



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

DISEÑO Y MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE UN MICROSATÉLITE

PRÁCTICA 2

ESTRUCTURAS DE USO ESPACIAL

Autores: Rafael Luque López

Javier Vega Mateos

Grupo 11

MADRID, 7 DE JUNIO, 2021

Índice

1. Introducción	4
2. Documentos de referencia	4
3. Análisis de la estructura del Microsatélite	5
3.1. Descripción del modelo resultante	5
3.2. Resultados de los análisis	17
3.2.1. Chequeos	17
3.2.2. Modos propios	20
3.2.3. Análisis estáticos	24
3.2.4. Análisis de vibraciones sinusoidales	26
3.2.5. Análisis de vibraciones aleatorias	31
3.2.6. Análisis de tornillos	35
4. Conclusiones	42

Índice de Figuras

1. Vaciado interior de la bandeja en configuración triangular.	6
2. Malla final del modelo FEM de la <i>Bandeja A</i>	7
3. Malla final del modelo FEM de las bandejas B y C.	8
4. Sección L empleada en la construcción de los separadores.	9
5. Visualización 3D de los separadores junto a las bandejas.	10
6. Visualización 3D de tres de los cuatro paneles de cierre.	10
7. Visualización 3D de la Bandeja A con la masa puntual de 11 Kg sobre la bandeja.	13
8. Mallado de uno de los paneles de cierre de la estructura del microsatélite.	14
9. Visualización 3D del modelo FEM completo.	16
10. Visualización 3D del interior del modelo FEM completo	16
11. Modo 1. Vista frontal	21
12. Modo 1. Vista isométrica	22
13. Modo 4. Vista frontal	22
14. Modos 2 y 3 (Simétricos en direcciones x e y).	23
15. Modo 134. Vista en planta	24
16. Esfuerzos de Von Mises en los elementos 2D. Análisis estático lateral.	25
17. Esfuerzos de Von Mises en los elementos 2D. Análisis estático longitudinal.	25
18. Esfuerzos de flexión en elementos 1D. Análisis sinusoidal lateral. Caso de fallo 1	27
19. Esfuerzos de flexión en elementos 1D. Análisis sinusoidal longitudinal. Caso de fallo 2	28
20. Esfuerzos máximos de Von Mises en los elementos 2D. Análisis sinusoidal lateral.	29
21. Esfuerzos máximos (de flexión) en los elementos 1D. Análisis sinusoidal lateral.	29

22.	Esfuerzos máximos de Von Misses en los elementos 2D. Análisis sinusoidal longitudinal. . .	30
23.	Esfuerzos máximos (de flexión) en los elementos 1D. Análisis sinusoidal longitudinal. . . .	30
24.	Esfuerzos máximos sobre los elementos de tipo <i>CBEAM</i> . Análisis sinusoidal longitudinal, primera frecuencia propia.	31
25.	Visualización 3D de los esfuerzos 3-RMS sobre los rigidizadores ante el ensayo de vibraciones aleatorias lateral.	32
26.	Visualización 3D de los esfuerzos de Von Mises 3-RMS sobre los elementos bidimensionales ante el ensayo de vibraciones aleatorias lateral.	33
27.	Visualización 3D de los esfuerzos 3-RMS sobre los rigidizadores ante el ensayo de vibraciones aleatorias longitudinal.	33
28.	Visualización 3D de los esfuerzos de Von Mises 3-RMS sobre los elementos bidimensionales ante el ensayo de vibraciones aleatorias longitudinal.	34
29.	Resultados de esfuerzos 3-RMS en el eje longitudinal de los elementos <i>CBUSH</i> ante el barrido en frecuencias realizado en el análisis de vibraciones aleatorias longitudinal. Eje de ordenadas en Pa.	34
30.	Resultados de esfuerzos 3-RMS en el eje longitudinal de los elementos <i>CBUSH</i> ante el barrido en frecuencias realizado en el análisis de vibraciones aleatorias lateral. Eje de ordenadas en Pa.	35
31.	Numeración de los tornillos y de los nodos inferiores de los elementos <i>CBUSH</i>	36

Índice de Tablas

1.	Valores geométricos característicos de la <i>Bandeja A</i> que han sufrido modificaciones.	7
2.	Valores geométricos característicos de la bandejas B, C y D.	8
3.	Valores geométricos característicos de la sección L.	9
4.	Propiedades de los separadores verticales de sección en L.	9
5.	Propiedades de los materiales empleados en el estudio.	11
6.	Constantes de rigidez de la propiedad PBUSH.	12
7.	Elementos que forman el modelo FEM de la Bandeja A.	14
8.	Elementos que forman el modelo FEM de la Bandeja B.	14
9.	Elementos que forman el modelo FEM de la Bandeja C.	15
10.	Elementos que forman el modelo FEM de la Bandeja D.	15
11.	Elementos que forman el modelo FEM de los separadores verticales.	15
12.	Elementos que forman el modelo FEM de los paneles de cierre del microsatélite.	15
13.	Inventario de masas del modelo FEM realizado	15
14.	Requisitos estructurales impuestos a la estructura.	17
15.	Resultante de fuerzas aplicadas	18
16.	Resultante de fuerzas de reacción	18
17.	Desplazamientos máximos	18

18.	Modos de sólido libre	19
19.	Resultado del chequeo para G-SET	20
20.	Resultado del chequeo para N-SET	20
21.	Fracción de masa modal efectiva de los primeros 20 modos propios en los grados de libertad de traslación.	21
22.	Fracción de masa modal efectiva de los primeros 20 modos propios en los grados de libertad de Rotación.	23
23.	Aceleraciones del análisis estático	24
24.	Márgenes de seguridad del análisis estático lateral	25
25.	Márgenes de seguridad del análisis estático longitudinal	26
26.	Especificaciones para el análisis de vibraciones sinusoidales	26
27.	Aceleración de 2 a 6 Hz para el caso lateral	26
28.	Aceleración de 4 a 6 Hz para el caso longitudinal	27
29.	Resultados del análisis sinusoidal. Márgenes de seguridad obtenidos.	28
30.	Especificaciones para el análisis de vibraciones aleatorias.	31
31.	Resultados del análisis de vibraciones aleatorias. Márgenes de seguridad obtenidos.	32
32.	Propiedades de los tornillos	35
33.	Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga estático en dirección x.	37
34.	Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga estática en dirección x.	37
35.	Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga estático en dirección y.	37
36.	Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga estática en dirección y.	38
37.	Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga estático en dirección z.	38
38.	Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga estática en dirección z.	39
39.	Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga seno en dirección lateral.	39
40.	Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga seno en dirección lateral.	40
41.	Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga seno en dirección longitudinal.	40
42.	Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga seno en dirección longitudinal.	40
43.	Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga random en dirección lateral.	41
44.	Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga random en dirección lateral.	41
45.	Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga random en dirección longitudinal.	42
46.	Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga random en dirección longitudinal.	42

1. Introducción

En este informe se recoge el proceso de diseño, modelización y análisis de la estructura de un microsatélite mediante el método de elementos finitos (FEM). Todo el trabajo y los resultados recogidos en este informe se han obtenido y desarrollado empleando las versiones estudiantiles de los programas MSC Patran y MSC Nastran.

En este informe se da continuación al trabajo previamente desarrollado de manera independiente e individual por los dos autores en dos trabajos de la asignatura Estructuras de Uso Espacial. En dichos trabajos previos se realizó el diseño y optimización de la bandeja inferior del satélite, [1], y de las bandejas intermedias, [2].

En la elaboración de este trabajo se han empleado como referencias bibliográficas el libro "Manual de cálculo estructural", [3], de Andrés García Pérez y Jorge Javier Fernández de Toro Espejel, así como los documentos anexos a este. Además el documento "MSC Nastran 2013.1.1 - Quick Reference Guide" [4] ha servido también como material de consulta para la interpretación, creación y modificación de archivos *.bdf* y *.dat* entre otros.

2. Documentos de referencia

Referencias

- [1] J. V. Mateos, Práctica 2. Diseño y modelización de la estructura de un microsatélite. Parte 2.1: Bandeja Inferior.
- [2] R. L. López, Diseño y modelización de la estructura de un microsatélite, Parte 2.1: Bandejas intermedias.
- [3] A. G. P. . J. J. F. de Toro Espejel, Manual de cálculo estructural, Instituto de microgravedad Ignacio Da Riva.
- [4] M. Software, MSC Nastran 2013.1.1 - Quick Reference Guide.

3. Análisis de la estructura del Microsatélite

En esta sección se expone la estructura del microsatélite diseñada. Se define su geometría y su modelo de elementos finitos, así como las modificaciones realizadas al diseño para garantizar el cumplimiento de los requisitos.

Del mismo modo, se recogen los resultados de los análisis realizados sobre el diseño final de la estructura. Y con ellos, los márgenes de seguridad obtenidos en cada caso.

3.1. Descripción del modelo resultante

En este apartado se describe tanto la geometría como el modelo FEM resultante del proceso de diseño desarrollado.

La estructura del microsatélite diseñada en este trabajo consta de 4 bandejas horizontales de planta cuadrada y vaciado triangular, A, B, C y D, siendo las tres últimas iguales entre si. Cada una de las bandejas A, B, y C montan un equipo de 11 kg de peso y dimensiones desconocidas hasta el momento. La bandeja A se une al adaptador del separador del lanzador mediante 12 uniones atornilladas. Las bandejas están unidas por 4 separadores verticales de sección en L ubicados en las esquinas. La estructura la completan 4 paneles que confieren al satélite una forma cúbica. Estos paneles alojan en sus caras exteriores los dispositivos fotovoltaicos necesarios para suministrar energía al satélite.

Como ya se ha dicho en el Apartado 1, este informe supone una continuación de los diseños realizados anteriormente para las bandejas intermedias y para la bandeja inferior. Por este motivo se considera oportuno comenzar con la descripción de las bandejas y la explicación de los cambios de diseño que han sufrido. En aras de la claridad, en adelante la bandeja inferior será denominada *Bandeja A* y las bandejas intermedias y superior serán denominadas *Bandeja B*, *Bandeja C* y *Bandeja D*, en orden ascendente a lo largo del eje longitudinal del satélite. Estas tres últimas bandejas cuentan con el mismo diseño, y por tanto, su descripción se abordará de manera conjunta.

Todas las bandejas cuentan con el mismo tipo de vaciado, un vaciado triangular. Sin embargo, como ya se justificó en los informes anteriores, la densidad de los rigidizadores interiores es superior en el caso de la Bandeja A por su mayor sollicitación estructural. En la Figura 1 se puede ver un ejemplo de vaciado triangular igual al empleado en las bandejas B, C y D. Todas las bandejas están fabricadas en AL-7075.

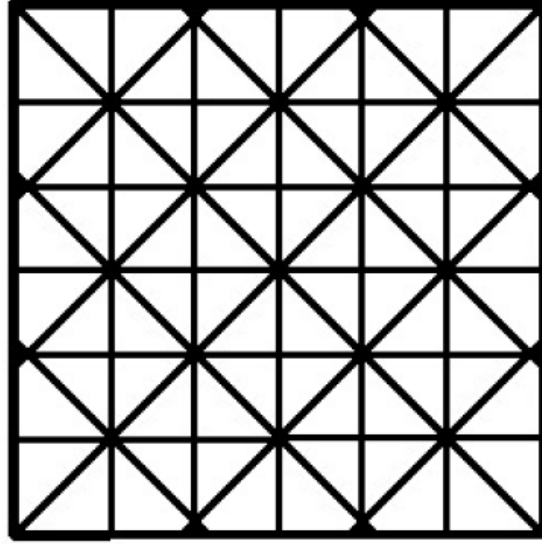


Figura 1: Vaciado interior de la bandeja en configuración triangular.

Se comienza detallando los cambios realizados en la Bandeja A, así como la justificación de los mismos. En primer lugar se realizó una reducción del número de nodos de la bandeja, para ello se borraron tanto la malla como la semilla de malla empleadas y fueron sustituidas por unas configuraciones de menor densidad nodal. Este cambio está justificado principalmente por el uso de la licencia estudiantil, que está limitada a un valor máximo de 5000 nodos por modelo, número que se superaba significativamente al realizar el primer montaje de toda la estructura. Del mismo modo, el valor alcanzado inicialmente, 6612 nodos, hacía el modelo innecesariamente pesado para su análisis. Con esta modificación la Bandeja A pasó de tener 1675 nodos a 754.

El siguiente cambio realizado en la Bandeja A ha consistido en modificar la altura y espesor de los rigidizadores exteriores, manteniendo la forma rectangular de su sección. Este cambio venía suscitado por las indicaciones dadas por el profesor de la asignatura en el anterior informe. Del mismo modo se ha podido comprobar la conveniencia de este cambio en términos estructurales a la hora de realizar los análisis. Inicialmente estos rigidizadores tenían un espesor de 0,5 mm y una altura de 0,5 mm. En el modelo final, los rigidizadores exteriores cuentan con un espesor de 1 mm y una altura de 15 mm.

El último cambio realizado en la bandeja inferior fue un aumento del espesor de los rigidizadores interiores. El objetivo de este cambio era aliviar las tensiones soportadas por estos rigidizadores, que alcanzaban márgenes de seguridad negativos en el análisis sinusoidal lateral, esto se comenta en mayor profundidad en el Apartado 3.2.4.

Tras realizar estos cambios se ha alcanzado el modelo FEM mostrado en la Figura 2 y caracterizado geométricamente por los valores recogidos en la Tabla 1, donde H_{in} y H_{out} , son las alturas de los rigidizadores interiores y exteriores, respectivamente, y W_{in} y W_{out} son sus espesores. El espesor de la bandeja no ha sido modificado y continua siendo de 0,5 mm.

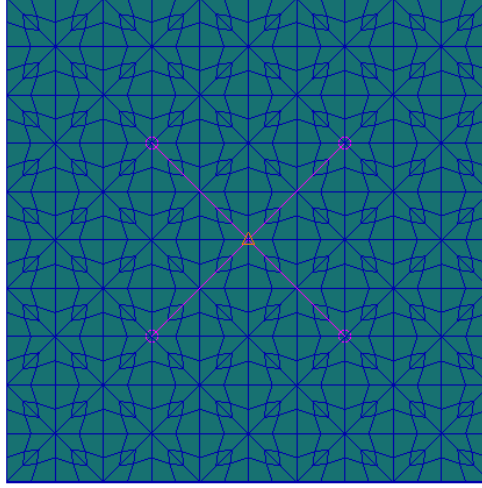


Figura 2: Malla final del modelo FEM de la *Bandeja A*.

En la Figura 2 se puede apreciar claramente la reducción de la densidad tanto de nodos como de elementos respecto a la bandeja resultante del trabajo presentado en el anterior informe.

Tabla 1: Valores geométricos característicos de la *Bandeja A* que han sufrido modificaciones.

	Rigidizadores interiores		Rigidizadores exteriores		Masa [kg]
	H_{in} [m]	W_{in} [m]	H_{out} [m]	W_{out} [m]	
Bandeja A	0,03	0,00135	0,03	0,001	2,26

En la Tabla 1 se puede ver como a consecuencia de los cambios geométricos realizados la masa de la bandeja ha aumentado significativamente respecto a la presentada en el anterior informe. Se ha pasado de una bandeja de 1,6 kg a una de 2,26 kg. Este aumento de la masa se considera razonable debido a que la Bandeja A se optimizó atendiendo a unas especificaciones, unos análisis y un montaje distinto.

En cuanto a las bandejas B, C y D, todas ellas sufrieron algunas modificaciones similares a las comentadas en la bandeja A. Concretamente se realizaron también mallas menos densas para reducir el número de nodos, pasando de 1129 nodos por bandeja a 613. De este modo se consiguió reducir los nodos totales del modelo FEM del satélite desde los 6612 iniciales hasta los 3567 del modelo final. Esta reducción se debe tanto a la propia reducción de los nodos de las bandejas como a la reducción de los nodos de los paneles de cierre, dependientes de las semillas de malla de las bandejas.

Además se han realizado modificaciones en las alturas tanto de los rigidizadores interiores como exteriores y en el espesor de los rigidizadores interiores. La modificación en los rigidizadores exteriores se justifica del mismo modo que en el caso de la bandeja A. En el caso de los rigidizadores interiores, la modificación atiende a los resultados obtenidos en el análisis sinusoidal en el eje longitudinal, donde se obtuvieron valores de márgenes de seguridad negativos en los rigidizadores interiores de las bandejas B y

C. Los resultados de este análisis se comentan en mayor profundidad en el Apartado 3.2.4. En la Tabla 2 se recogen los valores de altura y ancho de los rigidizadores tanto interiores como exteriores de las bandejas B, C y D, así como la masa de cada una de esas bandejas. Al igual que en la bandeja A, el valor del espesor de las bandejas B, C y D no ha sido modificado y sigue siendo de 0,5 mm. Se puede apreciar en la tabla que el valor de la masa de cada una de las bandejas ha aumentado desde los 0,731 kg hasta un valor de 1,08 kg por bandeja. En el caso de la bandeja D se podría haber optado por un diseño más ligero, ya que esta bandeja está sometida a menores solicitaciones estructurales. Sin embargo, atendiendo a lo indicado en el enunciado, se ha empleado el mismo modelo para las bandejas B, C y D.

Tabla 2: Valores geométricos característicos de la bandejas B, C y D.

	Rigidizadores interiores		Rigidizadores exteriores		Masa [kg]
	H_{in} [m]	W_{in} [m]	H_{out} [m]	W_{out} [m]	
Bandejas B, C y D	0,025	0,001	0,03	0,0005	1,08

La última modificación realizada ha consistido en modelizar las uniones de las masas de las bandejas B y C en puntos más interiores de las bandejas. Cabe destacar que los puntos de unión de los equipos con las bandejas en una situación real vendrían en parte determinadas por las dimensiones del equipo. Dado que las dimensiones de los equipos son en este punto desconocidas, se ha decidido hacer esta modificación que ha mejorado el comportamiento ante algunos análisis y que resulta más realista en cuanto a dimensiones que el diseño anterior. En la Figura 3 se puede ver el modelo FEM de las bandejas B y C, se puede apreciar la reducción en el número de nodos respecto al modelo presentado en el informe anterior y el cambio de situación de las uniones de los equipos con las bandejas. En el caso de la bandeja D, el modelo FEM es igual pero sin incluir la masa de los equipos.

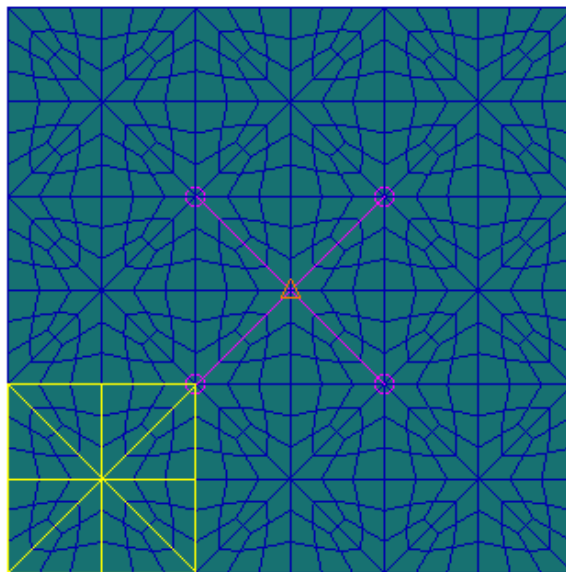


Figura 3: Malla final del modelo FEM de las bandejas B y C.

Una vez comentadas las modificaciones realizadas en las bandejas para cumplir con todos los requisitos estructurales especificados en el enunciado, se pasa a describir la geometría y la forma de modelar mediante FEM el resto de la estructura.

El siguiente elemento empleado en la construcción del satélite son los separadores verticales de sección en L. Se trata de barras verticales de 600 mm de longitud y de sección en L como la mostrada en la Figura 4. Las características geométricas de la sección empleada se recogen en la Tabla 3.

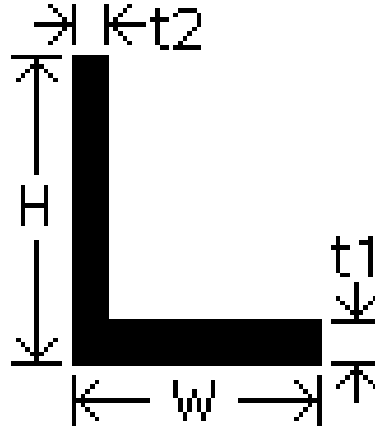


Figura 4: Sección L empleada en la construcción de los separadores.

Tabla 3: Valores geométricos característicos de la sección L.

	H	W	t_1	t_2
Separadores	0,03	0,03	0,0052	0,0052

A la hora de realizar el modelo FEM de esta parte de la estructura es de especial importancia conocer la orientación adecuada de los mismos, siendo la de cada uno de los cuatro distinta al del resto. Por este motivo se crean cuatro propiedades distintas cuyas características más importantes se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4: Propiedades de los separadores verticales de sección en L.

Nombre	Material	Sección	Orientación
1D_Al7075_Lbar_xn_yn	Al-7075	Seccion_L	<1 0 0 >
1D_Al7075_Lbar_xn_yp	Al-7075	Seccion_L	<0 -1 0 >
1D_Al7075_Lbar_xp_yn	Al-7075	Seccion_L	<0 1 0 >
1D_Al7075_Lbar_xp_yp	Al-7075	Seccion_L	<-1 0 0 >

En la Figura 5 se muestra el montaje de los separadores junto con las 4 bandejas. Se puede apreciar como las orientaciones recogidas en la tabla anterior son las correctas y como todas las secciones en L tienen su ángulo recto interno coincidente con los ángulos rectos de las esquinas de las bandejas.

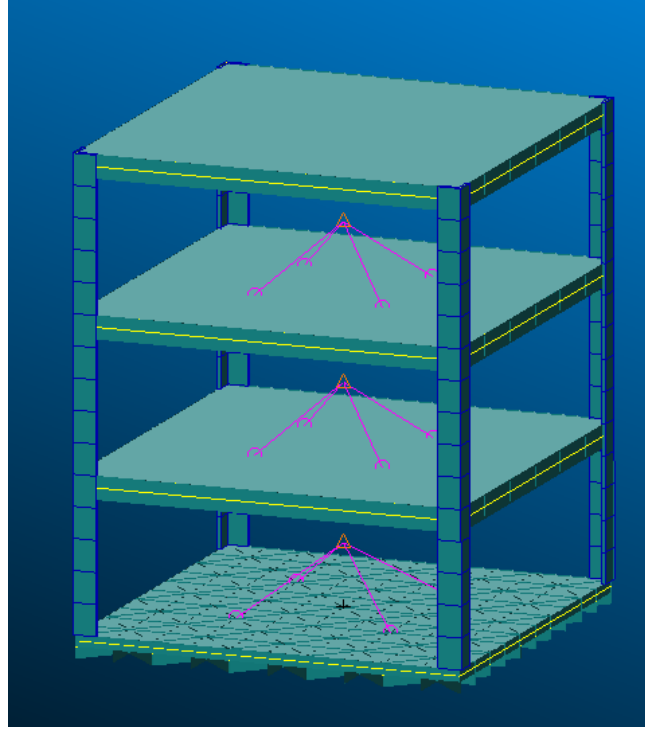


Figura 5: Visualización 3D de los separadores junto a las bandejas.

Las siguientes partes constituyentes de la geometría del microsatélite son los paneles de cierre, los cuales consisten en placas rectangulares de AL-7075 de 600 mm de altura, 500 mm de ancho y 1,5 mm de espesor. En estos paneles se ubican los paneles solares, cuya masa será tomada en cuenta a través de un añadido de masa no estructural en los paneles. Concretamente se fija un valor de masa no estructural de 4 kg/m^2 . En la Figura 6 se muestran tres de los cuatro paneles de cierre.

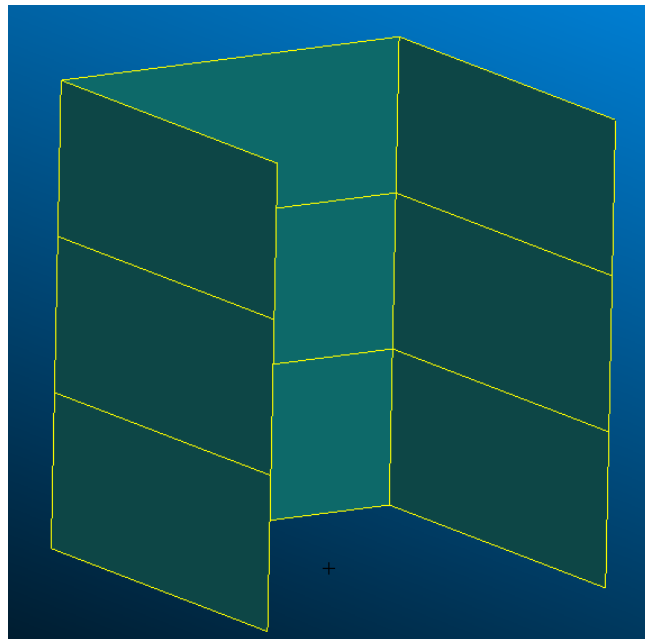


Figura 6: Visualización 3D de tres de los cuatro paneles de cierre.

Una vez detallada la geometría de todos los componentes del microsatélite se pasa a describir el modelo FEM que se ha creado y empleado para el análisis.

Dado que todo el microsatélite está construido en la misma aleación, en aluminio Al 7075-T6, solamente ha sido necesario crear un material en Patran. En la Tabla 5 se recogen las propiedades de esta aleación de aluminio.

Tabla 5: Propiedades de los materiales empleados en el estudio.

Propiedades	Al 7075
Densidad [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	2800
Módulo elástico [Pa]	$7,10 \cdot 10^{10}$
Coefficiente de poisson	0,33
Límite elástico [Pa]	$4,34 \cdot 10^8$
Resistencia última [Pa]	$5,10 \cdot 10^8$
Coefficiente de expansión térmica [K]	$2,20 \cdot 10^{-5}$
Temperatura de referencia [K]	293

A pesar de que este es el único material que se ha creado en Patran, cabe mencionar que en las uniones atornilladas que unen la bandeja inferior con el adaptador se emplean tonillos de métrica 8 fabricados en Acero A286.

El siguiente punto importante en la creación del modelo FEM en MSC Patran es la creación de las propiedades que se aplicarán posteriormente a los distintos elementos que conforman el modelo. Las propiedades creadas para este modelo FEM ordenadas por su tipo son:

- **PSHELL:** Propiedades 2D que se aplican a los elementos bidimensionales del modelo. Se emplean elementos bidimensionales en tanto en las bandejas como en los paneles de cierre. Se crean 3 propiedades distintas, una para la bandeja A, otra para las bandejas B, C y D, y por último una para los paneles de cierre. Las propiedades en cuestión son:
 - **2D_Al7075_Bandeja_A_0p5mm:** Propiedad de tipo *2D-SHELL* de 0,5 mm de espesor empleada en la bandeja A.
 - **2D_Al7075_Bandeja_BCD_0p5mm:** Propiedad de tipo *2D-SHELL* de 0,5 mm de espesor empleada en las bandejas B, C y D.
 - **2D_Al7075_Panel_1p5mm:** Propiedad de tipo *2D-SHELL* de 1,5 mm de espesor empleada en los paneles de cierre. Además de la masa debida a su densidad y geometría, en esta propiedad se ha añadido una masa no estructural de 4 kg/m^2 para tener en cuenta la masas de los paneles solares.
- **PBARL:** Propiedades 1D que se aplican a los elementos que modelizan los rigidizadores tanto interiores como exteriores de las bandejas. Se crean cuatro propiedades de este tipo, dos de ellas destinada a los rigidizadores de la bandeja A y las otras dos destinadas a los rigidizadores de las bandejas B, C y D. A continuación se recogen estas cuatro propiedades:

- **1D_Al7075_Rig.out:** Propiedad de tipo *PBARL* de sección rectangular de 15 mm de altura y 1 mm de ancho y denominada *Secc_Rect_15x1mm* en MSC Patran. Esta propiedad se aplica en los elementos que modelizan los rigidizadores exteriores de la bandeja A.
 - **1D_Al7075_Rig.int:** Propiedad de tipo *PBARL* de sección rectangular de 30 mm de altura y 1,35 mm de ancho y denominada *Secc_Rect_30x1p35mm* en MSC Patran. Esta propiedad se aplica en los elementos que modelizan los rigidizadores interiores de la bandeja A.
 - **1D_Exteriores:** Propiedad de tipo *PBARL* de sección rectangular de 30 mm de altura y 0,5 mm de ancho y denominada *Secc_Rect_30x0p5mm_Band_B* en MSC Patran. Esta propiedad se aplica en los elementos que modelizan los rigidizadores exteriores de las bandejas B, C y D.
 - **1D_Interiores:** Propiedad de tipo *PBARL* de sección rectangular de 25 mm de altura y 1 mm de ancho y denominada *Secc_Rect_25x1mm_Band_B* en MSC Patran. Esta propiedad se aplica en los elementos que modelizan los rigidizadores interiores de las bandejas B, C y D.
- **PBEAML:** Propiedades 1D que se aplica a los elementos que modelizan los separadores verticales de sección L. Se crean cuatro propiedades de este tipo, cada una de ellas destinada a los elementos que modelizan uno de los separadores. Estas propiedades ya han sido recogidas en la Tabla 4.
 - **PBUSH:** Propiedad con la que se define la rigidez de los elementos CBUSH que se emplean para representar las uniones atornilladas que unen la bandeja con el separador del lanzador. Se le asigna el nombre “1D_CBUSH_IF” y las propiedades recogidas en la Tabla 6.

Tabla 6: Constantes de rigidez de la propiedad PBUSH.

1D_CBUSH_IF	K_1 [N·m]	K_2 [N·m]	K_3 [N·m]	K_4 [N·m·rad ⁻¹]	K_5 [N·m·rad ⁻¹]	K_6 [N·m·rad ⁻¹]
	$1,00 \cdot 10^9$	$1,00 \cdot 10^9$	$1,00 \cdot 10^9$	100	$1,00 \cdot 10^7$	$1,00E \cdot 10^7$

Tras crear las propiedades que se emplean en el modelo FEM se procede a la creación de los elementos. Comenzando por las bandejas, como ya se ha dicho anteriormente, se ha decidido rehacer la malla para obtener un menor número de nodos. Se crean dos semillas de malla de menor densidad que las anteriores, y con ellas se realiza el mallado de la superficie de las bandejas empleando para ello elementos *CQUAD4* con la propiedad correspondiente de las tipo *PSHELL* comentadas con anterioridad. Por la geometría de las bandejas y la semilla de malla empleada, en la creación de esta malla se han creado también algunos elementos *CTRIA3*.

Los rigidizadores de las bandejas se crean empleando elementos de tipo *CBAR* con la propiedad correspondiente de las creadas en MSC Patran. Se continua con la modelización de los equipos que se montan sobre las bandejas A, B y C. Estos equipos se representan en el modelo FEM mediante masas puntuales de 11 kg, que se unen a cada una de las bandejas mencionadas en cuatro nodos que forman un cuadrado sobre la estructura de la bandeja. Esta modelización se realiza empleando elementos de tipo *CONM2*, que representan las masas puntuales, unidos a las bandejas mediante elementos rígidos de tipo *RBE2*. En

la Figura 7 se puede ver el modelo FEM resultante de la bandeja A.

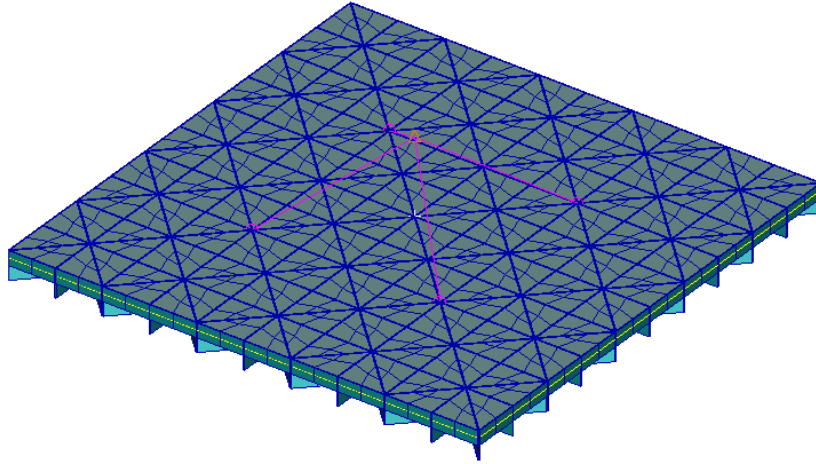


Figura 7: Visualización 3D de la Bandeja A con la masa puntual de 11 Kg sobre la bandeja.

Por último, en la modelización de las bandejas sólo resta la representación de las uniones de la bandeja A con el adaptador del separador del vehículo lanzador. Estas uniones se modelizan mediante 12 elementos de tipo *CBUSH* situados de manera que formen aproximadamente un círculo y de manera que coincidan con puntos de cruce entre rigidizadores. A estos elementos se les aplica la propiedad de tipo *PBUSH* creada anteriormente.

Finalizado el diseño del modelo FEM de las bandejas se procede a modelizar los separadores verticales de sección L. Estos serán modelados con elementos de tipo *CBEAM* con la correspondiente propiedad asociada a cada uno de los separadores en función de su ubicación en el satélite. Para la creación de estos elementos se crea una semilla de malla en cuatro rectas de tres tramos cada una de las cuales une la esquina de cada bandeja con la esquina correspondiente de su bandeja superior. De este modo se han creado en total 60 elementos de tipo *CBEAM*, 15 para modelar cada uno de los separadores.

Por último, para finalizar el modelo FEM completo sólo resta modelar los paneles de cierre. Estos paneles se han representado empleando elementos de tipo *CQUAD4* con la propiedad *2D-Al7075-Panel-1p5mm* asociada. Para la creación de la malla de los paneles de cierre se han empleado las mallas heredadas de los separadores y de las bandejas A y B. De este modo, se emplea la semilla de malla de los separadores como semilla de malla de los contornos verticales de los paneles. Por su parte, dado que las bandejas A y B no tienen el mismo número de nodos en sus bordes, se toman las semillas de malla de ambas bandejas. Se realiza un mallado en las secciones de los paneles entre las bandejas A y B, y otro mallado que emplea como semilla de malla los nodos del borde de la bandeja B y cubre hasta el final del panel de cierre. En la Figura 8 se puede ver la malla resultante de cada uno de los paneles de cierre.

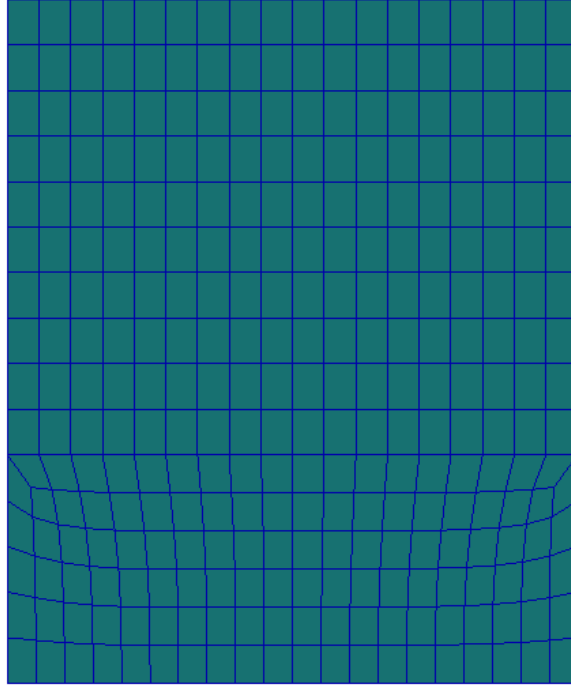


Figura 8: Mallado de uno de los paneles de cierre de la estructura del microsatélite.

Con la modelización de los paneles de cierre queda finalizado el modelos FEM del microsatélite. En las Tablas 7, 8, 9, 10, 11 y 12 se recoge un resumen de todos los elementos que componen el modelo FEM.

Tabla 7: Elementos que forman el modelo FEM de la Bandeja A.

ID	Número de elementos	Tipo	Propiedad
1000-1798,4659	200/600	2D-CTRIA3/2D-CQUAD4	PSHELL - 2D_Al7075_Bandeja_A_0p5mm
1799-1878	80	1D-CBAR	PBARL - 1D_Al7075_Rig_out
1879-2538	660	1D-CBAR	PBARL - 1D_Al7075_Rig_int
4000	1	0D-CONM2	-
4001	1	RBE2	-
1-12	12	1D-CBUSH	PBUSH - 1D_CBUSH_IF

Tabla 8: Elementos que forman el modelo FEM de la Bandeja B.

ID	Número de elementos	Tipo	Propiedad
55379-55954	576	2D-CQUAD4	PSHELL - 2D_Al7075_Bandeja_BCD_0p5mm
54983-55054	72	1D-CBAR	PBARL - 1D_Exteriores
55055-55378	324	1D-CBAR	PBARL - 1D_Interiores
55955	1	0D-CONM2	-
59101	1	RBE2	-

Tabla 9: Elementos que forman el modelo FEM de la Bandeja C.

ID	Número de elementos	Tipo	Propiedad
56352-56927	576	2D-CQUAD4	PSHELL - 2D_Al7075_Bandeja_BCD_0p5mm
55956-56027	72	1D-CBAR	PBARL - 1D_Exteriores
56028-56351	324	1D-CBAR	PBARL - 1D_Interiores
56928	1	0D-CONM2	-
59102	1	RBE2	-

Tabla 10: Elementos que forman el modelo FEM de la Bandeja D.

ID	Número de elementos	Tipo	Propiedad
57325-57900	576	2D-CQUAD4	PSHELL - 2D_Al7075_Bandeja_BCD_0p5mm
56929-57000	72	1D-CBAR	PBARL - 1D_Exteriores
57001-57324	324	1D-CBAR	PBARL - 1D_Interiores

Tabla 11: Elementos que forman el modelo FEM de los separadores verticales.

ID	Número de elementos	Tipo	Propiedad
70000-70014	15	1D-CBEAM	PBEAML - 1D_Al7075_Lbar_xn_yn
70015-70029	15	1D-CBEAM	PBEAML - 1D_Al7075_Lbar_xn_yp
70030-70044	15	1D-CBEAM	PBEAML - 1D_Al7075_Lbar_xp_yn
70045-70059	15	1D-CBEAM	PBEAML - 1D_Al7075_Lbar_xp_yp

Tabla 12: Elementos que forman el modelo FEM de los paneles de cierre del microsatélite.

ID	Número de elementos	Tipo	Propiedad
80000-81191	1192	2D-CQUAD4	PSHELL - 2D_Al7075_Panel_1p5mm

En la Tabla 13 se recoge el inventario de masas del modelo del diseño final del microsatélite realizado.

Tabla 13: Inventario de masas del modelo FEM realizado

Componente	Masa [kg]
Bandeja A	2,26
Bandeja B	1,081
Bandeja C	1,081
Bandeja D	1,081
Separadores	0,479 (cada uno)
Paneles de cierre	2,46 (cada uno)
Equipo A	11
Equipo B	11
Equipo C	11
Total	50,26

Para finalizar este apartado, en las Figuras 9 y 10 se muestran dos visualizaciones 3D del modelo FEM

completo.

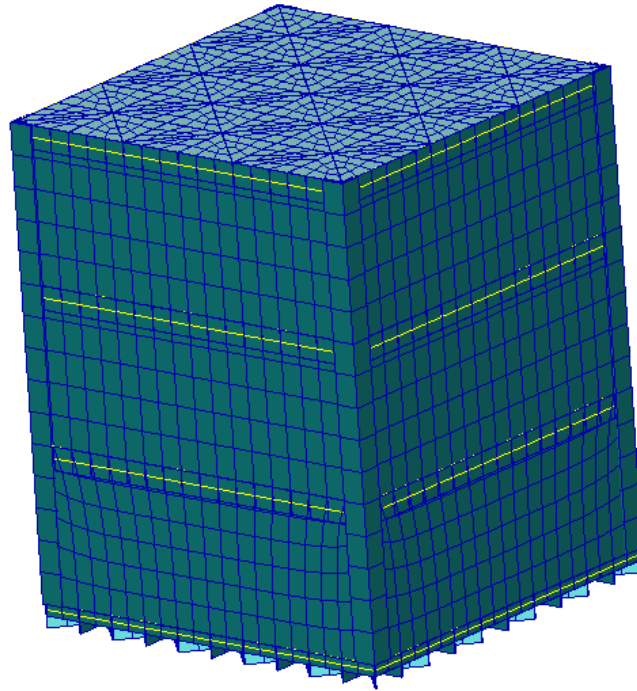


Figura 9: Visualización 3D del modelo FEM completo.

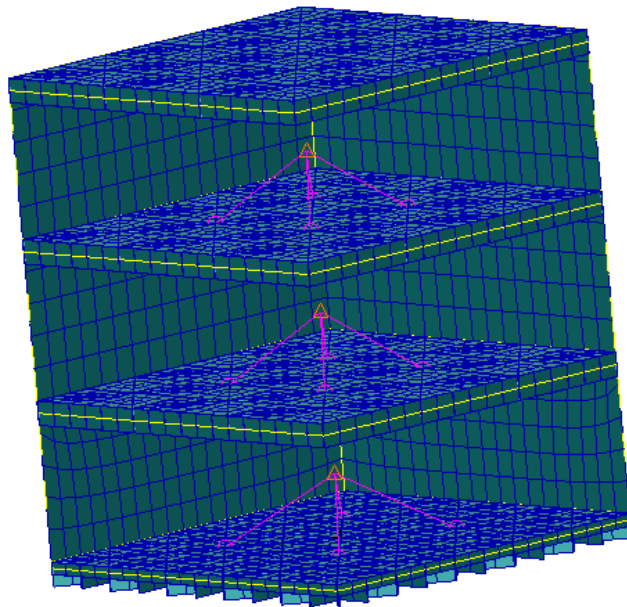


Figura 10: Visualización 3D del interior del modelo FEM completo

3.2. Resultados de los análisis

En los siguientes apartados se recogen los distintos análisis a los que ha sido sometida la estructura del microsatélite para asegurar el cumplimiento de los requisitos, así como los resultados obtenidos en los distintos análisis. En la búsqueda del cumplimiento de los requisitos el modelo ha sufrido algunas modificaciones geométricas que han acabado conduciendo hasta el modelo final explicado en el Apartado 3.1.

Los requisitos estructurales impuestos a la estructura del microsatélite se recogen en la Tabla 14.

Tabla 14: Requisitos estructurales impuestos a la estructura.

Requisitos	Valor
Frecuencias propias laterales	$f_{lat} > 45$ Hz
Frecuencias propias longitudinales	$f_{long} > 90$ Hz
Margenes de seguridad	$MoS_i > 0$

Para el cálculo de los márgenes de seguridad se emplean las siguientes expresiones:

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

$$MoS_u = \left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_{VM \text{ máx}} \times K_p \times K_M \times K_{LD} \times FOSU} \right) - 1, \quad (2)$$

donde, K_p es el factor de proyecto, K_M el factor del modelo, K_{LD} el factor de diseño local, $FOSY$ el factor de seguridad del límite elástico y $FOSU$ el factor de seguridad de la carga última.

Se debe asegurar también que los márgenes de seguridad de las uniones atornilladas son aceptables. La forma de calcular estos márgenes se explica en profundidad en el Apartado 3.2.6, donde también se recogen los resultados de los márgenes de seguridad y de las fuerzas sufridas por las uniones atornilladas ante los diferentes tipos de análisis desarrollados.

Antes de realizar los análisis estructurales solicitados en el enunciado se deben realizar una serie de chequeos al modelo FEM. Por tanto, los siguientes apartados cubren tanto estos chequeos previos como los análisis realizados a la estructura.

3.2.1. Chequeos

Los chequeos o comprobaciones del modelo se deben realizar después de crear el modelo y antes de realizar cualquier análisis. El propósito de estas comprobaciones es detectar cualquier tipo de error que pueda haber surgido en la modelización y que puede desembocar en la obtención de resultados erróneos.

Chequeo de carga gravitatoria

Se realiza un análisis estático al modelo con las condiciones de contorno incluidas. El análisis se realiza con un valor pequeño (1 m/s^2) en cada una de las tres direcciones principales. De los resultados obtenidos se comprueba:

- La resultante de las fuerzas aplicadas es igual en módulo pero con cambio de signo a la resultante de las fuerzas de reacción.
- La resultante de las fuerzas en cada eje es igual a la masa del modelo, multiplicada por la aceleración aplicada.
- Los valores máximos de los desplazamientos son valores con un orden de magnitud acorde a la carga aplicada. En caso de que aparezcan valores inusualmente altos, puede ser debido a zonas con una rigidez muy baja y que deba ser corregida.

A continuación, en las Tablas 15 y 16, se recogen los resultados obtenidos para las cargas aplicadas y fuerzas de reacción tras realizar el análisis.

Tabla 15: Resultante de fuerzas aplicadas

	T1	T2	T3	R1	R2	R3
FX [N]	$5,03 \cdot 10^1$	-	-	-	$1,41 \cdot 10^1$	$-1,20 \cdot 10^{-5}$
FY [N]	-	$5,03 \cdot 10^1$	-	$-1,41 \cdot 10^1$	-	$1,20 \cdot 10^{-5}$
FZ [N]	-	-	$5,03 \cdot 10^1$	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$-1,20 \cdot 10^{-5}$	-
MX [N·m]	-	-	-	$6,19 \cdot 10^{-2}$	-	-
MY [N·m]	-	-	-	-	$-6,19 \cdot 10^{-2}$	-
MZ [N·m]	-	-	-	-	-	$-2,06 \cdot 10^{-14}$
TOTALS	$5,03 \cdot 10^1$	$5,03 \cdot 10^1$	$5,03 \cdot 10^1$	$-1,40 \cdot 10^1$	$1,40 \cdot 10^1$	$4,66 \cdot 10^{-13}$

Tabla 16: Resultante de fuerzas de reacción

TYPE	T1	T2	T3	R1	R2	R3
FX [N]	$-5,03 \cdot 10^1$	-	-	-	1,01	$2,02 \cdot 10^{-6}$
FY [N]	-	$-5,03 \cdot 10^1$	-	-1,01	-	$-1,99 \cdot 10^{-6}$
FZ [N]	-	-	$-5,03 \cdot 10^1$	$1,27 \cdot 10^1$	$-1,27 \cdot 10^1$	-
MX [N·m]	-	-	-	2,30	-	-
MY [N·m]	-	-	-	-	-2,30	-
MZ [N·m]	-	-	-	-	-	$-3,54 \cdot 10^{-8}$
TOTALS	$-5,03 \cdot 10^1$	$-5,03 \cdot 10^1$	$-5,03 \cdot 10^1$	$1,40 \cdot 10^1$	$-1,40 \cdot 10^1$	$-9,73 \cdot 10^{-13}$

Puede comprobarse que las resultantes de cargas aplicadas y fuerzas de reacción son iguales y de signo contrario, verificando el primer punto del chequeo. A continuación, se obtiene mediante Patran la masa total del modelo, que es de 50,3 kg, con lo que se comprueba también que las fuerzas resultantes en cada dirección se corresponden a la masa del modelo al aplicar la aceleración de 1 m/s^2 en cada una de estas direcciones.

Para finalizar este chequeo, se analizan los desplazamientos máximos, recogidos en la Tabla 17. Tal y como se ve en la tabla, el orden de magnitud de estos desplazamientos es muy pequeño, de forma acorde a la carga aplicada.

Tabla 17: Desplazamientos máximos

T1	T2	T3	R1	R2	R3
$4,43 \cdot 10^{-6}$	$4,43 \cdot 10^{-6}$	$4,63 \cdot 10^{-6}$	$4,33 \cdot 10^{-5}$	$4,33 \cdot 10^{-5}$	$2,20 \cdot 10^{-5}$

Chequeo de frecuencias como sólido rígido

Se debe realizar un análisis de modos propios al modelo sin las restricciones, para que se encuentre libre en los 6 DOF. Los resultados de este análisis deben ser que las 6, y sólo 6, primeras frecuencias propias sean valores cercanos a 0. Si hay más de 6 modos como sólido libre, entonces la estructura cuenta con zonas sin rigidez o mecanismos por efecto de un error de modelización. El valor máximo de referencia para los modos de sólido libre calculados es de 0.005 Hz.

La relación entre la frecuencia como sólido rígido más alta y la frecuencia elástica más baja debe ser inferior al valor (relación de aceptación) acordado con el cliente o principal contratista. Un valor típico de la relación de aceptación es de 10^{-4} , que será tomado como criterio en este chequeo.

Tabla 18: Modos de sólido libre

MODO	Frecuencia [Hz]
1	$6,13 \cdot 10^{-5}$
2	$2,72 \cdot 10^{-5}$
3	$6,89 \cdot 10^{-6}$
4	$3,60 \cdot 10^{-5}$
5	$6,69 \cdot 10^{-5}$
6	$7,34 \cdot 10^{-5}$
7	$9,99 \cdot 10^1$

En la Tabla 18 se exponen los resultados obtenidos. Se cumplen con holgura tanto el criterio de valor máximo en los primeros 6 modos como el de relación entre el sexto y séptimo modo.

Chequeo de energía de deformación

Se debe chequear que la energía elástica del modelo cuando no se le aplica ninguna carga está por debajo de un límite establecido. La energía elástica debe ser calculada para los siguientes grupos de grados de libertad del modelo:

- Todos los DOFs (G-set)
- Todos los DOFs independientes (N-set)
- Todos los DOFs libres (sin restricciones SPC) (F-set)
- El set de DOFs de análisis (A-set)

Este chequeo se realiza para verificar que no se producen fuerzas residuales no deseadas en el modelo debido a errores de la modelización o a restricciones inintencionadas. Como valor típico, la energía de deformación para cada set de DOFs debe ser inferior a 10^{-2} J, que será el valor tomado para la comprobación.

En las Tablas 19 y 20 se exponen los resultados obtenidos para el G-SET y el N-Set respectivamente. En ambos casos se observa que el chequeo se cumple con un amplio margen.

Tabla 19: Resultado del chequeo para G-SET

DIRECTION	STRAIN ENERGY	PASS/FAIL
1	$3,87 \cdot 10^{-7}$	PASS
2	$2,41 \cdot 10^{-8}$	PASS
3	$8,00 \cdot 10^{-7}$	PASS
4	$8,54 \cdot 10^{-9}$	PASS
5	$2,36 \cdot 10^{-7}$	PASS
6	$1,80 \cdot 10^{-7}$	PASS

Tabla 20: Resultado del chequeo para N-SET

DIRECTION	STRAIN ENERGY	PASS/FAIL
1	$1,16 \cdot 10^{-6}$	PASS
2	$2,95 \cdot 10^{-7}$	PASS
3	$6,39 \cdot 10^{-7}$	PASS
4	$2,26 \cdot 10^{-8}$	PASS
5	$2,15 \cdot 10^{-7}$	PASS
6	$1,94 \cdot 10^{-7}$	PASS

Por último, los resultados obtenidos para el F-SET y A-SET son idénticas a los mostrados para el N-SET en la tabla 20 (como puede verse en el archivo .f06 del análisis). Esto, además de cumplir con el chequeo se corresponde con el resultado esperado, dado que no hay restricciones ni procesos de reducción.

3.2.2. Modos propios

En este apartado se recogen la metodología empleada y los resultados obtenidos del análisis de modos propios del satélite. En este análisis debe comprobarse el cumplimiento de los requisitos establecidos sobre las frecuencias propias del satélite, que en este caso son:

- 1^a frecuencia lateral > 45 Hz
- 1^a frecuencia longitudinal > 90 Hz

Se realizan dos análisis de modos propios de complejidad creciente. El primer análisis, realizado mediante el cabecero **cabecero_modos_Satelite_G11.dat** obtiene únicamente los diez primeros modos propios, para la comprobación de los requisitos. El segundo de los análisis es el más completo, y se realiza mediante el cabecero **cabecero_modos_0_2000_Satelite_G11.dat**. Este análisis obtiene todos los modos entre 0 y 2000 Hz, que será el rango necesario para los análisis seno y random a realizar, si se quisiera realizar un análisis frente a cargas de choque podría ser de interés aumentar este rango, aunque la precisión irá decayendo si no se refina el modelo. Además, en este análisis más completo se calcularán las masas modales de cada uno de los modos, permitiéndonos conocer la influencia de cada uno de ellos en cada grado de libertad. En ambos análisis se imponen las mismas restricciones, restricción de los 6 gdl en los nodos inferiores de los elementos *CBUSH*.

En la Tabla 21 se recogen las fracciones de masa modal obtenidas para los primeros 20 modos propios, en los grados de libertad de traslación. Puede comprobarse la gran relevancia del primer modo en la

dirección longitudinal, con un 50,2% de la masa modal efectiva. Los modos 2 y 3, por otro lado, son modos laterales, con fracciones de masa efectiva del 60,2% en las direcciones x e y respectivamente.

Tabla 21: Fracción de masa modal efectiva de los primeros 20 modos propios en los grados de libertad de traslación.

Modo	Frecuencia [Hz]	Fracción de Masa modal		
		T1	T2	T3
1	$9,63 \cdot 10^1$	$1,52 \cdot 10^{-9}$	$8,45 \cdot 10^{-10}$	$5,02 \cdot 10^{-1}$
2	$9,95 \cdot 10^1$	$6,02 \cdot 10^{-1}$	$8,24 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-9}$
3	$9,95 \cdot 10^1$	$8,24 \cdot 10^{-3}$	$6,02 \cdot 10^{-1}$	$1,11 \cdot 10^{-9}$
4	$9,99 \cdot 10^1$	$3,88 \cdot 10^{-8}$	$3,24 \cdot 10^{-8}$	$3,95 \cdot 10^{-4}$
5	$1,25 \cdot 10^2$	$4,24 \cdot 10^{-10}$	$1,36 \cdot 10^{-9}$	$9,60 \cdot 10^{-13}$
6	$1,25 \cdot 10^2$	$3,94 \cdot 10^{-3}$	$3,35 \cdot 10^{-7}$	$6,32 \cdot 10^{-12}$
7	$1,25 \cdot 10^2$	$3,35 \cdot 10^{-7}$	$3,94 \cdot 10^{-3}$	$3,18 \cdot 10^{-13}$
8	$1,26 \cdot 10^2$	$1,07 \cdot 10^{-11}$	$6,99 \cdot 10^{-11}$	$3,16 \cdot 10^{-4}$
9	$1,36 \cdot 10^2$	$8,89 \cdot 10^{-11}$	$3,04 \cdot 10^{-10}$	$6,73 \cdot 10^{-12}$
10	$1,37 \cdot 10^2$	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$9,57 \cdot 10^{-6}$	$6,19 \cdot 10^{-12}$
11	$1,37 \cdot 10^2$	$9,58 \cdot 10^{-6}$	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$2,42 \cdot 10^{-10}$
12	$1,37 \cdot 10^2$	$3,43 \cdot 10^{-10}$	$1,79 \cdot 10^{-9}$	$3,54 \cdot 10^{-3}$
13	$1,49 \cdot 10^2$	$9,11 \cdot 10^{-10}$	$9,15 \cdot 10^{-10}$	$3,78 \cdot 10^{-15}$
14	$1,49 \cdot 10^2$	$8,83 \cdot 10^{-10}$	$8,89 \cdot 10^{-10}$	$4,25 \cdot 10^{-6}$
15	$1,51 \cdot 10^2$	$2,31 \cdot 10^{-6}$	$2,37 \cdot 10^{-8}$	$8,35 \cdot 10^{-13}$
16	$1,51 \cdot 10^2$	$2,36 \cdot 10^{-8}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$	$2,07 \cdot 10^{-12}$
17	$1,51 \cdot 10^2$	$9,58 \cdot 10^{-14}$	$1,54 \cdot 10^{-17}$	$6,92 \cdot 10^{-12}$
18	$1,52 \cdot 10^2$	$5,45 \cdot 10^{-8}$	$6,57 \cdot 10^{-5}$	$9,02 \cdot 10^{-15}$
19	$1,52 \cdot 10^2$	$6,57 \cdot 10^{-5}$	$5,45 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-14}$
20	$1,53 \cdot 10^2$	$1,32 \cdot 10^{-11}$	$1,13 \cdot 10^{-11}$	$1,40 \cdot 10^{-15}$

En las Figuras 11 a 14 pueden observarse los modos 1 y 4, pudiendo confirmar que se trata de modos eminentemente longitudinales.

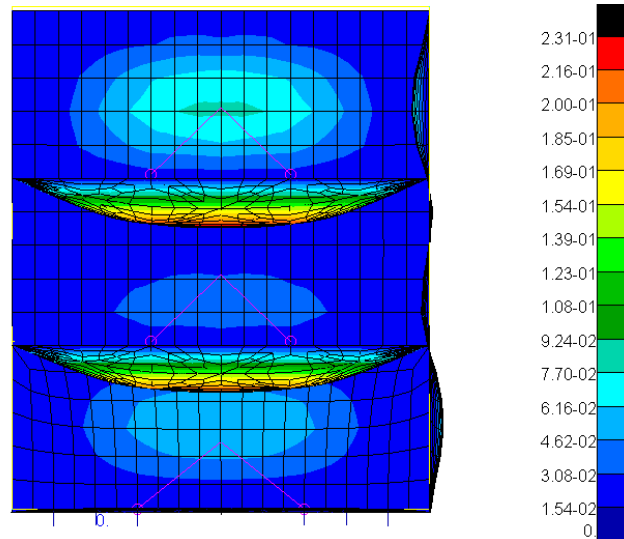


Figura 11: Modo 1. Vista frontal

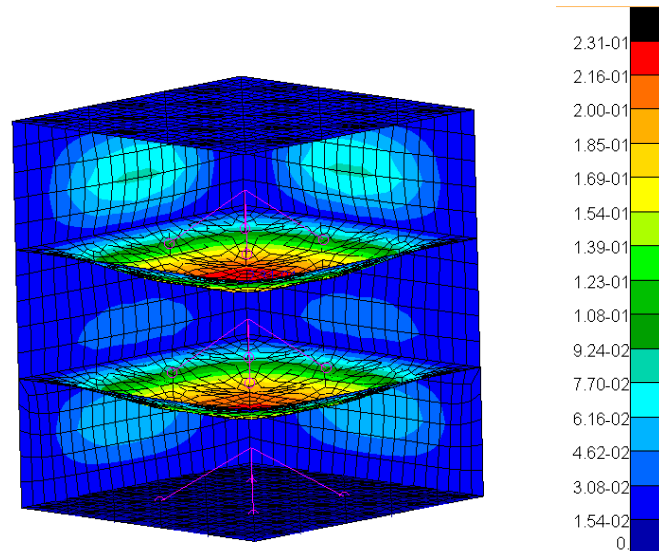


Figura 12: Modo 1. Vista isométrica

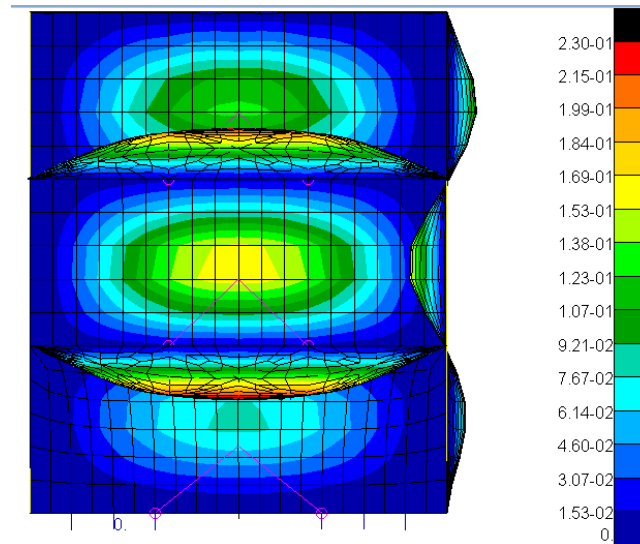


Figura 13: Modo 4. Vista frontal

Entre los primeros modos de encuentran también algunos de tipo lateral, como es el caso de los modos 2 y 3. En la Figura se representan estos modos, se emplea una misma Figura 14 para ambos sin especificar los ejes, ya que estos modos serán idénticos pero en direcciones diferentes.

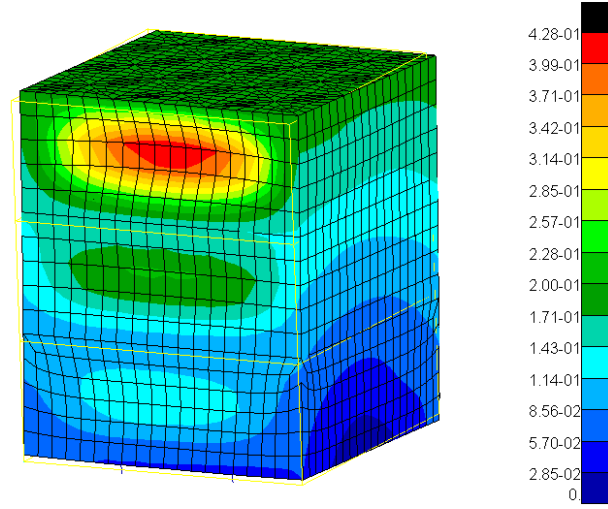


Figura 14: Modos 2 y 3 (Simétricos en direcciones x e y).

En cuanto a la fracción de masa modal en los grados de libertad de rotación, se recogen en la Tabla 22 sus valores para los 20 primeros modos. Podemos ver que, en cuanto a la rotación en torno a los ejes x e y , la masa modal se concentra (un 91.9 %) en los modos laterales 2 y 3. Por otro lado, la fracción de masa modal de los giros en torno al eje z (el longitudinal) no es muy relevante en los primeros modos. Si se observan todos los modos obtenidos, sin embargo, se encuentra en el modo 134 (a 546 Hz) un modo con una fracción de masa modal en este giro del 50,2 %. En la figura 15 puede verse representado este modo, con los giros en torno al eje claramente visibles.

Tabla 22: Fracción de masa modal efectiva de los primeros 20 modos propios en los grados de libertad de Rotación.

Modo	Frecuencia [Hz]	Fracción de Masa modal		
		R1	R2	R3
1	$9,63 \cdot 10^1$	$1,08 \cdot 10^{-9}$	$2,03 \cdot 10^{-9}$	$2,66 \cdot 10^{-12}$
2	$9,95 \cdot 10^1$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$9,19 \cdot 10^{-1}$	$4,54 \cdot 10^{-12}$
3	$9,95 \cdot 10^1$	$9,19 \cdot 10^{-1}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$2,87 \cdot 10^{-12}$
4	$9,99 \cdot 10^1$	$4,95 \cdot 10^{-8}$	$5,91 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-11}$
5	$1,25 \cdot 10^2$	$1,57 \cdot 10^{-9}$	$4,76 \cdot 10^{-10}$	$7,30 \cdot 10^{-15}$
6	$1,25 \cdot 10^2$	$4,02 \cdot 10^{-7}$	$4,73 \cdot 10^{-3}$	$5,31 \cdot 10^{-15}$
7	$1,25 \cdot 10^2$	$4,73 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-7}$	$2,84 \cdot 10^{-14}$
8	$1,26 \cdot 10^2$	$1,07 \cdot 10^{-10}$	$2,10 \cdot 10^{-11}$	$2,35 \cdot 10^{-10}$
9	$1,36 \cdot 10^2$	$1,18 \cdot 10^{-10}$	$6,45 \cdot 10^{-11}$	$5,30 \cdot 10^{-15}$
10	$1,37 \cdot 10^2$	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$6,06 \cdot 10^{-14}$
11	$1,37 \cdot 10^2$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$1,36 \cdot 10^{-13}$
12	$1,37 \cdot 10^2$	$8,65 \cdot 10^{-11}$	$3,13 \cdot 10^{-12}$	$1,51 \cdot 10^{-9}$
13	$1,49 \cdot 10^2$	$1,35 \cdot 10^{-10}$	$1,44 \cdot 10^{-10}$	$1,31 \cdot 10^{-14}$
14	$1,49 \cdot 10^2$	$2,80 \cdot 10^{-11}$	$3,50 \cdot 10^{-11}$	$3,42 \cdot 10^{-9}$
15	$1,51 \cdot 10^2$	$8,90 \cdot 10^{-5}$	$8,54 \cdot 10^{-3}$	$1,77 \cdot 10^{-10}$
16	$1,51 \cdot 10^2$	$8,54 \cdot 10^{-3}$	$8,90 \cdot 10^{-5}$	$1,54 \cdot 10^{-10}$
17	$1,51 \cdot 10^2$	$2,79 \cdot 10^{-10}$	$2,23 \cdot 10^{-10}$	$6,86 \cdot 10^{-3}$
18	$1,52 \cdot 10^2$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$2,58 \cdot 10^{-9}$	$2,54 \cdot 10^{-10}$
19	$1,52 \cdot 10^2$	$2,63 \cdot 10^{-9}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$3,74 \cdot 10^{-10}$
20	$1,53 \cdot 10^2$	$3,01 \cdot 10^{-12}$	$3,93 \cdot 10^{-12}$	$1,74 \cdot 10^{-12}$

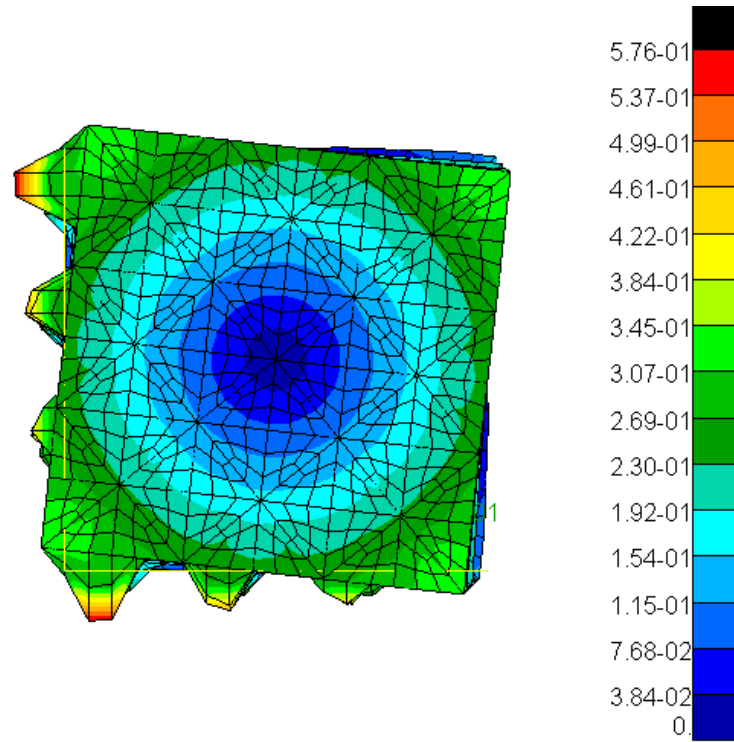


Figura 15: Modo 134. Vista en planta

La totalidad de los modos y sus fracciones de masa modal no se exponen en este documento por brevedad, pero se encuentran en el archivo **cabecero_modos_0_2000_satelite_g11.f06**. En total se han encontrado 1350 modos propios de la estructura. Se trata de un número mayor de el encontrado en los casos de ejemplo presentados por el profesor, sin embargo, estos cumplen con los requisitos establecidos. Se comprueba además la simetría de los modos laterales, correspondientes con el diseño simétrico de la estructura.

3.2.3. Análisis estáticos

En este apartado se presentan las características de los análisis estáticos aplicados. Se expone la metodología empleada, así como los resultados obtenidos y los márgenes de seguridad calculados. Se analiza la estructura frente a aceleraciones en los tres ejes según se especifican en la Tabla 23.

Tabla 23: Aceleraciones del análisis estático

Aceleraciones [g]		
X	Y	Z
6	6	13

Para la resolución de este análisis se emplea un único cabecero, en este cabecero se incluyen 3 subcasos para cada uno de los análisis en cada eje. El archivo empleado es **Cabecero_quasistatic_XYZ_Satelite_G11.dat**. En este cabecero se impone una restricción de los 6 gdl en los nodos inferiores de los elementos *CBUSH*. Una vez realizados los análisis, se obtienen los esfuerzos sobre la estructura. En las Figuras 16 y 17 se representan los esfuerzos de Von Misses en los elementos 2D obtenidos. Cabe destacar que, dada la simetría de la estructura, los análisis en las direcciones longitudinales aportarán resultados idénticos.

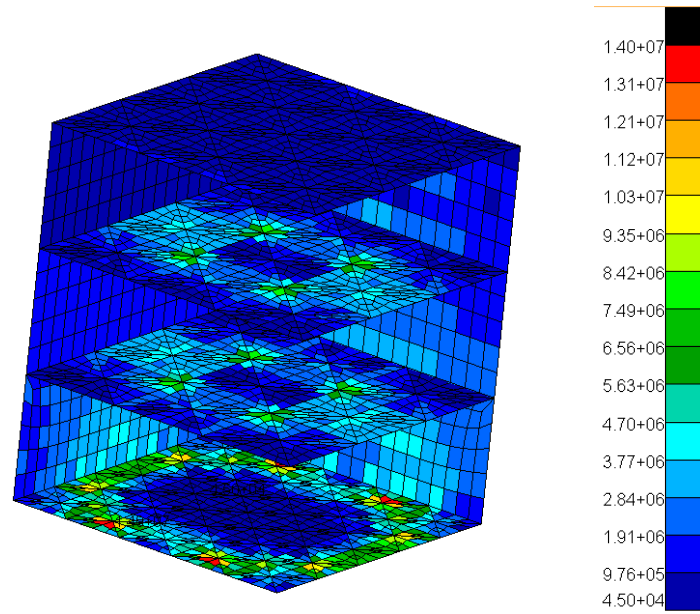


Figura 16: Esfuerzos de Von Misses en los elementos 2D. Análisis estático lateral.

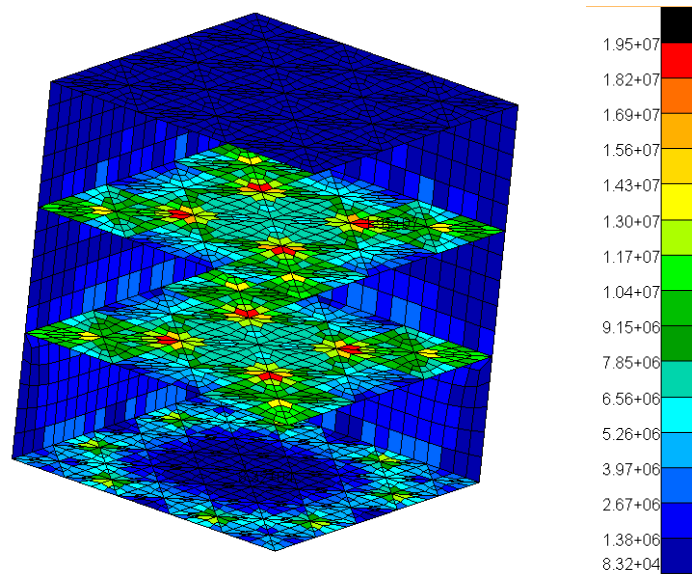


Figura 17: Esfuerzos de Von Misses en los elementos 2D. Análisis estático longitudinal.

De los resultados de la simulación se obtienen los valores máximos y mínimos de los esfuerzos en cada tipo de elementos, recogidos en la Tabla 24, para los análisis laterales, y la Tabla 25, para el longitudinal.

Tabla 24: Márgenes de seguridad del análisis estático lateral

Elemento	Tipo de esfuerzo	Esfuerzo [Pa]	MOSy	MOSu
Shell 2D Elements	Maximum Von Mises Stress	$1,40 \cdot 10^7$	18,41	19,07
BAR 1D Elements	Maximum Combined Stress	$3,14 \cdot 10^7$	7,65	7,95
	Minimum Combined Stress	$3,14 \cdot 10^7$	7,65	7,95
BEAM 1D Elements	Maximum Combined Stress	$1,24 \cdot 10^6$	218,13	225,61
	Minimum Combined Stress	$1,24 \cdot 10^6$	218,13	225,61

Tabla 25: Márgenes de seguridad del análisis estático longitudinal

Elemento	Tipo de esfuerzo	Esfuerzo [Pa]	MOSy	MOSu
Shell 2D Elements	Maximum Von Mises Stress	$1,95 \cdot 10^7$	12,93	13,41
BAR 1D Elements	Maximum Combined Stress	$2,75 \cdot 10^7$	8,88	9,22
	Minimum Combined Stress	$5,07 \cdot 10^7$	4,36	4,54
BEAM 1D Elements	Maximum Combined Stress	$2,00 \cdot 10^6$	134,86	139,50
	Minimum Combined Stress	$1,37 \cdot 10^6$	197,34	204,10

Se comprueba por tanto que los márgenes de seguridad son amplios frente estas cargas. Los márgenes de seguridad de los tornillos se calcularán en la sección 3.2.6 a partir de las fuerzas extraídas de este análisis y de los que se exponen a continuación.

3.2.4. Análisis de vibraciones sinusoidales

En este apartado se exponen los resultados obtenidos del análisis sinusoidal. Además del análisis del diseño final, se comentarán los análisis realizados a algunos de los diseños previos, que han llevado a realizar modificaciones en la estructura diseñada.

Se realizan dos análisis sinusoidales, en dirección lateral y longitudinal. Las especificaciones dadas para estos análisis se recogen en la Tabla 26.

Tabla 26: Especificaciones para el análisis de vibraciones sinusoidales

Eje	Rango de Frecuencia [Hz]	Aceleración
Longitudinal	4 - 6	25 mm
	6 - 100	3,75 g
Lateral	2- 6	20 mm
	6 - 100	2,5 g

Pana poder introducir en el cabecero de análisis sinusoidal estas especificaciones, deben transformarse los tramos especificados como desplazamientos en aceleraciones. Esto puede hacerse en función de la frecuencia mediante la expresión:

$$B(g) = 4\pi^2 \frac{A(mm)}{9810} f^2 \quad (3)$$

Dado que el resultado varía en función de la frecuencia, se calculan varios puntos a lo largo de los tramos de menos de 6 Hz para realizar el input en el cabecero. Los resultados introducidos se recogen en las Tablas 27 y 28.

Tabla 27: Aceleración de 2 a 6 Hz para el caso lateral

Frecuencia [Hz]	Aceleración [g]
2	0,3220
3	0,7245
4	1,2879
5	2,0124
6	2,8979

Tabla 28: Aceleración de 4 a 6 Hz para el caso longitudinal

Frecuencia [Hz]	Aceleración [g]
4	1,6099
5	2,5155
6	3,6224

Una vez introducidos estos datos se procede a realizar los análisis. Los análisis de vibraciones sinusoidales se realizan a partir de los cabeceros **Satelite_G11_sine_x.dat** y **Satelite_G11_sine_z.dat**, para el análisis en dirección lateral y longitudinal respectivamente. Los análisis realizados aportarán datos para un gran número de frecuencias calculadas, sin embargo, para localizar los casos más exigentes se revisarán las frecuencias propias del sistema que se encuentran a menos de 100 Hz, ya que estos casos dan lugar a los mayores esfuerzos. En ambos análisis se aplica una restricción de los 6 gdl sobre un nodo auxiliar (859999) y este se une mediante un elemento de tipo *RBE2* a los nodos inferiores de los 12 elementos *CBUSH* que modelizan las uniones atornilladas.

En primer lugar, se presentan de forma breve los análisis de modelos anteriores que han llevado a modificaciones en el diseño. Analizando el diseño inicial de la estructura, se detecta un margen de seguridad negativo en el análisis sinusoidal lateral. En la Figura 19 se representan los esfuerzos que llevan a este margen negativo, que son esfuerzos a flexión en los elementos 1D. Dado que estos altos esfuerzos se ubican en los separadores de la bandeja inferior, se decide ensanchar los mismos, quedando solucionado el problema a costa de un cierto incremento de masa.

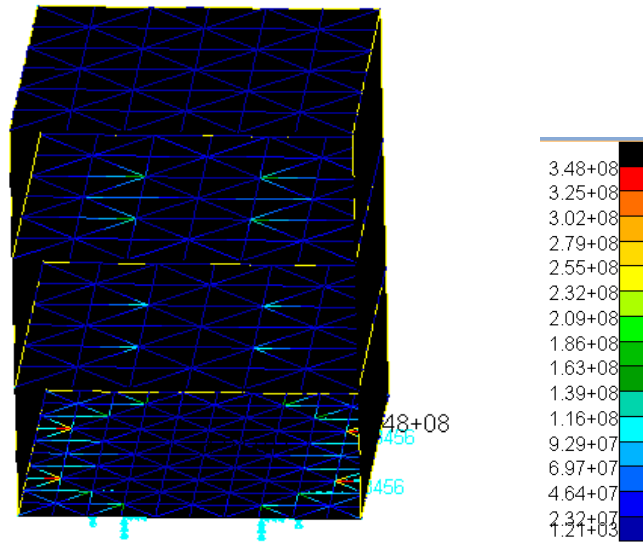


Figura 18: Esfuerzos de flexión en elementos 1D. Análisis sinusoidal lateral. Caso de fallo 1

Una vez solucionado este problema, al analizar la nueva estructura propuesta, se detecta un segundo margen de seguridad negativo, en este caso en el análisis sinusoidal longitudinal. El margen negativo se produce de nuevo en los rigidizadores, pero en este caso en los de las bandejas intermedias, en las zonas de unión de los elementos *RBE2*. De nuevo la solución de diseño supone reforzar estas zonas aumentando

el espesor de los rigidizadores, se reduce también su altitud, ya que esta ya no es necesaria para mantener las frecuencias del satélite en el rango deseado, y esto permitirá compensar parte de la masa ganada por el aumento de espesor.

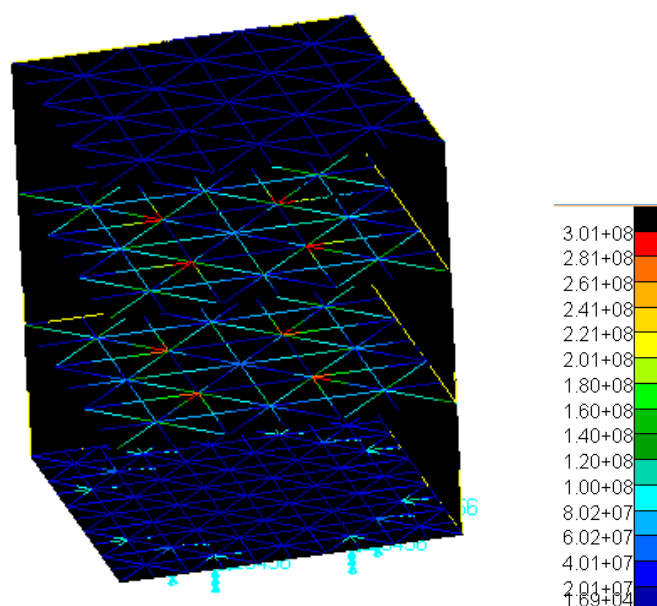


Figura 19: Esfuerzos de flexión en elementos 1D. Análisis sinusoidal longitudinal. Caso de fallo 2

Finalmente, contando ya con el diseño final de la estructura, se presentan los resultados completos de los análisis sinusoidales realizados. Para cada uno de los análisis se presentan los resultados para la frecuencia del modo propio más exigente, que serán (tras realizar la comparativa) los primeros modos lateral y longitudinal para cada caso respectivamente. Los márgenes de seguridad obtenidos en los análisis se recogen en la Tabla 29.

Tabla 29: Resultados del análisis sinusoidal. Márgenes de seguridad obtenidos.

Elemento	Análisis Lateral			Análisis Longitudinal		
	Maximo esfuerzo [Pa]	MOSy	MOSu	Maximo esfuerzo [Pa]	MOSy	MOSu
Shell 2D Elements	$1,44 \cdot 10^8$	$8,87 \cdot 10^{-1}$	$9,51 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^8$	$8,12 \cdot 10^{-1}$	$8,73 \cdot 10^{-1}$
BAR 1D Elements	$2,69 \cdot 10^8$	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$4,46 \cdot 10^{-2}$	$2,59 \cdot 10^8$	$4,91 \cdot 10^{-2}$	$8,49 \cdot 10^{-2}$
Beam	$1,28 \cdot 10^7$	$2,02 \cdot 10^1$	$2,10 \cdot 10^1$	$1,39 \cdot 10^7$	$1,85 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^1$

Por último, en las 20, 21, 22, 23 y 24 se exponen las representaciones de los esfuerzos mas relevantes sobre la estructura para los análisis sinusoidales.

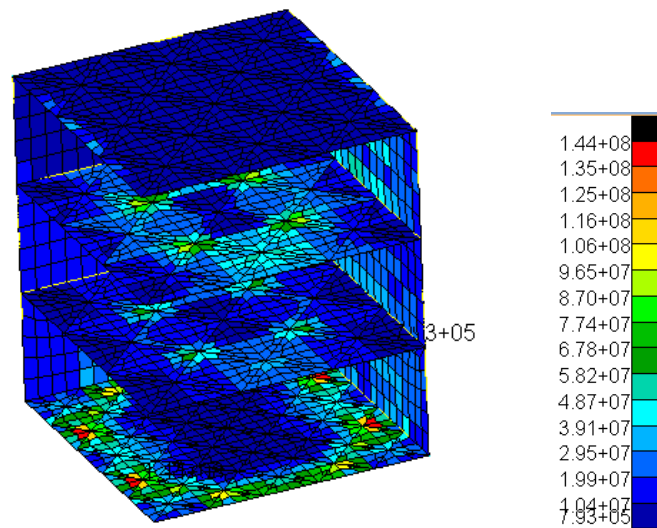


Figura 20: Esfuerzos máximos de Von Misses en los elementos 2D. Análisis sinusoidal lateral.

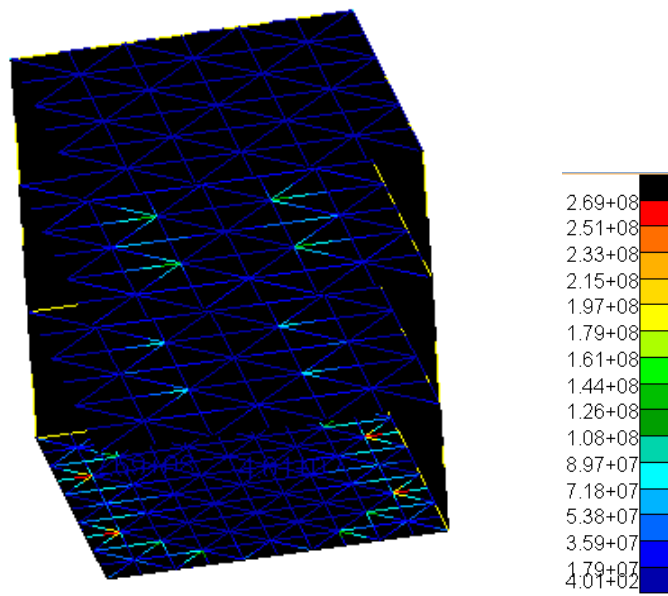


Figura 21: Esfuerzos máximos (de flexión) en los elementos 1D. Análisis sinusoidal lateral.

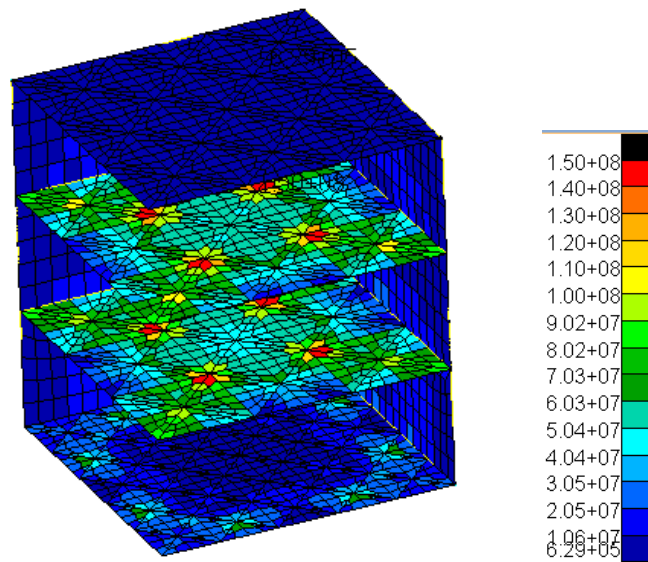


Figura 22: Esfuerzos máximos de Von Misses en los elementos 2D. Análisis sinusoidal longitudinal.

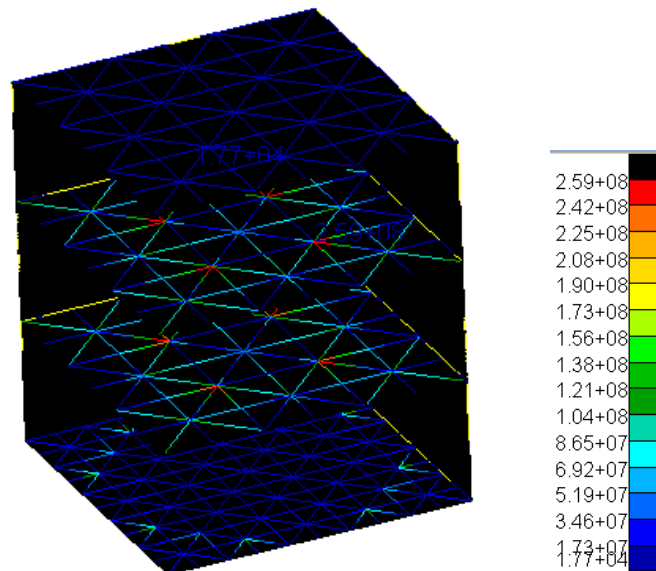


Figura 23: Esfuerzos máximos (de flexión) en los elementos 1D. Análisis sinusoidal longitudinal.

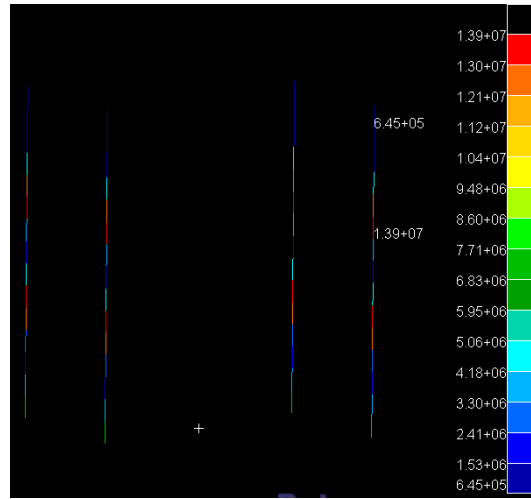


Figura 24: Esfuerzos máximos sobre los elementos de tipo *CBEAM*. Análisis sinusoidal longitudinal, primera frecuencia propia.

3.2.5. Análisis de vibraciones aleatorias

El siguiente análisis a realizar es el test de vibraciones aleatorias, ensayo especialmente adecuado para satélites pequeños y que en ocasiones sustituye al ensayo de vibraciones acústicas. El ensayo consiste en la aplicación de cargas vibratorias de carácter aleatorio a elevadas frecuencias de excitación, en nuestro caso en particular el análisis cubre el rango de frecuencias entre los 20 y los 2000 HZ. Las especificaciones del ensayo realizado se recogen en la Tabla 30.

Tabla 30: Especificaciones para el análisis de vibraciones aleatorias.

Eje	Rango de Frecuencia [Hz]	Aceleración
Longitudinal	2-200	0.0727 g^2/Hz
Lateral	2-200	0.0727 g^2/Hz

Los resultados de interés en este análisis son los esfuerzos sobre la estructura y las fuerzas sufridas por las uniones atornilladas. Para la obtención de estos resultados se van a realizar dos análisis distintos. En el primero de ellos se obtendrán las fuerzas en sobre las uniones atornilladas a través del archivo de tipo *.f06* generado. Aunque se podrían obtener los esfuerzos sobre todos los elementos en ese archivo *.f06*, con el fin de poder visualizar los valores 3 RMS (Root Main Square) en Patran se decide emplear otro tipo de análisis que si ofrece esta propiedad.

En ambos análisis se aplica una restricción de los 6 gdl sobre un nodo auxiliar (859999) y este se une mediante un elemento de tipo *RBE2* a los nodos inferiores de los 12 elementos *CBUSH* que modelizan las uniones atornilladas.

Para realizar estos análisis se han empleado dos tipos de cabeceros distintos, y tres caso para cada uno de ellos, un por cada eje. Los cabeceros en cuestión son:

- *Satelite_G_11_random_spcd.x* (x, y, o z): Cabecero empleado para obtener las fuerzas en los

tornillos ante el ensayo de vibraciones aleatorias en el eje x. Los cabeceros correspondientes a los otros dos ejes incluyen ligeras modificaciones que los adaptan para el eje deseado.

- **Satelite_G11_sine_msc_random_X** (x, y, o z): Cabecero empleado para obtener los esfuerzos en la estructura que permite su visualización en MSC Patran. Se ha empleado un cabecero distinto para cada eje. La realización de este ensayo se complementa con un análisis en MSC Patran denominado *RMS Analysis*, tras el que ya se podrán visualizar los resultados.

Los resultados del primer análisis se recogen en el apartado 3.2.6. Por otro lado, los valores máximos de esfuerzos sobre la estructura, así como los márgenes de seguridad obtenidos se recogen en la Tabla 31. En la tabla se puede ver que no se hace diferenciación entre los elementos *CBEAM* y *CBAR*, esto se debe a que en el análisis realizado MSC Patran no diferencia entre ambos tipos de elementos.

Tabla 31: Resultados del análisis de vibraciones aleatorias. Márgenes de seguridad obtenidos.

Elemento	Análisis Lateral			Análisis Longitudinal		
	Maximo esfuerzo 3-RMS [Pa]	MOSy	MOSu	Maximo esfuerzo 3-RMS [Pa]	MOSy	MOSu
Shell 2D Elements	$1,15 \cdot 10^8$	1,36	1,44	$7,86 \cdot 10^7$	2,46	2,57
1D-BAR / 1D-BEAM Elements	$2,13 \cdot 10^8$	0,28	0,32	$1,36 \cdot 10^8$	1,00	1,07

Se puede ver que todos los márgenes de seguridad son positivos, por lo que se considera que la estructura ha pasado satisfactoriamente el ensayo.

A modo ilustrativo en las Figuras 25, 26, 27 y 28 se muestra la visualización de algunos de los resultados.

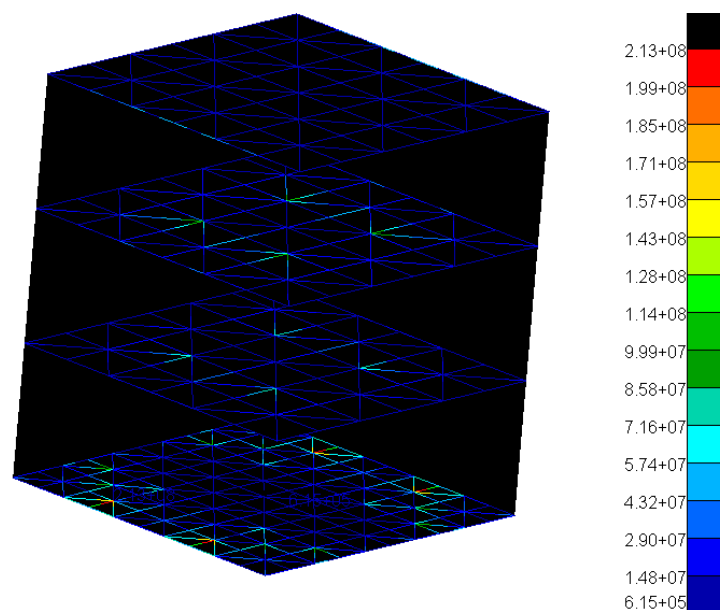


Figura 25: Visualización 3D de los esfuerzos 3-RMS sobre los rigidizadores ante el ensayo de vibraciones aleatorias lateral.

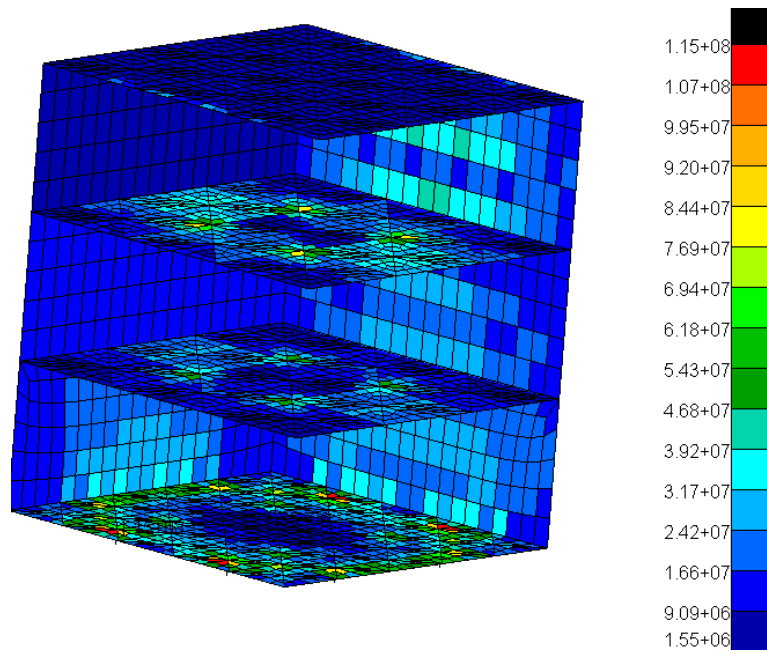


Figura 26: Visualización 3D de los esfuerzos de Von Mises 3-RMS sobre los elementos bidimensionales ante el ensayo de vibraciones aleatorias lateral.

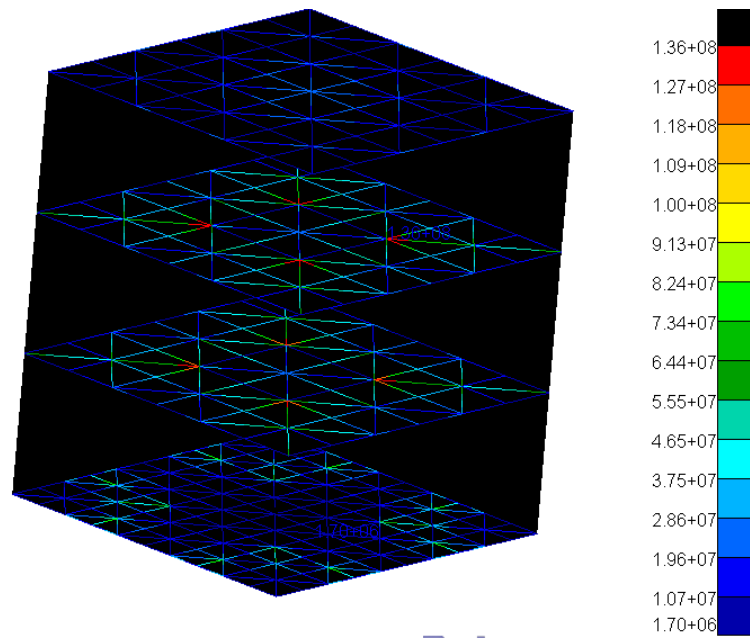


Figura 27: Visualización 3D de los esfuerzos 3-RMS sobre los rigidizadores ante el ensayo de vibraciones aleatorias longitudinal.

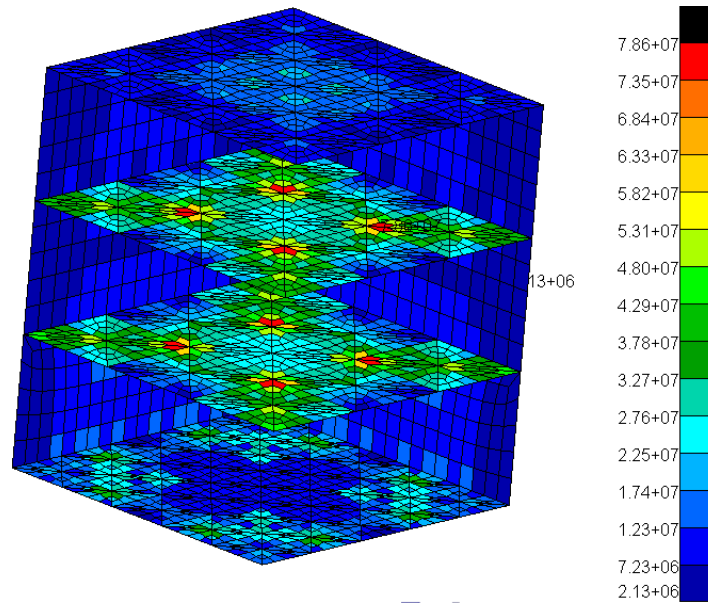


Figura 28: Visualización 3D de los esfuerzos de Von Mises 3-RMS sobre los elementos bidimensionales ante el ensayo de vibraciones aleatorias longitudinal.

Para finalizar este apartado, en las Figuras 29 y 30 se muestran algunos los esfuerzos en el eje longitudinal de los elementos de tipo *CBUSH*, que modelan las uniones atornilladas, en un barrido en frecuencias desde 20 hasta 2000 Hz.

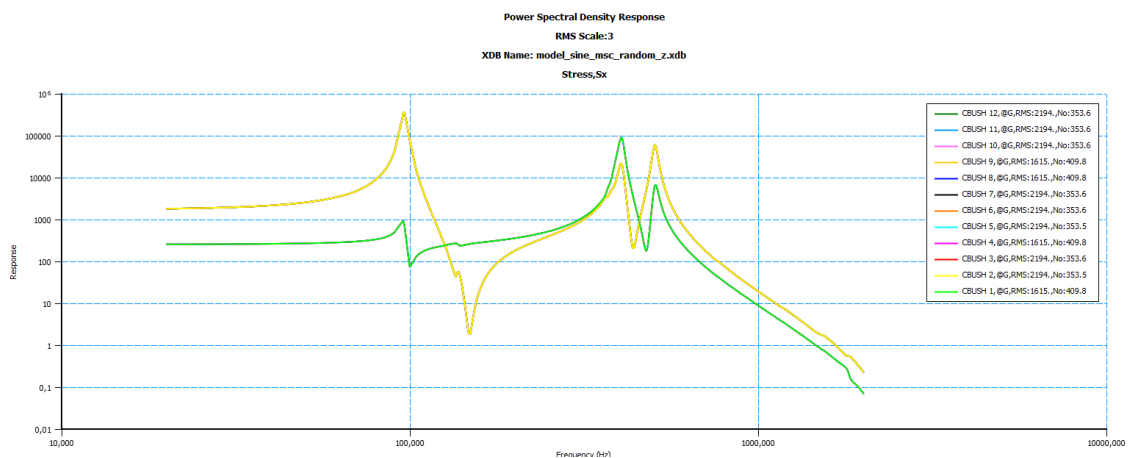


Figura 29: Resultados de esfuerzos 3-RMS en el eje longitudinal de los elementos *CBUSH* ante el barrido en frecuencias realizado en el análisis de vibraciones aleatorias longitudinal. Eje de ordenadas en Pa.

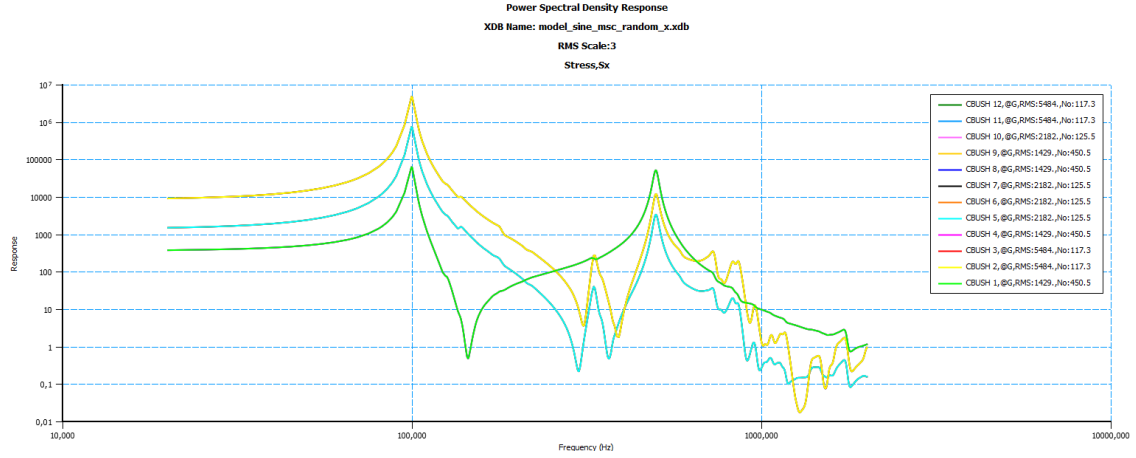


Figura 30: Resultados de esfuerzos 3-RMS en el eje longitudinal de los elementos *CBUSH* ante el barrido en frecuencias realizado en el análisis de vibraciones aleatorias lateral. Eje de ordenadas en Pa.

3.2.6. Análisis de tornillos

En este apartado se presenta el análisis del fallo de los tornillos de la base del satélite frente a las cargas que se producen en los mismos en cada uno de los casos de carga analizados previamente (estático en cada eje, seno en cada eje y random en cada eje).

Los tornillos que se encuentran en la interfaz del satélite con el sistema de despliegue se representan mediante elementos *CBUSH*. Se obtendrán en cada caso de carga, las fuerzas y momentos sobre estos elementos a partir de los archivos .f06. Las propiedades físicas de estos tornillos, que se emplean en el cálculo de los márgenes de seguridad, se recogen en la Tabla 32.

Tabla 32: Propiedades de los tornillos

Material	Acero A286	As [m ²]	3,661E-5
Métrica	M8	Φ_n	0,038
σ_y [MPa]	950	sf_y	1,0
σ_u [MPa]	1100	$sf_u = sf_g$	1,4
τ_y [MPa]	548	μ_s	0,2
τ_u [MPa]	655	$F_{V,max}$ [N]	21972,1
Mapp [N·m]	33,5	$F_{V,min}$ [N]	13241,4
F_A	Resultado de la fuerza axial de cada tornillo	F_Q	Resultado de la fuerza lateral de cada tornillo

Una vez se conocen las cargas sobre los tornillos y sus propiedades, se calculan los márgenes de seguridad frente a los diferentes modos de fallo según las expresiones siguientes:

■ Tensile total

$$Mos_{tot,y} = \frac{A_s \sigma_y}{F_{V,máx} + \Phi_n F_A sf_y} - 1 \quad (4)$$

$$Mos_{tot,u} = \frac{A_s \sigma_u}{F_{V,máx} + \Phi_n F_A sf_u} - 1 \quad (5)$$

- Gapping

$$MoS_g = \frac{F_{V,\min}}{(1 - \Phi_n) F_A s f_g} - 1 \quad (6)$$

- Sliding

$$MoS_{slip} = \frac{(F_{V,\min} - (1 - \Phi_n) F_A) \mu_s}{F_Q s f_{ult}} - 1 \quad (7)$$

- Shear combined

$$MoS_{comb,y} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{F_Q s f_y}{\tau_y A_s}\right)^2 + \left(\frac{F_{V,\max} + \Phi_n F_A s f_y}{A_s \sigma_y}\right)^2}} - 1 \quad (8)$$

$$MoS_{comb,u} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{F_Q s f_u}{\tau_u A_s}\right)^2 + \left(\frac{F_{V,\max} + \Phi_n F_A s f_u}{A_s \sigma_u}\right)^2}} - 1 \quad (9)$$

Antes de aplicar estos cálculos, las cargas se multiplican por el factor de seguridad del modelo (K_M) de 1,1. Las cargas que se dan en los tornillos se obtienen en cada uno de los análisis realizados a partir del archivo .f06. Con el objetivo de facilitar la aplicación de condiciones de contorno y la extracción de datos sobre los tornillos, a los nodos inferiores de los elementos que los modelizan se les asignan los números del 1 al 12 en su numeración. Para poder relacionar de forma sencilla los resultados con los correspondientes tornillos, se esquematiza su numeración en la Figura 31.

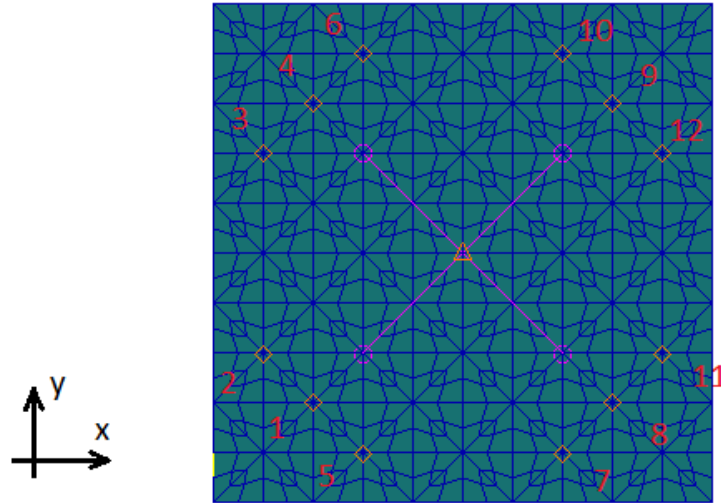


Figura 31: Numeración de los tornillos y de los nodos inferiores de los elementos CBUSH

A continuación, se presentan finalmente los resultados obtenidos. En las Tablas 33 y 34 se exponen las cargas y márgenes de seguridad para el caso estático en dirección x. Se observan márgenes ampliamente positivos frente a todos los modos de fallo en este caso.

Tabla 33: Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga estático en dirección x .

Tornillo	F_X [N]	F_Y [N]	F_Z [N]	M_X [N.m]	M_Y [N.m]	M_Z [N.m]
1	$1,42 \cdot 10^2$	$-4,58 \cdot 10^1$	$-2,17 \cdot 10^2$	$4,70 \cdot 10^{-4}$	4,83	4,49
2	$6,88 \cdot 10^2$	$-9,88 \cdot 10^1$	$-1,55 \cdot 10^1$	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^1$	$5,65 \cdot 10^{-3}$
3	$6,88 \cdot 10^2$	$9,88 \cdot 10^1$	$-1,55 \cdot 10^1$	$-2,57 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^1$	$-5,50 \cdot 10^{-3}$
4	$1,42 \cdot 10^2$	$4,58 \cdot 10^1$	$-2,17 \cdot 10^2$	$-4,70 \cdot 10^{-4}$	4,83	-4,49
5	$2,79 \cdot 10^2$	$-5,48 \cdot 10^1$	$-5,07 \cdot 10^2$	$2,39 \cdot 10^{-3}$	2,47	8,54
6	$2,79 \cdot 10^2$	$5,48 \cdot 10^1$	$-5,07 \cdot 10^2$	$-2,38 \cdot 10^{-3}$	2,47	-8,54
7	$-2,79 \cdot 10^2$	$5,48 \cdot 10^1$	$-5,07 \cdot 10^2$	$2,38 \cdot 10^{-3}$	2,47	-8,54
8	$-1,42 \cdot 10^2$	$4,58 \cdot 10^1$	$-2,17 \cdot 10^2$	$4,70 \cdot 10^{-4}$	4,83	-4,49
9	$-1,42 \cdot 10^2$	$-4,58 \cdot 10^1$	$-2,17 \cdot 10^2$	$-4,70 \cdot 10^{-4}$	4,83	4,49
10	$-2,79 \cdot 10^2$	$-5,48 \cdot 10^1$	$-5,07 \cdot 10^2$	$-2,39 \cdot 10^{-3}$	2,47	8,54
11	$-6,88 \cdot 10^2$	$9,88 \cdot 10^1$	$-1,55 \cdot 10^1$	$2,57 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^1$	$-5,34 \cdot 10^{-3}$
12	$-6,89 \cdot 10^2$	$-9,88 \cdot 10^1$	$-1,55 \cdot 10^1$	$-2,55 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^1$	$5,49 \cdot 10^{-3}$

Tabla 34: Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga estática en dirección x .

Tornillo	Tensile MoS_tot_y	Total MoS_tot_u	Gapping MoSg	Sliding MoS_slip	Shear MoS_comb_y	Combined MoS_comb_u
1	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,32 \cdot 10^{-1}$	$8,68 \cdot 10^1$	6,67	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
2	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,72 \cdot 10^1$	$1,53 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
3	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,72 \cdot 10^1$	$1,53 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
4	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,32 \cdot 10^{-1}$	$8,68 \cdot 10^1$	6,67	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
5	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$	$4,38 \cdot 10^1$	2,30	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,26 \cdot 10^{-1}$
6	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$	$4,38 \cdot 10^1$	2,30	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,26 \cdot 10^{-1}$
7	$5,83 \cdot 10^{-1}$	$8,34 \cdot 10^{-1}$	$4,38 \cdot 10^1$	2,30	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,26 \cdot 10^{-1}$
8	$5,83 \cdot 10^{-1}$	$8,33 \cdot 10^{-1}$	$8,68 \cdot 10^1$	6,67	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
9	$5,83 \cdot 10^{-1}$	$8,33 \cdot 10^{-1}$	$8,68 \cdot 10^1$	6,67	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
10	$5,83 \cdot 10^{-1}$	$8,34 \cdot 10^{-1}$	$4,38 \cdot 10^1$	2,30	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,26 \cdot 10^{-1}$
11	$5,85 \cdot 10^{-1}$	$8,36 \cdot 10^{-1}$	$1,72 \cdot 10^1$	$1,53 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
12	$5,85 \cdot 10^{-1}$	$8,36 \cdot 10^{-1}$	$1,72 \cdot 10^1$	$1,53 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$

El siguiente caso analizado es el estático en dirección y , donde podemos comprobar que los resultados son simétricos a los obtenidos para el caso en dirección x .

Tabla 35: Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga estático en dirección y .

Tornillo	F_X [N]	F_Y [N]	F_Z [N]	M_X [N.m]	M_Y [N.m]	M_Z [N.m]
1	$1,42 \cdot 10^2$	$2,17 \cdot 10^2$	$4,58 \cdot 10^1$	$-4,70 \cdot 10^{-4}$	4,49	4,83
2	$2,79 \cdot 10^2$	$5,07 \cdot 10^2$	$5,48 \cdot 10^1$	$-2,38 \cdot 10^{-3}$	8,54	2,47
3	$-2,79 \cdot 10^2$	$5,07 \cdot 10^2$	$-5,48 \cdot 10^1$	$-2,39 \cdot 10^{-3}$	-8,54	2,47
4	$-1,42 \cdot 10^2$	$2,17 \cdot 10^2$	$-4,58 \cdot 10^1$	$-4,70 \cdot 10^{-4}$	-4,49	4,83
5	$6,88 \cdot 10^2$	$1,55 \cdot 10^1$	$9,88 \cdot 10^1$	$-2,57 \cdot 10^{-4}$	$5,50 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^1$
6	$-6,89 \cdot 10^2$	$1,55 \cdot 10^1$	$-9,88 \cdot 10^1$	$-2,55 \cdot 10^{-4}$	$-5,49 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^1$
7	$6,88 \cdot 10^2$	$1,55 \cdot 10^1$	$-9,88 \cdot 10^1$	$2,55 \cdot 10^{-4}$	$-5,65 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^1$
8	$1,42 \cdot 10^2$	$2,17 \cdot 10^2$	$-4,58 \cdot 10^1$	$4,70 \cdot 10^{-4}$	-4,49	4,83
9	$-1,42 \cdot 10^2$	$2,17 \cdot 10^2$	$4,58 \cdot 10^1$	$4,70 \cdot 10^{-4}$	4,49	4,83
10	$-6,88 \cdot 10^2$	$1,55 \cdot 10^1$	$9,88 \cdot 10^1$	$2,57 \cdot 10^{-4}$	$5,35 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^1$
11	$2,79 \cdot 10^2$	$5,07 \cdot 10^2$	$-5,48 \cdot 10^1$	$2,39 \cdot 10^{-3}$	-8,54	2,47
12	$-2,79 \cdot 10^2$	$5,07 \cdot 10^2$	$5,48 \cdot 10^1$	$2,38 \cdot 10^{-3}$	8,54	2,47

Tabla 36: Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga estática en dirección y.

Tornillo	Tensile MoS_tot_y	Total MoS_tot_u	Gapping MoSg	Sliding MoS_slip	Shear MoS_comb_y	Combined MoS_comb_u
1	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,32 \cdot 10^{-1}$	$9,56 \cdot 10^1$	7,45	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
2	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$	$4,82 \cdot 10^1$	2,63	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,27 \cdot 10^{-1}$
3	$5,83 \cdot 10^{-1}$	$8,34 \cdot 10^{-1}$	$4,82 \cdot 10^1$	2,63	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,27 \cdot 10^{-1}$
4	$5,83 \cdot 10^{-1}$	$8,33 \cdot 10^{-1}$	$9,56 \cdot 10^1$	7,45	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
5	$5,81 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,90 \cdot 10^1$	$1,70 \cdot 10^1$	$5,81 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
6	$5,84 \cdot 10^{-1}$	$8,35 \cdot 10^{-1}$	$1,90 \cdot 10^1$	$1,70 \cdot 10^1$	$5,81 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
7	$5,81 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,90 \cdot 10^1$	$1,70 \cdot 10^1$	$5,81 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
8	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,32 \cdot 10^{-1}$	$9,56 \cdot 10^1$	7,45	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
9	$5,83 \cdot 10^{-1}$	$8,33 \cdot 10^{-1}$	$9,56 \cdot 10^1$	7,45	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
10	$5,84 \cdot 10^{-1}$	$8,35 \cdot 10^{-1}$	$1,90 \cdot 10^1$	$1,70 \cdot 10^1$	$5,81 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
11	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$	$4,82 \cdot 10^1$	2,63	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,27 \cdot 10^{-1}$
12	$5,83 \cdot 10^{-1}$	$8,34 \cdot 10^{-1}$	$4,82 \cdot 10^1$	2,63	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,27 \cdot 10^{-1}$

En cuanto al caso estático en dirección z, los márgenes siguen siendo en todos los casos positivos. Puede observarse como el margen de gapping empeora con respecto a los laterales, pero el de sliding empeora notablemente.

Tabla 37: Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga estático en dirección z.

Tornillo	F_X [N]	F_Y [N]	F_Z [N]	M_X [N.m]	M_Y [N.m]	M_Z [N.m]
1	$2,58 \cdot 10^2$	$-4,46 \cdot 10^1$	$4,46 \cdot 10^1$	$-1,64 \cdot 10^{-8}$	2,10	2,10
2	$6,72 \cdot 10^2$	6,36	$1,26 \cdot 10^2$	$-2,61 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^1$	-1,82
3	$6,72 \cdot 10^2$	-6,36	$1,26 \cdot 10^2$	$2,62 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^1$	1,82
4	$2,58 \cdot 10^2$	$4,46 \cdot 10^1$	$4,46 \cdot 10^1$	$5,22 \cdot 10^{-10}$	2,10	-2,10
5	$6,72 \cdot 10^2$	$-1,26 \cdot 10^2$	-6,37	$2,62 \cdot 10^{-4}$	-1,82	$1,52 \cdot 10^1$
6	$6,72 \cdot 10^2$	$1,26 \cdot 10^2$	-6,37	$-2,61 \cdot 10^{-4}$	-1,82	$-1,52 \cdot 10^1$
7	$6,72 \cdot 10^2$	$-1,26 \cdot 10^2$	6,36	$-2,61 \cdot 10^{-4}$	1,82	$1,52 \cdot 10^1$
8	$2,58 \cdot 10^2$	$-4,46 \cdot 10^1$	$-4,46 \cdot 10^1$	$7,81 \cdot 10^{-8}$	-2,10	2,10
9	$2,58 \cdot 10^2$	$4,46 \cdot 10^1$	$-4,46 \cdot 10^1$	$-1,72 \cdot 10^{-8}$	-2,10	-2,10
10	$6,72 \cdot 10^2$	$1,26 \cdot 10^2$	6,37	$2,62 \cdot 10^{-4}$	1,82	$-1,52 \cdot 10^1$
11	$6,72 \cdot 10^2$	6,37	$-1,26 \cdot 10^2$	$2,63 \cdot 10^{-4}$	$-1,52 \cdot 10^1$	-1,82
12	$6,72 \cdot 10^2$	-6,37	$-1,26 \cdot 10^2$	$-2,61 \cdot 10^{-4}$	$-1,52 \cdot 10^1$	1,82

Tabla 38: Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga estática en dirección z.

Tornillo	Tensile MoS_tot_y	Total MoS_tot_u	Gapping MoSg	Sliding MoS_slip	Shear MoS_comb_y	Combined MoS_comb_u
1	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$	$4,75 \cdot 10^1$	$2,57 \cdot 10^1$	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
2	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,76 \cdot 10^1$	$1,19 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
3	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,76 \cdot 10^1$	$1,19 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
4	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$	$4,75 \cdot 10^1$	$2,57 \cdot 10^1$	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
5	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,76 \cdot 10^1$	$1,19 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
6	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,76 \cdot 10^1$	$1,19 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
7	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,76 \cdot 10^1$	$1,19 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
8	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$	$4,75 \cdot 10^1$	$2,57 \cdot 10^1$	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
9	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$	$4,75 \cdot 10^1$	$2,57 \cdot 10^1$	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$
10	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,76 \cdot 10^1$	$1,19 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
11	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,76 \cdot 10^1$	$1,19 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$
12	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$	$1,76 \cdot 10^1$	$1,19 \cdot 10^1$	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,29 \cdot 10^{-1}$

Pasando ya a los resultados de los análisis frente a cargas seno, estos han resultado ser mucho más exigentes. En el caso de carga sinusoidal lateral, se producen márgenes de seguridad negativos frente a sliding. Este fallo sin embargo no se considera grave, ya que no lleva a la rotura de ningún elemento, y solamente conllevará microdesplazamientos, que en el caso de la estructura del satélite no son relevantes.

Tabla 39: Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga seno en dirección lateral.

Tornillo	F_X	F_Y	F_Z	M_X	M_Y	M_Z
1	$7,93 \cdot 10^2$	$7,81 \cdot 10^2$	$1,32 \cdot 10^3$	$6,43 \cdot 10^{-3}$	$6,41 \cdot 10^1$	$6,02 \cdot 10^1$
2	$6,87 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^3$	$8,44 \cdot 10^2$	$5,75 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^2$	5,83
3	$6,87 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^3$	$8,44 \cdot 10^2$	$5,76 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^2$	5,83
4	$7,93 \cdot 10^2$	$7,81 \cdot 10^2$	$1,32 \cdot 10^3$	$6,43 \cdot 10^{-3}$	$6,41 \cdot 10^1$	$6,02 \cdot 10^1$
5	$2,72 \cdot 10^3$	$7,28 \cdot 10^2$	$4,23 \cdot 10^3$	$2,09 \cdot 10^{-2}$	$3,07 \cdot 10^1$	$9,51 \cdot 10^1$
6	$2,72 \cdot 10^3$	$7,28 \cdot 10^2$	$4,23 \cdot 10^3$	$2,09 \cdot 10^{-2}$	$3,07 \cdot 10^1$	$9,51 \cdot 10^1$
7	$2,72 \cdot 10^3$	$7,28 \cdot 10^2$	$4,23 \cdot 10^3$	$2,09 \cdot 10^{-2}$	$3,07 \cdot 10^1$	$9,51 \cdot 10^1$
8	$7,93 \cdot 10^2$	$7,81 \cdot 10^2$	$1,32 \cdot 10^3$	$6,43 \cdot 10^{-3}$	$6,41 \cdot 10^1$	$6,02 \cdot 10^1$
9	$7,93 \cdot 10^2$	$7,81 \cdot 10^2$	$1,32 \cdot 10^3$	$6,43 \cdot 10^{-3}$	$6,41 \cdot 10^1$	$6,02 \cdot 10^1$
10	$2,72 \cdot 10^3$	$7,28 \cdot 10^2$	$4,23 \cdot 10^3$	$2,09 \cdot 10^{-2}$	$3,07 \cdot 10^1$	$9,51 \cdot 10^1$
11	$6,87 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^3$	$8,44 \cdot 10^2$	$5,75 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^2$	5,83
12	$6,87 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^3$	$8,44 \cdot 10^2$	$5,75 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^2$	5,83

Tabla 40: Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga seno en dirección lateral.

Tornillo	Tensile MoS_tot_y	Total MoS_tot_u	Gapping MoSg	Sliding MoS_slip	Shear MoS_comb_y	Combined MoS_comb_u
1	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,28 \cdot 10^{-1}$	$1,48 \cdot 10^1$	$5,02 \cdot 10^{-2}$	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$7,87 \cdot 10^{-1}$
2	$5,62 \cdot 10^{-1}$	$7,99 \cdot 10^{-1}$	$8,21 \cdot 10^{-1}$	$-4,17 \cdot 10^{-1}$	$5,52 \cdot 10^{-1}$	$7,70 \cdot 10^{-1}$
3	$5,62 \cdot 10^{-1}$	$7,99 \cdot 10^{-1}$	$8,21 \cdot 10^{-1}$	$-4,17 \cdot 10^{-1}$	$5,52 \cdot 10^{-1}$	$7,70 \cdot 10^{-1}$
4	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,28 \cdot 10^{-1}$	$1,48 \cdot 10^1$	$5,02 \cdot 10^{-2}$	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$7,87 \cdot 10^{-1}$
5	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,60	$-6,86 \cdot 10^{-1}$	$4,76 \cdot 10^{-1}$	$5,60 \cdot 10^{-1}$
6	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,60	$-6,86 \cdot 10^{-1}$	$4,76 \cdot 10^{-1}$	$5,60 \cdot 10^{-1}$
7	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,60	$-6,86 \cdot 10^{-1}$	$4,76 \cdot 10^{-1}$	$5,60 \cdot 10^{-1}$
8	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,28 \cdot 10^{-1}$	$1,48 \cdot 10^1$	$5,02 \cdot 10^{-2}$	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$7,87 \cdot 10^{-1}$
9	$5,80 \cdot 10^{-1}$	$8,28 \cdot 10^{-1}$	$1,48 \cdot 10^1$	$5,02 \cdot 10^{-2}$	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$7,87 \cdot 10^{-1}$
10	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,60	$-6,86 \cdot 10^{-1}$	$4,76 \cdot 10^{-1}$	$5,60 \cdot 10^{-1}$
11	$5,62 \cdot 10^{-1}$	$7,99 \cdot 10^{-1}$	$8,21 \cdot 10^{-1}$	$-4,17 \cdot 10^{-1}$	$5,52 \cdot 10^{-1}$	$7,70 \cdot 10^{-1}$
12	$5,62 \cdot 10^{-1}$	$7,99 \cdot 10^{-1}$	$8,21 \cdot 10^{-1}$	$-4,17 \cdot 10^{-1}$	$5,52 \cdot 10^{-1}$	$7,70 \cdot 10^{-1}$

Tabla 41: Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga seno en dirección longitudinal.

Tornillo	F_X [N]	F_Y [N]	F_Z [N]	M_X [N.m]	M_Y [N.m]	M_Z [N.m]
1	$1,25 \cdot 10^2$	$2,26 \cdot 10^2$	$2,26 \cdot 10^2$	$1,88 \cdot 10^{-7}$	$3,47 \cdot 10^1$	$3,47 \cdot 10^1$
2	$2,85 \cdot 10^3$	$3,92 \cdot 10^1$	$6,65 \cdot 10^2$	$7,77 \cdot 10^{-4}$	$9,54 \cdot 10^1$	2,12
3	$2,85 \cdot 10^3$	$3,89 \cdot 10^1$	$6,65 \cdot 10^2$	$7,69 \cdot 10^{-4}$	$9,54 \cdot 10^1$	2,11
4	$1,25 \cdot 10^2$	$2,27 \cdot 10^2$	$2,26 \cdot 10^2$	$7,27 \cdot 10^{-7}$	$3,47 \cdot 10^1$	$3,47 \cdot 10^1$
5	$2,85 \cdot 10^3$	$6,65 \cdot 10^2$	$3,93 \cdot 10^1$	$7,71 \cdot 10^{-4}$	2,12	$9,54 \cdot 10^1$
6	$2,85 \cdot 10^3$	$6,65 \cdot 10^2$	$3,94 \cdot 10^1$	$7,78 \cdot 10^{-4}$	2,12	$9,54 \cdot 10^1$
7	$2,85 \cdot 10^3$	$6,65 \cdot 10^2$	$3,89 \cdot 10^1$	$7,76 \cdot 10^{-4}$	2,11	$9,54 \cdot 10^1$
8	$1,25 \cdot 10^2$	$2,26 \cdot 10^2$	$2,27 \cdot 10^2$	$7,19 \cdot 10^{-7}$	$3,47 \cdot 10^1$	$3,47 \cdot 10^1$
9	$1,25 \cdot 10^2$	$2,27 \cdot 10^2$	$2,27 \cdot 10^2$	$4,22 \cdot 10^{-8}$	$3,47 \cdot 10^1$	$3,47 \cdot 10^1$
10	$2,85 \cdot 10^3$	$6,65 \cdot 10^2$	$3,90 \cdot 10^1$	$7,69 \cdot 10^{-4}$	2,11	$9,54 \cdot 10^1$
11	$2,85 \cdot 10^3$	$3,94 \cdot 10^1$	$6,65 \cdot 10^2$	$7,71 \cdot 10^{-4}$	$9,54 \cdot 10^1$	2,12
12	$2,85 \cdot 10^3$	$3,90 \cdot 10^1$	$6,65 \cdot 10^2$	$7,76 \cdot 10^{-4}$	$9,54 \cdot 10^1$	2,11

Tabla 42: Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga seno en dirección longitudinal.

Tornillo	Tensile MoS_tot_y	Total MoS_tot_u	Gapping MoSg	Sliding MoS_slip	Shear MoS_comb_y	Combined MoS_comb_u
1	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,32 \cdot 10^{-1}$	$9,89 \cdot 10^1$	4,32	$5,81 \cdot 10^{-1}$	$8,30 \cdot 10^{-1}$
2	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,39	$9,93 \cdot 10^{-1}$	$5,71 \cdot 10^{-1}$	$8,11 \cdot 10^{-1}$
3	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,39	$9,93 \cdot 10^{-1}$	$5,71 \cdot 10^{-1}$	$8,11 \cdot 10^{-1}$
4	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,32 \cdot 10^{-1}$	$9,89 \cdot 10^1$	4,31	$5,81 \cdot 10^{-1}$	$8,30 \cdot 10^{-1}$
5	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,39	$9,93 \cdot 10^{-1}$	$5,71 \cdot 10^{-1}$	$8,11 \cdot 10^{-1}$
6	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,39	$9,93 \cdot 10^{-1}$	$5,71 \cdot 10^{-1}$	$8,11 \cdot 10^{-1}$
7	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,39	$9,93 \cdot 10^{-1}$	$5,71 \cdot 10^{-1}$	$8,11 \cdot 10^{-1}$
8	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,32 \cdot 10^{-1}$	$9,89 \cdot 10^1$	4,31	$5,81 \cdot 10^{-1}$	$8,30 \cdot 10^{-1}$
9	$5,82 \cdot 10^{-1}$	$8,32 \cdot 10^{-1}$	$9,89 \cdot 10^1$	4,31	$5,81 \cdot 10^{-1}$	$8,30 \cdot 10^{-1}$
10	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,39	$9,93 \cdot 10^{-1}$	$5,71 \cdot 10^{-1}$	$8,11 \cdot 10^{-1}$
11	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,39	$9,93 \cdot 10^{-1}$	$5,71 \cdot 10^{-1}$	$8,11 \cdot 10^{-1}$
12	$5,74 \cdot 10^{-1}$	$8,19 \cdot 10^{-1}$	3,39	$9,93 \cdot 10^{-1}$	$5,71 \cdot 10^{-1}$	$8,11 \cdot 10^{-1}$

Por último, en el análisis frente a cargas random, volverán a producirse fallos de sliding. En el caso

lateral, todos los tornillos presentarán un margen negativo para este modo de fallo, sin embargo, como se ha comentado anteriormete, este no supone un fallo relevante para la unión analizada.

Es importante resaltar que las fuerzas obtenidas del análisis random calculadas por Nastran se aportan para un RMS. Para obtener una una confianza suficiente en que no se superarán las fuerzas calculadas, los resultados aquí recogidos se multiplicarán por 3 (además de por el factor de seguridad), para contar así con una confianza de 3 RMS a la hora de calcular los márgenes de seguridad.

Tabla 43: Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga random en dirección lateral.

Tornillo	F_X [N]	F_Y [N]	F_Z [N]	M_X [N.m]	M_Y [N.m]	M_Z [N.m]
1	$4,78 \cdot 10^2$	$2,81 \cdot 10^2$	$5,23 \cdot 10^2$	$3,49 \cdot 10^{-3}$	$1,92 \cdot 10^1$	$1,84 \cdot 10^1$
2	$1,86 \cdot 10^3$	$2,86 \cdot 10^2$	$5,55 \cdot 10^2$	$3,20 \cdot 10^{-3}$	$5,75 \cdot 10^1$	4,46
3	$1,86 \cdot 10^3$	$2,86 \cdot 10^2$	$5,55 \cdot 10^2$	$3,20 \cdot 10^{-3}$	$5,75 \cdot 10^1$	4,46
4	$4,78 \cdot 10^2$	$2,81 \cdot 10^2$	$5,23 \cdot 10^2$	$3,49 \cdot 10^{-3}$	$1,92 \cdot 10^1$	$1,84 \cdot 10^1$
5	$7,42 \cdot 10^2$	$2,14 \cdot 10^2$	$1,16 \cdot 10^3$	$7,79 \cdot 10^{-3}$	8,53	$2,60 \cdot 10^1$
6	$7,42 \cdot 10^2$	$2,14 \cdot 10^2$	$1,16 \cdot 10^3$	$7,79 \cdot 10^{-3}$	8,53	$2,60 \cdot 10^1$
7	$7,42 \cdot 10^2$	$2,14 \cdot 10^2$	$1,16 \cdot 10^3$	$7,79 \cdot 10^{-3}$	8,53	$2,60 \cdot 10^1$
8	$4,78 \cdot 10^2$	$2,81 \cdot 10^2$	$5,23 \cdot 10^2$	$3,49 \cdot 10^{-3}$	$1,92 \cdot 10^1$	$1,84 \cdot 10^1$
9	$4,78 \cdot 10^2$	$2,81 \cdot 10^2$	$5,23 \cdot 10^2$	$3,49 \cdot 10^{-3}$	$1,92 \cdot 10^1$	$1,84 \cdot 10^1$
10	$7,42 \cdot 10^2$	$2,14 \cdot 10^2$	$1,16 \cdot 10^3$	$7,79 \cdot 10^{-3}$	8,53	$2,60 \cdot 10^1$
11	$1,86 \cdot 10^3$	$2,86 \cdot 10^2$	$5,55 \cdot 10^2$	$3,20 \cdot 10^{-3}$	$5,75 \cdot 10^1$	4,46
12	$1,86 \cdot 10^3$	$2,86 \cdot 10^2$	$5,55 \cdot 10^2$	$3,20 \cdot 10^{-3}$	$5,75 \cdot 10^1$	4,46

Tabla 44: Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga random en dirección lateral.

Tornillo	Tensile	Total	Gapping	Sliding	Shear	Combined
	MoS_tot_y	MoS_tot_u	MoSg	MoS_slip	MoS_comb_y	MoS_comb_u
1	$5,78 \cdot 10^{-1}$	$8,25 \cdot 10^{-1}$	7,72	$-1,45 \cdot 10^{-1}$	$5,60 \cdot 10^{-1}$	$7,71 \cdot 10^{-1}$
2	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$8,05 \cdot 10^{-1}$	1,24	$-4,92 \cdot 10^{-1}$	$5,46 \cdot 10^{-1}$	$7,47 \cdot 10^{-1}$
3	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$8,05 \cdot 10^{-1}$	1,24	$-4,92 \cdot 10^{-1}$	$5,46 \cdot 10^{-1}$	$7,47 \cdot 10^{-1}$
4	$5,78 \cdot 10^{-1}$	$8,25 \cdot 10^{-1}$	7,72	$-1,45 \cdot 10^{-1}$	$5,60 \cdot 10^{-1}$	$7,71 \cdot 10^{-1}$
5	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,62	$-6,02 \cdot 10^{-1}$	$5,06 \cdot 10^{-1}$	$6,31 \cdot 10^{-1}$
6	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,62	$-6,02 \cdot 10^{-1}$	$5,06 \cdot 10^{-1}$	$6,31 \cdot 10^{-1}$
7	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,62	$-6,02 \cdot 10^{-1}$	$5,06 \cdot 10^{-1}$	$6,31 \cdot 10^{-1}$
8	$5,78 \cdot 10^{-1}$	$8,25 \cdot 10^{-1}$	7,72	$-1,45 \cdot 10^{-1}$	$5,60 \cdot 10^{-1}$	$7,71 \cdot 10^{-1}$
9	$5,78 \cdot 10^{-1}$	$8,25 \cdot 10^{-1}$	7,72	$-1,45 \cdot 10^{-1}$	$5,60 \cdot 10^{-1}$	$7,71 \cdot 10^{-1}$
10	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,62	$-6,02 \cdot 10^{-1}$	$5,06 \cdot 10^{-1}$	$6,31 \cdot 10^{-1}$
11	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$8,05 \cdot 10^{-1}$	1,24	$-4,92 \cdot 10^{-1}$	$5,46 \cdot 10^{-1}$	$7,47 \cdot 10^{-1}$
12	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$8,05 \cdot 10^{-1}$	1,24	$-4,92 \cdot 10^{-1}$	$5,46 \cdot 10^{-1}$	$7,47 \cdot 10^{-1}$

Tabla 45: Fuerzas y momentos sobre los tornillos en el caso de carga random en dirección longitudinal.

Tornillo	F_X [N]	F_Y [N]	F_Z [N]	M_X [N.m]	M_Y [N.m]	M_Z [N.m]
1	$5,39 \cdot 10^2$	$5,47 \cdot 10^1$	$5,47 \cdot 10^1$	$1,17 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^1$	$1,23 \cdot 10^1$
2	$7,33 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^1$	$1,52 \cdot 10^2$	$5,92 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^1$	5,05
3	$7,33 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^1$	$1,52 \cdot 10^2$	$5,91 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^1$	5,05
4	$5,39 \cdot 10^2$	$5,47 \cdot 10^1$	$5,46 \cdot 10^1$	$1,10 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^1$	$1,23 \cdot 10^1$
5	$7,33 \cdot 10^2$	$1,52 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^1$	$5,91 \cdot 10^{-4}$	5,05	$2,15 \cdot 10^1$
6	$7,33 \cdot 10^2$	$1,52 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^1$	$5,92 \cdot 10^{-4}$	5,05	$2,15 \cdot 10^1$
7	$7,33 \cdot 10^2$	$1,52 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^1$	$5,92 \cdot 10^{-4}$	5,05	$2,15 \cdot 10^1$
8	$5,39 \cdot 10^2$	$5,46 \cdot 10^1$	$5,47 \cdot 10^1$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^1$	$1,23 \cdot 10^1$
9	$5,39 \cdot 10^2$	$5,47 \cdot 10^1$	$5,47 \cdot 10^1$	$1,19 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^1$	$1,23 \cdot 10^1$
10	$7,33 \cdot 10^2$	$1,52 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^1$	$5,91 \cdot 10^{-4}$	5,05	$2,15 \cdot 10^1$
11	$7,33 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^1$	$1,52 \cdot 10^2$	$5,91 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^1$	5,05
12	$7,33 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^1$	$1,52 \cdot 10^2$	$5,92 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^1$	5,05

Tabla 46: Márgenes de seguridad en los tornillos frente a los diferentes modos de fallo para el caso de carga random en dirección longitudinal.

Tornillo	Tensile	Total	Gapping	Sliding	Shear	Combined
	MoS_tot_y	MoS_tot_u	MoSg	MoS_slip	MoS_comb_y	MoS_comb_u
1	$5,78 \cdot 10^{-1}$	$8,24 \cdot 10^{-1}$	6,74	5,46	$5,77 \cdot 10^{-1}$	$8,24 \cdot 10^{-1}$
2	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,69	2,09	$5,75 \cdot 10^{-1}$	$8,18 \cdot 10^{-1}$
3	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,69	2,09	$5,75 \cdot 10^{-1}$	$8,18 \cdot 10^{-1}$
4	$5,78 \cdot 10^{-1}$	$8,24 \cdot 10^{-1}$	6,74	5,46	$5,77 \cdot 10^{-1}$	$8,24 \cdot 10^{-1}$
5	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,69	2,09	$5,75 \cdot 10^{-1}$	$8,18 \cdot 10^{-1}$
6	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,69	2,09	$5,75 \cdot 10^{-1}$	$8,18 \cdot 10^{-1}$
7	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,69	2,09	$5,75 \cdot 10^{-1}$	$8,18 \cdot 10^{-1}$
8	$5,78 \cdot 10^{-1}$	$8,24 \cdot 10^{-1}$	6,74	5,46	$5,77 \cdot 10^{-1}$	$8,24 \cdot 10^{-1}$
9	$5,78 \cdot 10^{-1}$	$8,24 \cdot 10^{-1}$	6,74	5,46	$5,77 \cdot 10^{-1}$	$8,24 \cdot 10^{-1}$
10	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,69	2,09	$5,75 \cdot 10^{-1}$	$8,18 \cdot 10^{-1}$
11	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,69	2,09	$5,75 \cdot 10^{-1}$	$8,18 \cdot 10^{-1}$
12	$5,76 \cdot 10^{-1}$	$8,22 \cdot 10^{-1}$	4,69	2,09	$5,75 \cdot 10^{-1}$	$8,18 \cdot 10^{-1}$

4. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha realizado la integración de dos bandejas, diseñadas previamente por cada uno de los integrantes del equipo, en la estructura completa de un microsatélite.

Se considera que se han logrado un resultado de diseño satisfactorio que cumple con todos los requisitos impuestos en el enunciado, haciéndolo con una masa razonable. Si bien, también se considera que se podría haber obtenido un resultado más ligero diseñando la bandeja superior de manera individual, ya que esta no está tan solicitada estructuralmente como las bandejas B y C. Del mismo modo, el margen respecto a requisitos de las frecuencias laterales todavía es amplio, lo que deja entrever la posibilidad de reducir también la masa de otros componentes.

Se presentan los resultados del análisis de la estructura diseñada sometida a cargas estáticas, seno y random en cada uno de los ejes, calculando los márgenes de seguridad en todos los elementos estructurales

y en los tornillos de la interfaz. Tras todos estos análisis, se logra un diseño final que presenta márgenes positivos frente a todos los modos de fallo relevantes, por lo que el diseño se considera exitoso.