Pedraza Rodríguez
Grupo 9	Anabel Soria Carro
	David Estébanez Mérida
Grupo 10	Daniel Navajas Ortega
	María Alonso Álvarez
Grupo 11	Javier Vega Mateos
	Rafael Luque López
Grupo 12	

2 Descripción del trabajo

La práctica consiste en diseñar y analizar un modelo estructural simplificado de un microsatélite tomando como referencia la estructura del UPMSat-2. La práctica consiste en dos fases:

- Diseño de las bandejas
- Análisis de la estructura del microsatélite

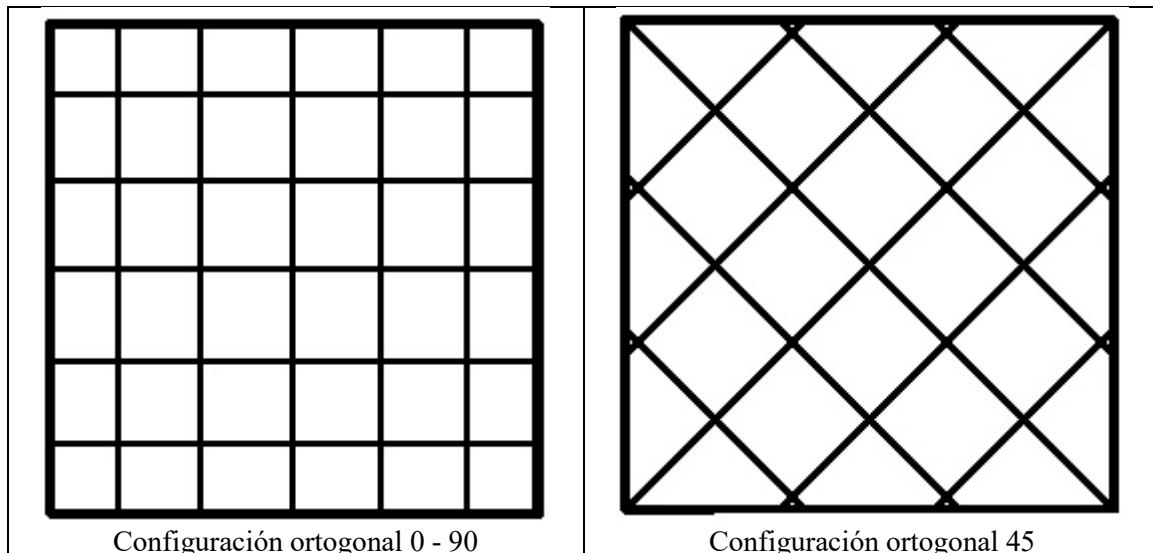
2.1 Diseño de las bandejas

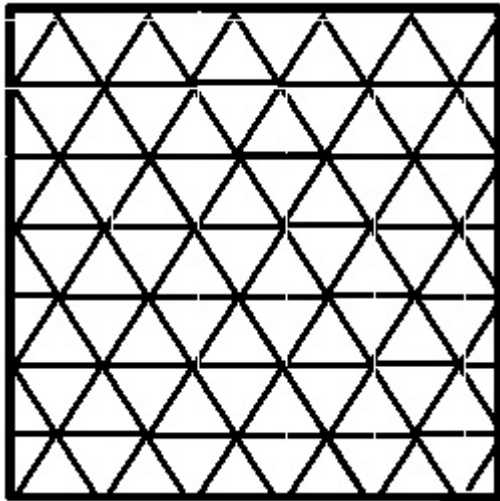
Esta primera parte consiste en diseñar bandejas cuadradas que servirán de soporte para los equipos que integran el Microsatélite. Las bandejas deben cumplir los siguientes requisitos geométricos:

- Rigidizadores de sección rectangular en los cuatro bordes (rigidizadores exteriores).

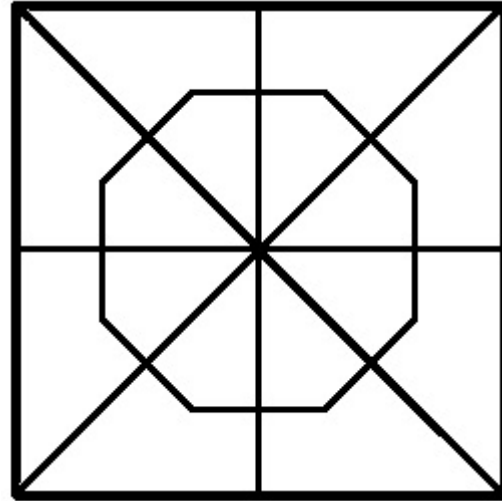
Aparte de los anteriores requisitos geométricos, cada grupo de trabajo dispondrá de una configuración distinta de rigidizadores interiores de la bandeja, de un valor distinto para la masa del equipo (masa puntual) que soporta cada bandeja y de unas dimensiones distintas para la bandeja, tal como se indica en la siguiente tabla:

Grupo	Configuración	Masas de los equipos (kg)	Dimensiones de la bandeja
Grupo 1	Configuración ortogonal (0° y 90°)	10	446 x 446 mm
Grupo 2	Configuración ortogonal ($\pm 45^\circ$)	11	450 x 450 mm
Grupo 3	Configuración isogrid	13	500 x 500 mm
Grupo 4	Configuración radial+octógono	12	460 x 460 mm
Grupo 5	Configuración radial+cuadrado	9	420 x 420 mm
Grupo 6	Configuración ortogonal (0° y 90°)	8	500 x 500 mm
Grupo 7	Configuración ortogonal ($\pm 45^\circ$)	8	500 x 500 mm
Grupo 8	Configuración isogrid	10	600 x 600 mm
Grupo 9	Configuración radial+octógono	10	500 x 500 mm
Grupo 10	Configuración radial+cuadrado	12	400 x 400 mm
Grupo 11	Configuración triangular	11	500 x 500 mm
Grupo 12	Configuración triangular	13	400 x 400 mm

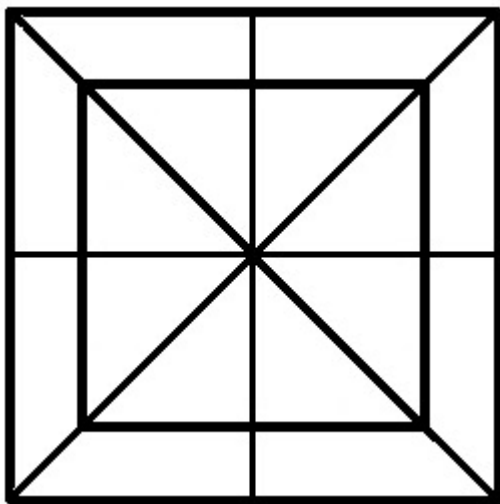




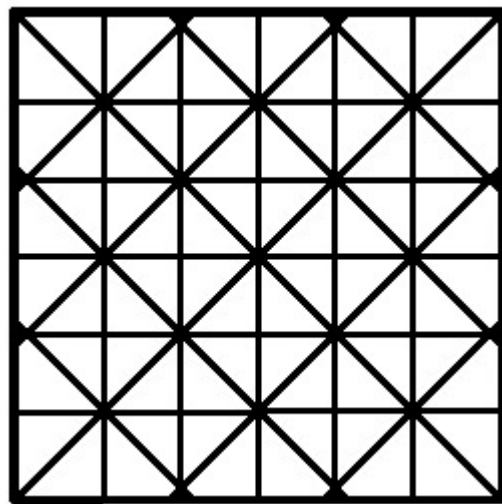
Configuración isogrid



Configuración radial + octógonos



Configuración radial + cuadrados



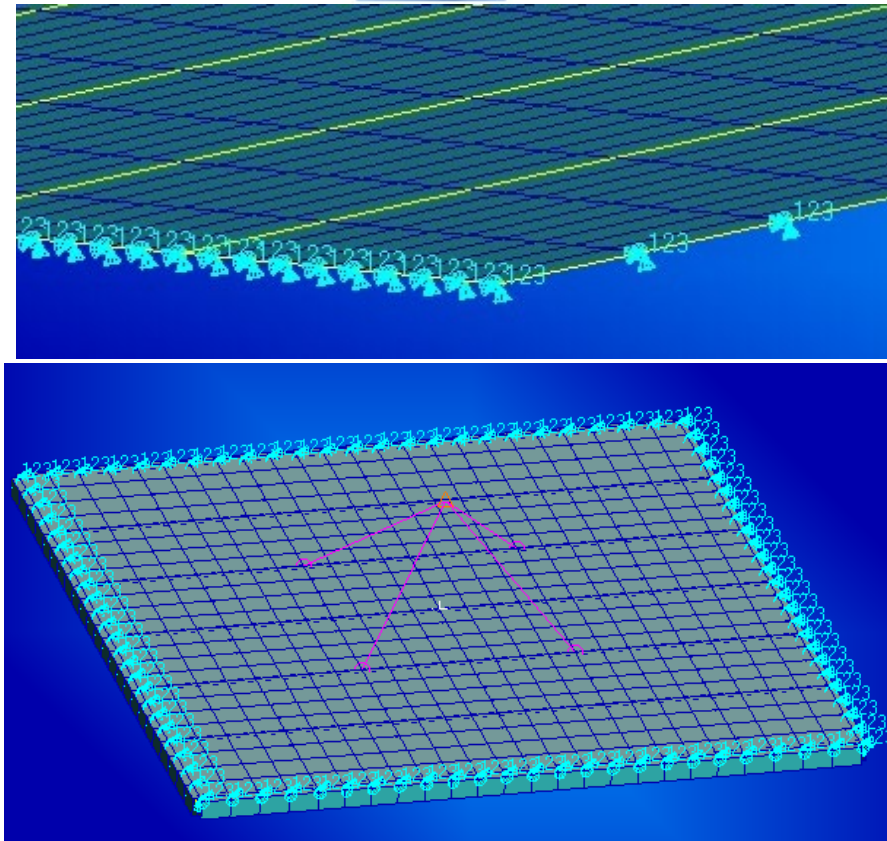
Configuración triangular

Una persona de cada grupo se encargará de diseñar la bandeja que irá en las posiciones intermedias del satélite, mientras que el otro miembro de cada grupo diseñará la bandeja inferior, siendo ambas bandejas con la configuración de rigidizadores correspondiente a cada grupo. Ambas bandejas deben tener el mismo número de nodos en el contorno exterior (para facilitar el mallado de los paneles laterales cuando se modele el satélite completo), que se puede conseguir fácilmente si tienen la misma geometría y la misma malla.

2.1.1 Diseño de la bandeja intermedia

Sobre la bandeja intermedia se debe situar un equipo con la masa especificada anteriormente (se modeliza mediante una masa puntual situada en el eje de simetría de la bandeja y a una distancia de 80 mm sobre la superficie) unida mediante un elemento rígido RBE2 a 4 puntos de la bandeja (a elección de cada grupo, preferiblemente en cruce de rigidizadores).

Para todos los análisis de esta bandeja con la masa puntual y el elemento rígido correspondiente, la bandeja intermedia debe estar simplemente apoyada en todo su contorno exterior (se restringen únicamente los tres grados de libertad de traslación de todos los nodos del contorno).

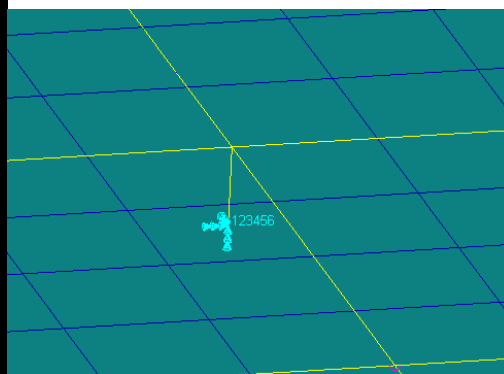
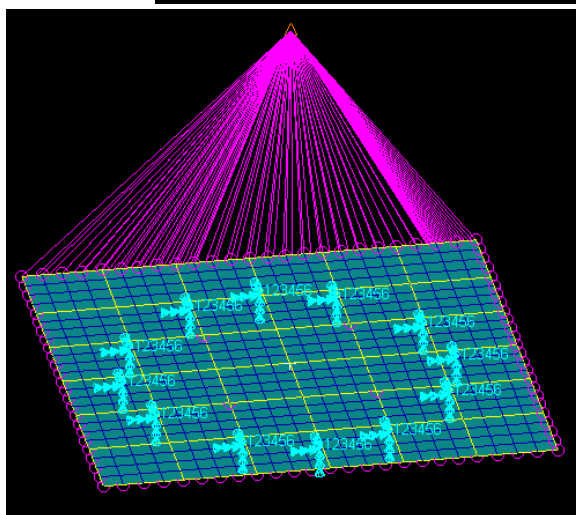
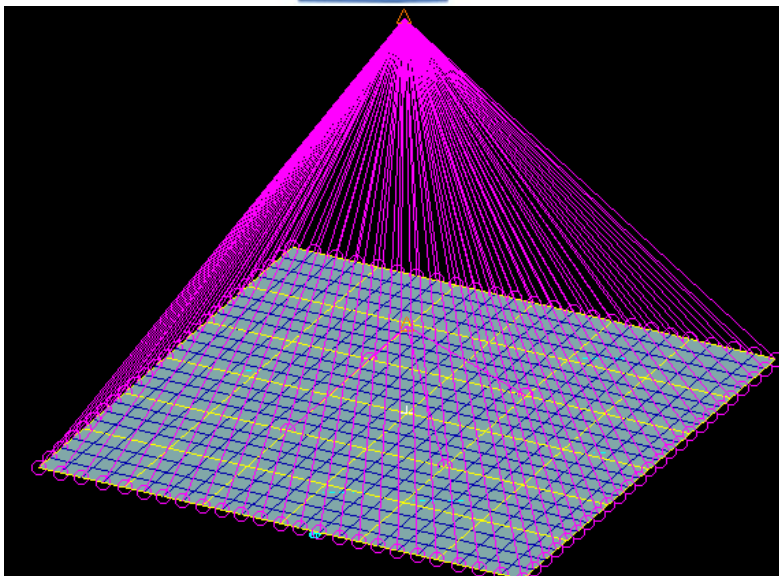


2.1.2 Diseño de la bandeja inferior

Sobre la bandeja inferior se debe situar un equipo con la masa especificada anteriormente (exactamente igual que para la bandeja intermedia) unida mediante un elemento rígido RBE2 a 4 puntos de la bandeja (los mismos puntos que para la bandeja intermedia). Pero a diferencia de la bandeja intermedia, se debe incluir además 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 (ver figuras a continuación). Esta segunda masa está situada en el eje central, a una distancia de **0.38 m** con respecto al plano de la bandeja. El valor de esta segunda masa se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$M_2[kg] = M_{equipo}[kg](2 + 3.5 * L_{bandeja}[m])$$

Además, se deben incluir elementos CBUSH que representan los tornillos que unirían esta bandeja con el adaptador del sistema de separación situado debajo. El **nº de elementos CBUSH oscila entre 8 y 12**. Los nodos superiores de los CBUSH deben estar situados en la bandeja inferior (cada grupo debe elegir estos nodos, siendo preferible que se sitúen en los cruces de los rigidizadores de la bandeja inferior, y que no coincidan con los nodos donde se une la masa puntual de esta bandeja), mientras que los nodos inferiores de los CBUSH deben estar una distancia de 20 mm por debajo de la superficie de la bandeja. A estos nodos inferiores se les aplica las restricciones (los 6 grados de libertad restringidos).



Los alumnos deben calcular el diseño óptimo de cada bandeja teniendo en cuenta que el sistema bandeja + equipo (+ 2ª masa) con las correspondientes condiciones de contorno debe cumplir los siguientes requisitos estructurales:

Requisitos	Valores
Frecuencias propias	$f_n > 150 \text{ hz}$
Márgenes de seguridad en los principales análisis estructurales	$MoSi > 0$

Los análisis que se deben realizar en esta fase para cada bandeja 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.

Dirección	Aceleración (g)
Lateral	50
Longitudinal	80

Para el cálculo de los márgenes de seguridad, se debe aplicar las siguientes fórmulas, que se pueden encontrar en el Manual de cálculo estructural, pág. 162):

$$MoS_y = \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_{VM\max} \times K_p \times K_M \times K_{LD} \times FOSY} \right) - 1$$

$$MoS_u = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_{VM\max} \times K_p \times K_M \times K_{LD} \times FOSU} \right) - 1$$

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
$\sigma_{VM\max}$	Máxima tensión de Von Mises obtenido de un análisis determinado	Solución de cada análisis

Teniendo en cuenta todo lo anterior, cada grupo debe determinar el diseño óptimo de ambas bandejas de forma independiente. Las variables que se deben variar para conseguir el diseño óptimo son las siguientes:

- Cantidad y colocación de rigidizadores interiores (siguiendo el esquema especificado para cada grupo)
- 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 (sección rectangular, sección I, sección H, etc...) y sus correspondientes dimensiones

Para conseguir el diseño óptimo, se puede tomar como referencia inicial las dimensiones de las bandejas del UPMSat-2, y modificar el valor de las anteriores variables para conseguir una estructura que cumpla con los requisitos estructurales, pero que disponga de la mínima masa posible. Los pasos de diseño recomendados son los siguientes:

1. Elegir el número de rigidizadores interiores y su colocación sobre la bandeja. Construir el modelo FEM de acuerdo a esta elección. (se puede usar la misma configuración tanto para la bandeja intermedia como para la inferior).
2. Elegir un tipo de sección para estos rigidizadores (sección rectangular, I, H, etc...).
3. Proponer distintos materiales (como mínimo dos opciones para cada bandeja).
4. Para cada opción del paso anterior, ir modificando los siguientes parámetros dimensionales (iteración) hasta cumplir con los requisitos estructurales y el objetivo de optimización que se indica a continuación.
 - a. Espesor de la placa
 - b. Dimensiones de la sección de los rigidizadores exteriores
 - c. Dimensiones de la sección de los rigidizadores interiores

5. Comparar la masa resultante de las distintas opciones analizadas. La opción elegida debe ser la que tenga menor masa.

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

- La primera frecuencia propia se sitúe entre 150 y 175 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.

Una vez conseguido el diseño final de las bandejas, se usarán ambas bandejas para construir el modelo completo del microsátélite del siguiente apartado. La bandeja inferior irá en la posición más baja, mientras que el modelo de la bandeja intermedia se usará para las 3 bandejas restantes.

2.2 Análisis de la estructura del microsátélite

La segunda parte de la práctica consiste en definir la estructura primaria de un microsátélite que consta de los siguientes elementos:

- Bandejas horizontales: Son un total de 4. Cada grupo debe utilizar el diseño resultante de su bandeja inferior para la bandeja situada en la posición más baja, mientras que se utilizará el diseño final de la bandeja intermedia para las otras 3 bandejas. Cada bandeja debe soportar los equipos del satélite con la masa especificada en cada caso. En el caso de la bandeja inferior, la 2ª masa usada en el apartado anterior para representar el resto de la estructura del satélite debe eliminarse para el ensamblaje del modelo del satélite, ya que ahora se modelarán estas partes de forma más realista.
- Vigas de sección L: Son vigas verticales que sostienen la estructura. Se unen a las bandejas en las esquinas.
- Paneles de cierre: Son láminas verticales que forman las 4 caras laterales del satélite. Se unen a las vigas y a los bordes de las bandejas.
- Equipos: Constituyen el conjunto de elementos no estructurales del satélite pero cuya masa debe tenerse en cuenta en los cálculos. Para ello, se deben modelizar como masas puntuales localizadas en las mismas posiciones especificadas anteriormente y unidas mediante elementos rígidos RBE2 a los nodos correspondientes de las bandejas. Sólo debe haber una masa puntual por cada bandeja (salvo para la bandeja D), y con la masa especificada en la primera fase de la práctica para cada grupo.
- Tornillos de IF. Se modelan mediante elementos CBUSH. Se deben usar los mismos elementos CBUSH que los usados con la bandeja inferior en el apartado anterior.

La estructura, por tanto, consiste en un prisma de sección cuadrada con una **altura de 600 mm** (sin contar con la longitud de los CBUSH). Las bandejas A y D constituyen las caras inferior y superior del satélite, mientras que las bandejas B y C se sitúan en posiciones intermedias (**a 200 y 400 mm respecto de la bandeja A respectivamente**). La interfaz del satélite, es decir, el conjunto de nodos donde el satélite se debe unir al sistema de separación, lo constituyen los nodos inferiores de los elementos CBUSH. En estos nodos se deben definir las condiciones de contorno correspondientes que sujetan a todo el satélite.



Para esta segunda parte, se debe **determinar las dimensiones de las vigas y de los paneles de cierre** para que el satélite cumpla con los de frecuencias propias:

- 1ª frecuencia lateral > 45 hz
- 1ª frecuencia longitudinal > 90 hz

Una vez finalizado el dimensionamiento de estas piezas, se debe analizar completamente la estructura resultante calculando:

- Los márgenes de seguridad de los valores máximos de tensiones de Von Mises en elementos 2D y de los valores máximos de tensiones (Maximum combined, minimum combined) de los elementos 1D (ver sección 4.3.14.4 del Manual de cálculo estructural) para cada caso de carga. Para visualizar las tensiones en Patran, tanto en elementos 2D como en 1D, se debe realizar con la siguiente definición:

Results=> Create=>Fringe

Averaging Definition:

Domain: None

Method: Derive/Average

Extrapolation: Centroid

- Los márgenes de seguridad de los tornillos (CBUSH) de la IF, teniendo en cuenta los resultados de fuerzas de cada análisis (multiplicados por el factor $K_M = 1.1$) y las siguientes características:

Material	Acero A286	As (m²)	3.661E-5
Métrica	M8	Φn	0.038
σy (MPa)	950	sfy	1.0
σu (MPa)	1100	sfu = sfg	1.4
τy (MPa)	548	μs	0.2
τu (MPa)	655	Fv,max (N)	21972.1
Mapp (Nm)	33.5	Fv,min (N)	13241.4
F_A	Resultado de fuerza axial de cada tornillo		F_Q Resultado de fuerza lateral de cada tornillo

Estos márgenes se deben calcular para cada tornillo (CBUSH) y para cada caso de carga (estático en cada eje, seno en cada eje y random en cada eje).

- Tensile total:

$$MoS_{tot,y} = \frac{A_s \sigma_y}{F_{V,max} + \Phi_n F_A sf_y} - 1$$

$$MoS_{tot,u} = \frac{A_s \sigma_u}{F_{V,max} + \Phi_n F_A sf_u} - 1$$

- Gapping:

$$MoS_g = \frac{F_{V,min}}{(1 - \Phi_n) F_A sf_g} - 1$$

- Sliding:

$$MoS_{slip} = \frac{(F_{V,min} - (1 - \Phi_n) F_A) \mu_s}{F_Q sf_{ult}} - 1$$

- Shear combined:

$$MoS_{comb,y} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{F_Q s f_y}{\tau_y A_s}\right)^2 + \left(\frac{F_{V,max} + \Phi_n F_A s f_y}{A_s \sigma_y}\right)^2}} - 1$$

$$MoS_{comb,u} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{F_Q s f_u}{\tau_u A_s}\right)^2 + \left(\frac{F_{V,max} + \Phi_n F_A s f_u}{A_s \sigma_u}\right)^2}} - 1$$

Se debe analizar los siguientes casos para la estructura completa del microsatélite:

- Chequeos
 - o Chequeo de carga gravitatoria
 - o Chequeo de frecuencias como sólido rígido
 - o Chequeo de energía de deformación
- Análisis estático

Análisis estático - Aceleraciones (g)		
X	Y	Z
6	6	13

Tabla 2-1: Especificaciones para el análisis estático

- Análisis de vibraciones sinusoidales

Eje	Rango de Frecuencia (Hz)	Aceleración
Longitudinal (Z)	4 - 6	25 mm
	6 - 100	3.75 g
Lateral (X, Y)	2 - 6	20 mm
	6 - 100	2.5 g

Tabla 2-2: Especificaciones para el análisis de vibraciones sinusoidales

- Análisis de vibraciones aleatorias

Eje	Rango de Frecuencia (Hz)	Aceleración
Longitudinal (Z)	20 - 2000	0.0727 g ² /hz
Lateral (X, Y)	20 - 2000	0.0727 g ² /hz

Tabla 2-3: Especificaciones para el análisis de vibraciones aleatorias

3 Resultados

3.1 Resultados del diseño de las bandejas

Cada alumno debe realizar un informe de forma individual detallando el proceso de diseño de la bandeja que haya diseñado. Por cada grupo, un alumno hará el informe del diseño de la bandeja

intermedia, mientras que el otro alumno realizará el informe de la bandeja inferior. Cada informe debe tener los siguientes apartados:

1. Introducción
2. Dimensionamiento de la bandeja
 - 2.1. Descripción de la bandeja
 - 2.1.1. Descripción de las distintas opciones
 - 2.2. Resultados de los análisis sobre la bandeja
 - 2.2.1. Proceso de optimización y comparación de resultados
Se debe incluir tablas comparando los resultados entre las distintas opciones
 - 2.2.2. Modos propios (de la opción elegida)
 - 2.2.3. Análisis estáticos (de la opción elegida)
3. Conclusiones

Para mostrar los resultados, se debe incluir tablas con los valores más determinantes (frecuencias propias, máximas tensiones de Von Mises y márgenes de seguridad), así como imágenes con los modos propios y con la distribución de tensiones sobre el modelo para cada caso de carga.

Además del informe, se debe entregar lo siguiente:

- Modelo Patran de la bandeja + equipo resultante.
- Archivo .bdf de la bandeja + equipo resultante.
- Cabeceros o archivos .bdf de análisis (modos propios y estáticos).

3.2 Resultados del análisis del microsatélite

Cada grupo debe realizar de forma conjunta un informe detallando la modelización y los resultados de la estructura del microsatélite, con los siguientes apartados:

1. Introducción
2. Análisis de la estructura del Microsatélite
 - 2.1. Descripción del modelo resultante
 - 2.2. Resultados de los análisis
 - 2.2.1. Chequeos
 - 2.2.2. Modos propios
 - 2.2.3. Análisis estáticos
 - 2.2.4. Análisis de vibraciones sinusoidales
 - 2.2.5. Análisis de vibraciones aleatorias
 - 2.2.6. Análisis de tornillos
3. Conclusiones

Para mostrar los resultados, se debe incluir tablas con los valores más determinantes (frecuencias propias, máximas tensiones de Von Mises y márgenes de seguridad), así como imágenes con los modos propios y con la distribución de tensiones sobre el modelo para cada caso de carga.

Además del informe, se debe entregar lo siguiente:

- Modelo Patran de la estructura del microsatélite.

- Archivo .bdf del microsatélite.
- Archivos de todos los cabeceros empleados en todos los análisis.

4 Evaluación de la práctica

Para evaluar esta práctica, se tendrá en cuenta los siguientes puntos (ordenados según la importancia):

- Conseguir modelos FEM que representen adecuadamente las geometrías de las estructuras.
- Conseguir que los modelos no presenten errores de modelización (errores en los elementos, fallos en la aplicación de propiedades, errores de sistema de unidades de medida empleado, zonas no unidas, etc...).
- Conseguir realizar adecuadamente todos los análisis propuestos.
- Conseguir obtener e interpretar adecuadamente los resultados obtenidos, incluyendo el cálculo de los márgenes de seguridad.
- Conseguir que las estructuras (tanto de la bandeja como la del microsatélite) cumplan con los requisitos estructurales impuestos (frecuencias propias y márgenes de seguridad positivos).
- Conseguir un diseño óptimo para la bandeja, es decir, minimizar la masa en lo máximo posible.
- Realizar un informe final mostrando todo el proceso de optimización, la descripción de los modelos FEM y todos los resultados solicitados de forma adecuada siguiendo el esquema indicado.