

# MANUAL DE CÁLCULO ESTRUCTURAL

1<sup>a</sup> Edición

Andrés García Pérez  
Jorge Javier Fernández de Toro Espejel

## PARTE 2: ANEXOS

*Instituto  
Universitario de  
Microgravedad  
"Ignacio Da Riva"*

## **ÍNDICE**

<b>ANEXO 1: MODELIZACIÓN FEM DEL SATÉLITE UPMSAT-2 .....</b>	<b>4</b>
1    Introducción .....	4
2    Documentos aplicables y de referencia .....	4
3    Definiciones y abreviaturas .....	4
4    Descripción de la estructura .....	5
4.1    Bandejas .....	6
4.1.1    Bandeja A .....	6
4.1.2    Bandeja B .....	7
4.1.3    Bandeja C .....	8
4.1.4    Bandeja D .....	8
4.2    Barras de sección L .....	9
4.3    Paneles de cortadura.....	10
4.4    Paneles de cierre.....	12
4.5    Paneles de sustrato .....	12
4.6    Sistema de separación .....	14
5    Proceso de creación del modelo FEM de la estructura del UPMSat-2.....	15
5.1    Comienzo con el programa MSC Patran.....	16
5.2    Comandos esenciales para la creación del modelo FEM .....	17
5.3    Consejos para la creación del modelo FEM.....	19
5.3.1    Utilización de grupos .....	19
5.3.2    Creación y modificación de geometría.....	20
5.3.3    Asignación de propiedades a los elementos .....	21
5.3.4    Numeración de elementos y nodos.....	21
5.3.5    Operaciones de verificación geométrica y verificación del mallado .....	22
5.3.6    Creación separada de modelos .....	23
5.4    Creación de los materiales.....	24
5.5    Creación de la bandeja A.....	24
5.6    Creación de la bandeja B.....	26
5.7    Creación de las bandejas C y D.....	28
5.8    Creación de las barras verticales de sección L .....	29
5.9    Creación de los paneles de cortadura A-B .....	31
5.10    Creación de los paneles de cortadura B-C.....	32
5.11    Creación de los paneles de cierre .....	33
5.12    Creación de los paneles de sustrato.....	34
5.13    Creación del sistema de separación.....	36
5.13.1    Importación del modelo CATIA del sistema de separación .....	36
5.13.2    Creación del modelo FEM simplificado del sistema de separación.....	37
5.14    Creación de las uniones entre piezas.....	38
5.15    Creación de las masas puntuales que representan los equipos no estructurales .....	41

5.16	Aplicación de la masa no estructural y procesos de verificación .....	44
5.17	Aplicación de las condiciones de contorno .....	45
6	Configuración de los análisis .....	48
6.1	Chequeos .....	48
6.2	Análisis de modos propios .....	48
6.3	Análisis estático.....	48
6.4	Análisis de vibraciones sinusoidales .....	49
6.5	Análisis de vibraciones aleatorias .....	49
<b>ANEXO 2: EJEMPLOS DE MODELIZACIÓN DE LAS PLACAS DE LA EBOX DEL UPMSAT-2.....</b>		<b>50</b>
1	Introducción .....	50
2	Documentos aplicables y de referencia.....	50
3	Definiciones y abreviaturas.....	50
4	Descripción de la estructura .....	51
4.1	Carcasa .....	52
4.1.1	Placa inferior.....	53
4.1.2	Placa superior.....	53
4.1.3	Placas laterales .....	53
4.1.4	Placa frontal .....	54
4.1.5	Placa trasera .....	54
4.1.6	Pestañas reforzadas .....	54
5	Estrategias de modelización .....	55
5.1.1	Modelización esquemática .....	55
5.1.2	Modelización detallista .....	55
5.1.3	Modelización híbrida .....	56
6	Ejemplo de modelización con la estrategia esquemática - Placa inferior.....	57
6.1	Configuración de las preferencias del modelo .....	57
6.2	Importar el modelo CAD (archivo step).....	57
6.3	Creación de grupos.....	59
6.4	Operaciones de creación de geometría.....	59
6.5	Creación de materiales y propiedades .....	62
6.6	Operaciones de mallado .....	65
6.7	Operaciones de verificación y corrección del mallado 2D.....	69
6.8	Creación de elementos 3D.....	72
6.9	Operaciones de verificación final.....	73
6.10	Modelo final .....	74
7	Ejemplo de modelización con la estrategia detallista - Placa lateral.....	75
7.1	Configuración de las preferencias del modelo .....	75
7.2	Importar el modelo CAD (archivo step).....	75
7.3	Operaciones de creación de geometría.....	77
7.4	Operaciones de verificación de geometría .....	79

## INSTITUTO UNIVERSITARIO DE MICROGRAVEDAD “IGNACIO DA RIVA”

7.5	Creación de materiales y propiedades .....	81
7.6	Creación del mallado.....	82
7.7	Operaciones de verificación del mallado y de los elementos.....	83
7.8	Modelo final .....	87

## **ANEXO 1: MODELIZACIÓN FEM DEL SATÉLITE UPMSAT-2**

### **1 Introducción**

El propósito de este documento es describir la estructura del UPMSat-2 y detallar los pasos para la creación del modelo de elementos finitos (FEM) y la configuración de los análisis estructurales.

### **2 Documentos aplicables y de referencia**

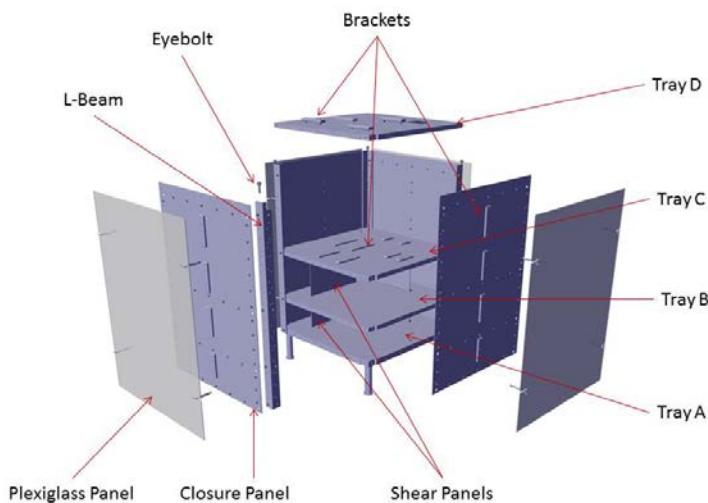
- [1] García Pérez, A. y Fernández de Toro Espejel, J.J.: “Manual de cálculo estructural”
- [2] Pérez, J. “UPMSat-2 Geometry Envelope”
- [3] MSC Patran 2012.2: User’s Guide
- [4] MSC Nastran 2012: Getting Started with MSC Nastran User’s Guide
- [5] MSC Nastran 2013.1: Quick Reference Guide
- [6] MSC Nastran 2013.1: Linear Static Analysis User’s Guide
- [7] MSC Patran 2012.2: Reference Manual Part 1: Basic Functions
- [8] MSC Patran 2012.2: Reference Manual Part 2: Geometry Modeling
- [9] MSC Patran 2012.2: Reference Manual Part 3: Finite Element Modeling

### **3 Definiciones y abreviaturas**

AOCS	Attitude and Orbital Control System
CAD	Computer Aided Design
DOF	Degree of freedom (grados de libertad)
FEM	Modelo de elementos finitos
MPC	Ligadura multipunto
MSC	MacNeal-Schwendler Corporation
RBE2	Elemento rígido (tipo 2)
UPM	Universidad politécnica de Madrid

## 4 Descripción de la estructura

La estructura del UPMSat-2 consta de 4 bandejas horizontales (A, B, C y D) sobre las que se colocarán los equipos, unidas a 4 barras verticales de sección L en cada esquina. Entre las bandejas A y B se colocan 4 paneles de cortadura verticales, y entre las bandejas B y C se colocan otros 4 paneles de cortadura. La estructura primaria se completa con 4 paneles de cierre (1 en cada cara lateral del cubo), 4 paneles de sustrato (unidas a cada panel de cierre a través de los brackets) y 1 panel de sustrato horizontal (unida mediante brackets a la bandeja D). Toda la estructura primaria es sujetada en la base a través del sistema de separación, que consta de dos piezas unidas a través de un tornillo maestro que incorpora en su interior un dispositivo pirotécnico que permite la separación del satélite con el vehículo lanzador.



**Figura 4-1: Esquema de la estructura primaria UPMSat-2**

NAME	CODE	PART/PRODUCT FILE NAME	PART/PRODUCT NAME	DIMENSIONS	THICKNESS
TRAY A	STRA	US2-E-CM-40100CP-04F-D	US2-E-CM-40100CP-04F-D_STRA	446x446x20	-
TRAY B	STRB	US2-E-CM-40200CP-03A-D	US2-E-CM-40200CP-03A-D_STRB	446x446x15	-
TRAY C	STRC	US2-E-CM-40300CP-03A-D	US2-E-CM-40300CP-03A-D_STRC	446x446x15	-
TRAY D	STRD	US2-E-CM-40400CP-04A-D	US2-E-CM-40400CP-04A-D_STRD	446x446x15	-
SEPARATOR AD1	SSPAD1	US2-E-CM-40510CP-03A-D	US2-E-CM-40510CP-03A-D_SSPAD1	30x30x600	5,2
SEPARATOR AD2	SSPAD2	US2-E-CM-40610CP-03A-D	US2-E-CM-40610CP-03A-D_SSPAD2	30x30x600	5,2
SEPARATOR AD3	SSPAD3	US2-E-CM-40710CP-03A-D	US2-E-CM-40710CP-03A-D_SSPAD3	30x30x600	5,2
SEPARATOR AD4	SSPAD4	US2-E-CM-40810CP-03A-D	US2-E-CM-40810CP-03A-D_SSPAD4	30x30x600	5,2
LATERAL PANEL X+	SLPXR	US2-E-CM-40910CP-01D-D	US2-E-CM-40910CP-01D-D_SLPXR	444x600x1,5	-
LATERAL PANEL X-	SLPXL	US2-E-CM-41010CP-01D-D	US2-E-CM-41010CP-01D-D_SLPXL	444x600x1,5	-
LATERAL PANEL Y+	SLPYR	US2-E-CM-41110CP-01D-D	US2-E-CM-41110CP-01D-D_SLPYR	444x600x1,5	-
LATERAL PANEL Y-	SLPYL	US2-E-CM-41210CP-01D-D	US2-E-CM-41210CP-01D-D_SLPYL	444x600x1,5	-
SHEAR PANEL	SSH_P	US2-E-CM-40130CP-04A-D	US2-E-CM-40130CP-04A-D_SSH_P	226x12x102,5	2
SHEAR PANEL	SSH_P	US2-E-CM-40230CP-02A-D	US2-E-CM-40230CP-02A-D_SSH_P	226x12x155	2
BRACKET MAG	BRKMAG	US2-E-CM-40310CP-01A-D	US2-E-CM-40310CP-01A-D_BRKMAG	95x15x6	-
BRACKET MGMT	BRKMGMT	US2-E-CM-40320CP-01A-D	US2-E-CM-40320CP-01A-D_BRKMGMT	50x15x6	-
BRACKET MECH	BRKMEC	US2-E-CM-40330CP-01A-D	US2-E-CM-40330CP-01A-D_BRKMEC	70x15x6	-
BRACKET LAP-SSL	BRKLAP	US2-E-CM-40340CP-01A-D	US2-E-CM-40340CP-01A-D_BRKLAP	110x15x6	-
BRACKET D	BRKTD	US2-E-CM-40411CP-01A-D	US2-E-CM-40411CP-01A-D_BRKTD	96x21x9,2	-
HIGHER BRACKET	SHBRAKT	US2-E-CM-40920CP-02A-D	US2-E-CM-40920CP-02A-D_SHBRAKT	90x20x6,3	-
BRACKET LOWER	SBRAKTL	US2-E-CM-40930CP-02A-D	US2-E-CM-40930CP-02A-D_SBRAKTL	78x20x6,3	-

**Tabla 4-1: Dimensiones de las piezas estructurales**

Todas las piezas estructurales que conforman la estructura primaria y el sistema de separación están fabricadas con la aleación de aluminio EN AW 7075-T6.

Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$	2800
Módulo elástico (GPa)	E	71
Coeficiente de Poisson	v	0.33
Límite elástico (MPa)	$\sigma_Y$	434
Resistencia última (MPa)	$\sigma_U$	510
Coeficiente de expansión térmica ( $\text{K}^{-1}$ )	$\alpha$	$22 \times 10^{-6}$

Tabla 4-2: Propiedades de los materiales

## 4.1 Bandejas

### 4.1.1 Bandeja A

La bandeja A consta de una placa cuadrada de 446x446 mm, de espesor 1 mm, con una distribución compleja de rigidizadores. La altura de la bandeja (contando con los rigidizadores) es de 20 mm.

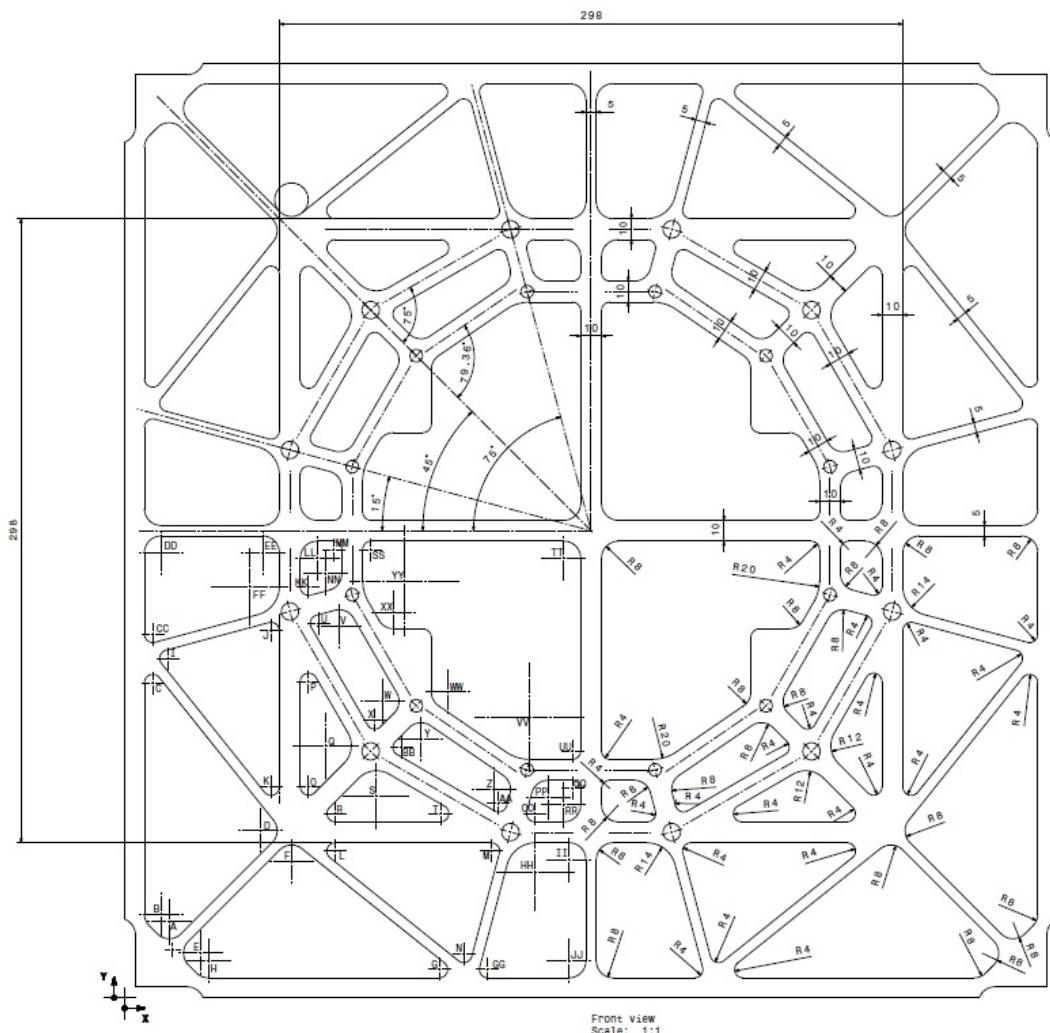


Figura 4-2: Dimensiones de los rigidizadores de la bandeja A

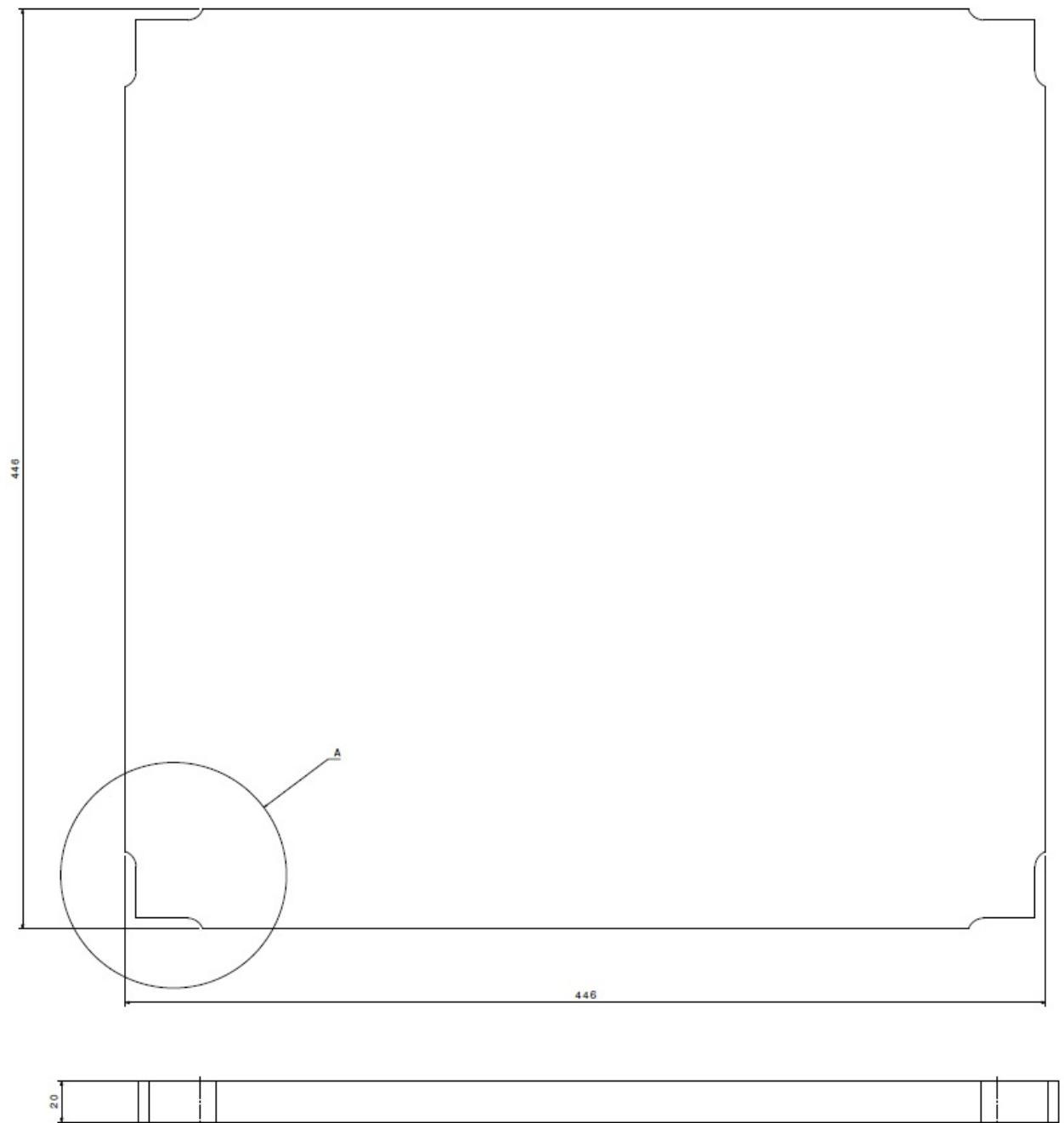


Figura 4-3: Dimensiones generales de la bandeja A

#### 4.1.2 Bandeja B

La bandeja B consta de una placa cuadrada de 446x446 mm, de espesor 2 mm. Tiene 4 rigidizadores exteriores de sección rectangular (13 mm x 9,5 mm) y una distribución ortogonal de rigidizadores interiores de sección rectangular (13 mm x 5 mm). Por lo tanto, contando los con 2 mm de espesor de la placa y los 13 mm de altura de los rigidizadores, la altura total de la bandeja es de 15 mm.

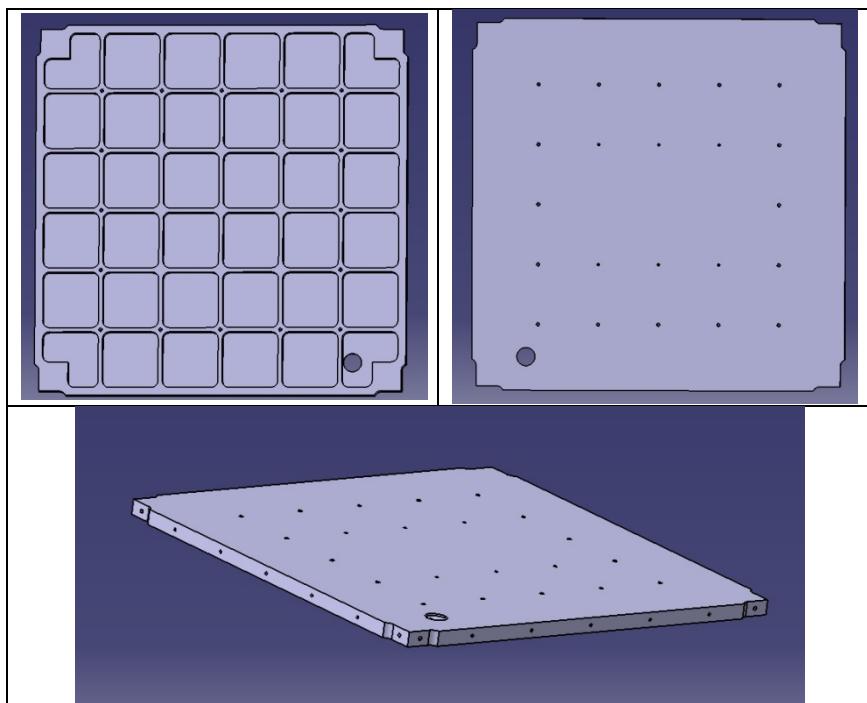


Figura 4-4: Modelo de Catia de la bandeja B

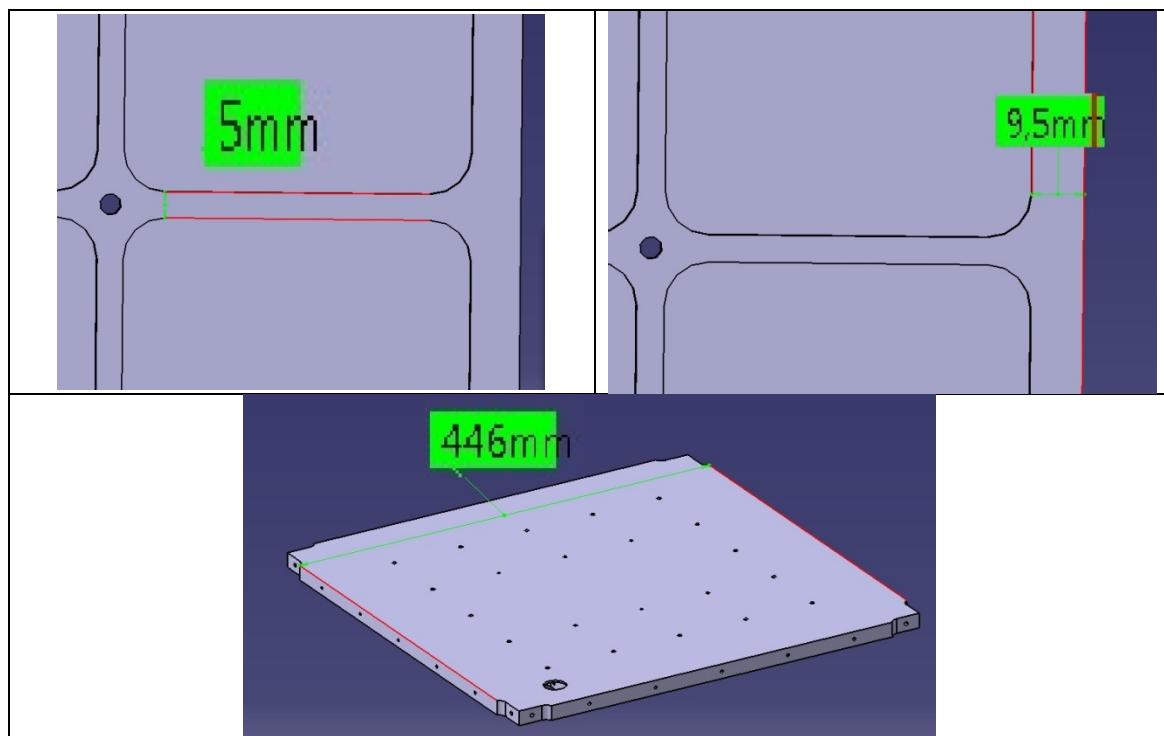


Figura 4-5: Valores de las dimensiones de la bandeja B

#### 4.1.3 Bandeja C

La bandeja C es exactamente igual que la bandeja B.

#### 4.1.4 Bandeja D

La bandeja D parte del mismo diseño que las bandejas B y C, pero se diferencia en el agujero que afecta a parte de la placa y a un segmento de rigidizador interior.

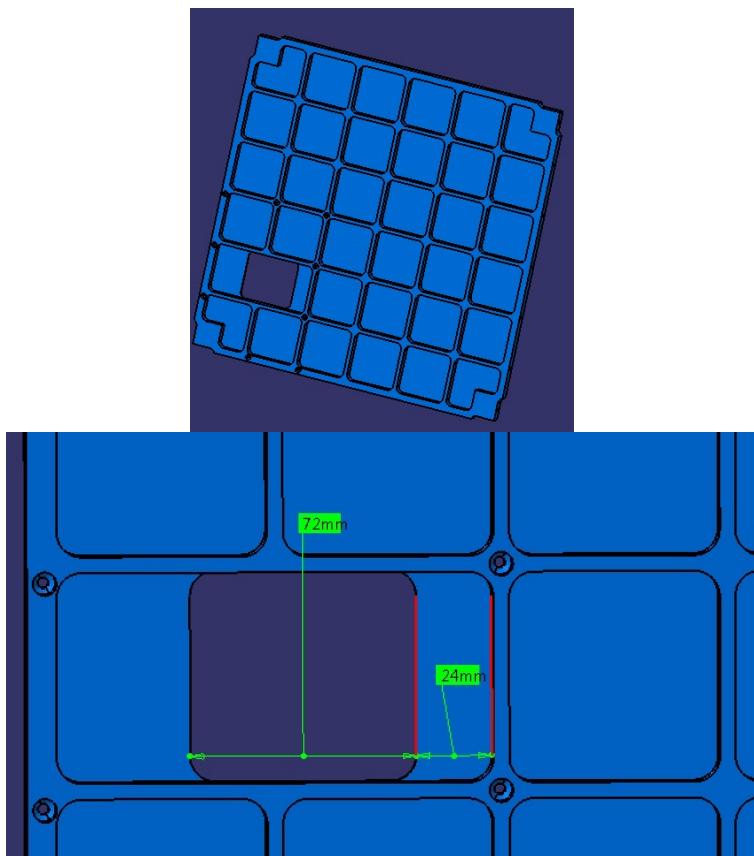


Figura 4-6: Diseño de la bandeja D en CATIA

## 4.2 Barras de sección L

Sujetando las 4 bandejas a través de las esquinas se encuentran 4 barras verticales con sección en L.



Figura 4-7: Diseño de la barra vertical en Catia

La longitud de las barras es igual a la altura del satélite desde la primera bandeja, es decir, 600 mm. La sección de cada barra tiene forma de L, cuyos lados miden 30x30 mm, y los espesores de ambos lados son de 5.2 mm.

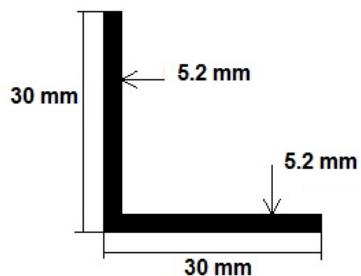


Figura 4-8: Sección de las barras verticales

La localización vertical de cada bandeja se indica en la Figura 4-9.

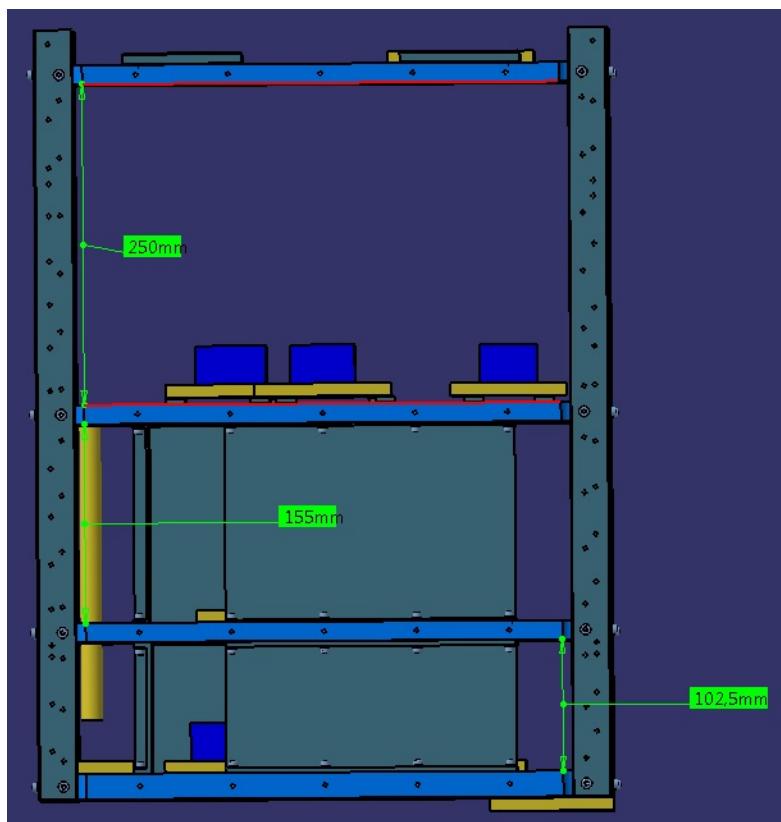


Figura 4-9: Posición de las bandejas en el UPMSat-2

### 4.3 Paneles de cortadura

Entre las bandejas A y B existe un juego de 4 paneles de cortadura unidas a la superficie de la bandeja A y a los rigidizadores de la bandeja B. Cada panel consta de una lámina vertical de 102.5 mm de alto y 226 mm de largo, con un espesor de 4 mm. Además, cada panel de cortadura dispone de dos láminas horizontales o pletinas de 4 mm de espesor, que son las que servirán para unir cada panel de cortadura a las bandejas.

Los paneles de cortadura deben unirse a la bandeja B a través los rigidizadores interiores de ésta (ver Figura 4-12).

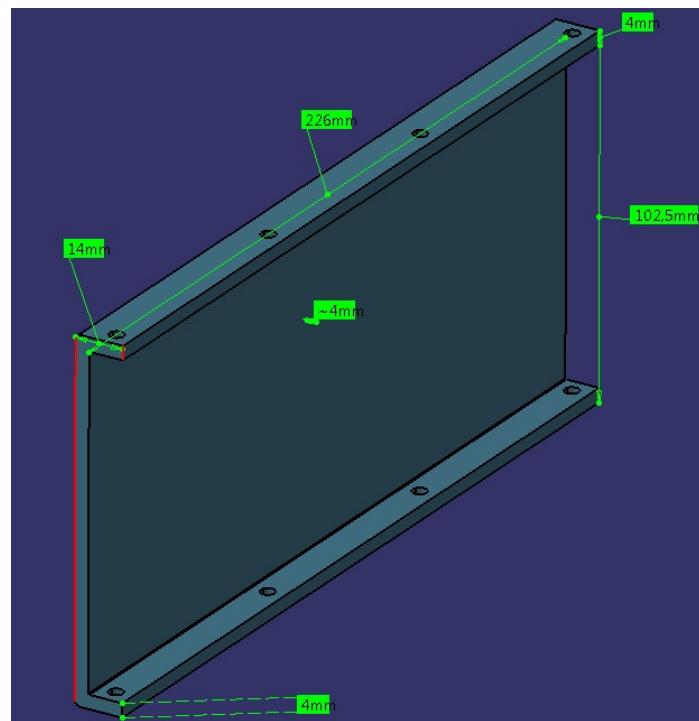


Figura 4-10: Panel de cortadura A-B con las medidas básicas

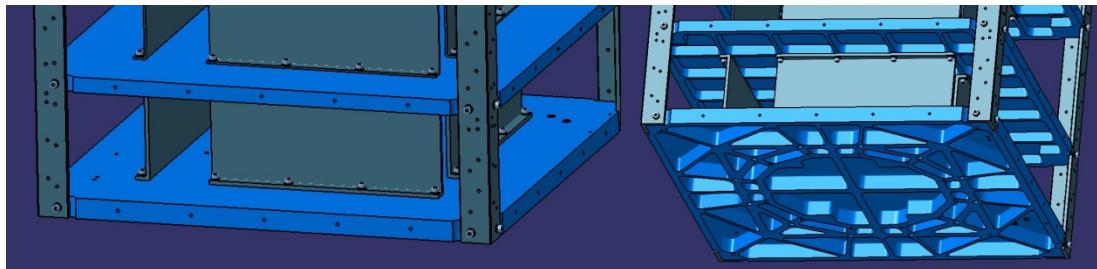


Figura 4-11: Diseño en Catia de la estructura, destacando los paneles de cortadura A-B

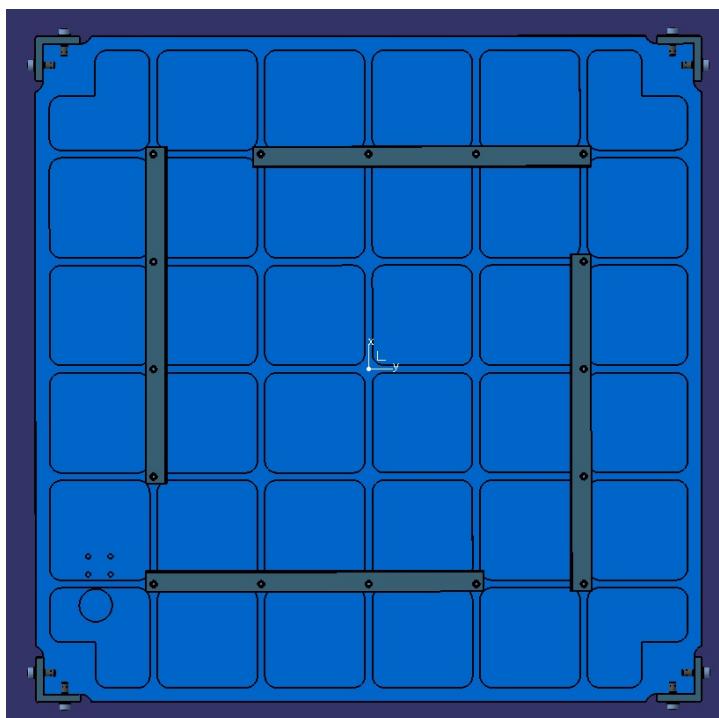
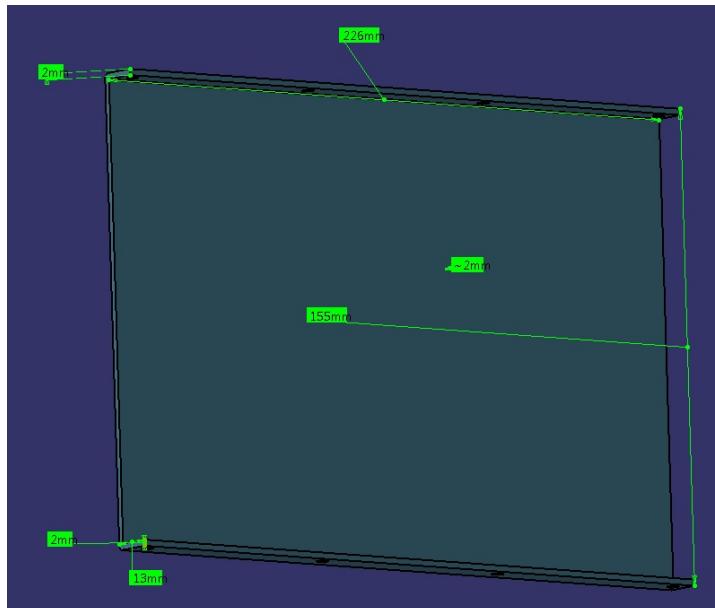


Figura 4-12: Posicionamiento de los paneles de cortadura

Entre las bandejas B y C existe un segundo juego de 4 paneles de cortadura unidas a la superficie de la bandeja B y a los rigidizadores de la bandeja C, de forma similar a los paneles de cortadura A-B.

Cada panel de cortadura B-C tiene un espesor de 2 mm, y sus dimensiones son de 155 mm de altura y 226 mm de ancho. Al igual que los paneles A-B, éstos tienen dos láminas horizontales de 2 mm de espesor que sirven para unir cada panel de cortadura a las bandejas.



**Figura 4-13: Panel de cortadura B-C con las medidas básicas**

La localización de los paneles de cortadura B-C es similar que los paneles A-B.

#### 4.4 Paneles de cierre

Cerrando las caras laterales del satélite se encuentran 4 paneles de cierre de 600x446 mm, y con un espesor de 1.5 mm. Cada panel de cierre se une a dos barras de sección L, y a uno de los bordes de cada bandeja.

#### 4.5 Paneles de sustrato

Hay 4 paneles de sustrato verticales, unidos mediante brackets y tornillos espaciadores a cada panel de cierre. Cada uno de estos paneles de sustrato sirve para apoyar el conjunto de paneles solares del UPMSat-2. Cada panel de sustrato mide 600x446 mm (iguales que los paneles de cierre), y tienen un espesor de 2 mm.

Además existe un 5º panel de sustrato situado sobre la bandeja D, unida a ésta por 4 brackets y tornillos espaciadores. Mide 0.446x0.223 mm, y tiene un espesor de 1.5 mm. La función de este panel de sustrato es la de servir como soporte de los paneles solares de la cara Z+ del satélite (cara superior).

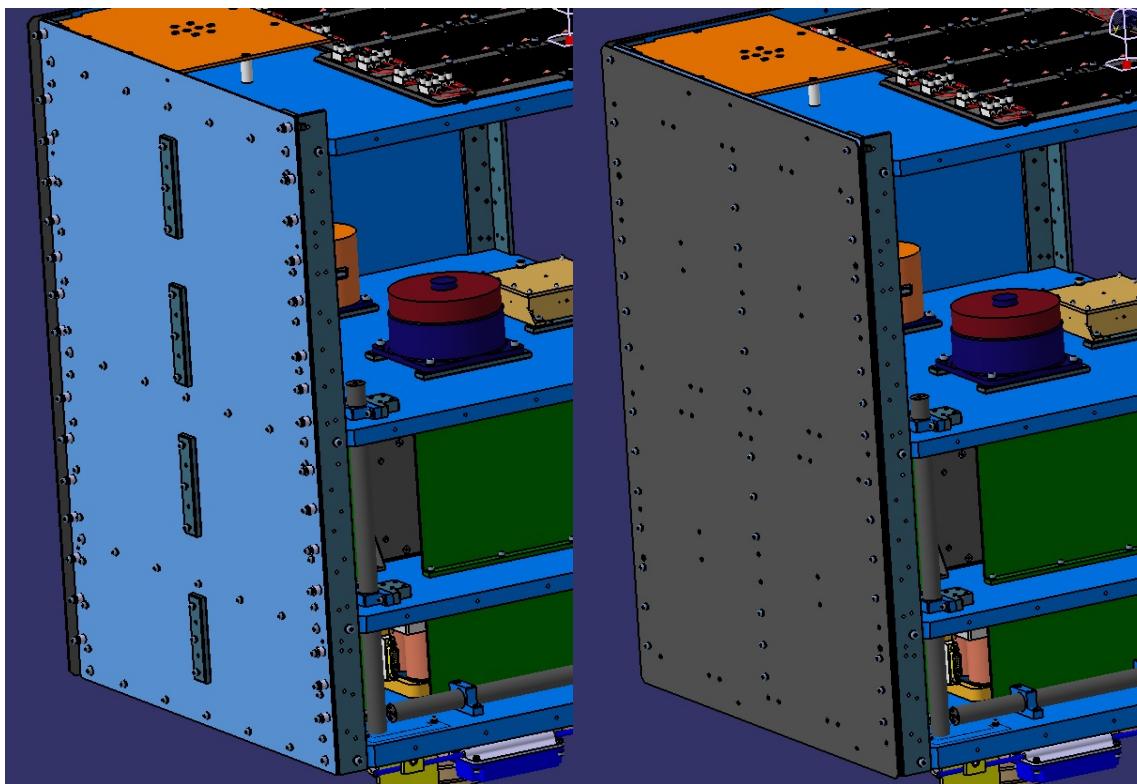


Figura 4-14: Diseño en Catia del panel de cierre (con brackets) y del panel de sustrato vertical respectivamente

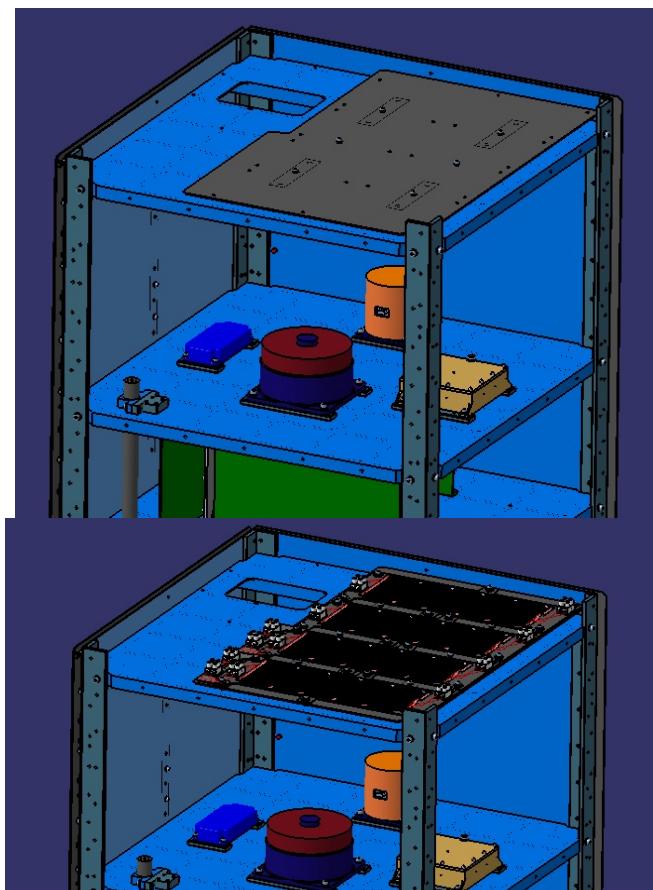


Figura 4-15: Diseño en Catia del panel de sustrato horizontal sin células solares y con células solares respectivamente

## 4.6 Sistema de separación

El sistema de separación del UPMSat-2 es una estructura compleja compuesta de dos piezas unidas entre sí a través de un tornillo central. Este tornillo de acero está hueco y dentro dispone de un dispositivo pirotécnico, que al activarse, parte el tornillo en dos permitiendo la separación entre las dos piezas. Una está unida al adaptador (junto con la estructura del lanzador) y la otra pieza está unida a la bandeja A del satélite.

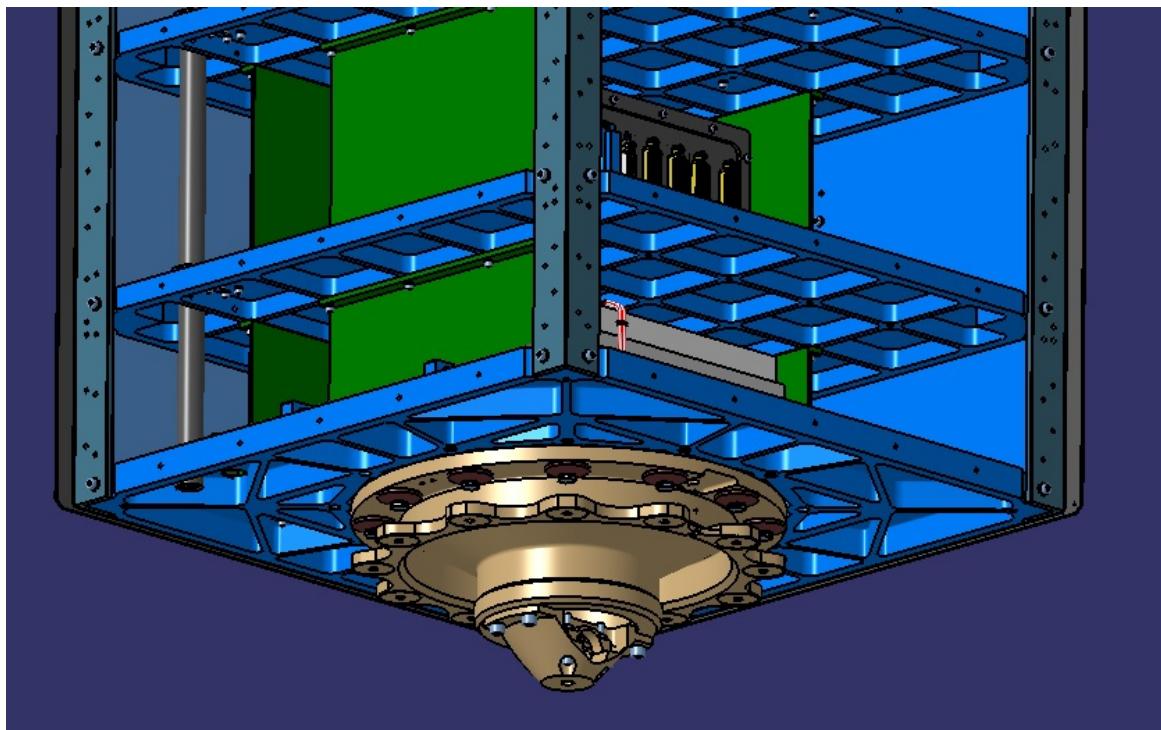


Figura 4-16: Diseño en Catia del sistema de separación

## 5 Proceso de creación del modelo FEM de la estructura del UPMSat-2

Para crear cualquier tipo de estructura FEM mediante el programa MSC Patran, el proceso a seguir es el siguiente:

1. Creación o importación de la geometría preliminar.
2. Modificación de la geometría preliminar para obtener el modelo geométrico.
3. Verificación del modelo geométrico, para asegurarse de que queda adecuadamente conectado y que las entidades geométricas no presentan problemas (ver Tabla 5-2).
4. Creación de los materiales del modelo mediante la definición de los parámetros de cada material ( $E$ ,  $\rho$ ,  $v$ , etc...).
5. Creación de las propiedades de los elementos estructurales. Cada propiedad hace referencia a uno de los materiales previamente creados, y se incluye el valor de las dimensiones de la sección (para elementos 1D) o el valor del espesor (para elementos 2D).
6. Creación de la malla que constituye el conjunto de nodos y elementos para generar el modelo FEM a partir del modelo geométrico. Este proceso se divide en las siguientes tareas:
  - a. Creación de la premalla o semilla de malla, que indica el número de elementos o el tamaño medio de los elementos a lo largo de las líneas que definen el contorno de las superficies o sólidos.
  - b. Creación de la malla propiamente dicha, definiendo para cada malla, el valor inicial de la numeración de los nuevos nodos y elementos que se vayan a generar, y haciendo referencia a una propiedad previamente creada que define los parámetros (material, espesor o sección) de los nuevos elementos.
7. Verificación de cada malla mediante una serie de operaciones que garanticen que los elementos cumplen con los requisitos de forma y que la malla no presente discontinuidades indeseadas (ver Tabla 5-5).
8. Creación de las masas puntuales que representan cada equipo que no forma parte de la estructura, pero que deben estar presentes en los análisis estructurales (la masa de estos equipos es determinante). Se debe definir las características básicas de cada equipo en su masa puntual correspondiente, tomando estos valores a través del mass budget del satélite.
9. Creación de los elementos rígidos, usualmente los denominados RBE2, para unir cada masa puntual con los nodos del modelo estructural y para unir distintas piezas estructurales entre sí. Es decir, estos elementos rígidos representan las uniones de una forma simplificada. Otra alternativa es representar mediante elementos elásticos tipo CELAS o CBUSH cada tornillo, y unir estos elementos a las piezas estructurales mediante RBE2.
10. Modificación de cada propiedad para incluir los valores de la masa no estructural (NSM). De esta forma, se consigue corregir el valor de la masa total de cada pieza y ajustarlo con lo que corresponde en el mass budget. Esta masa no estructural debe representar todo el conjunto de masa extra que incorpora el satélite (cableado, revestimientos, etc...) y que no se puede representar como masa estructural ni como masa puntual.
11. Operaciones de comprobación para garantizar que el modelo FEM final representa fielmente a la estructura real, tanto desde el punto de vista de masa como desde el punto de vista de rigidez. Además puede ser necesario realizar reenumeraciones de nodos o

elementos para aquellas partes que lo requieran, para conseguir que cada pieza o zona estructural tenga un rango de numeración bien definido y distingible del resto de piezas.

12. Creación de las condiciones de contorno y cargas cuando se requiera. En este punto, sólo hace falta en la mayoría de los casos crear restricciones de punto único (SPC) a los nodos que definen la interfaz del satélite (generalmente son unos pocos nodos que representan los tornillos que unen el satélite con el adaptador del vehículo lanzador). Para definir las cargas o fuerzas aplicadas, se suele realizar a través de los cabeceros de los análisis correspondientes como veremos a continuación.
13. Una vez finalizado la creación del modelo FEM, se debe configurar los cabeceros estándar de cada análisis para adaptarlo a un modelo particular. Los análisis estructurales más usuales son los siguientes:
  - a. Análisis de modos propios.
  - b. Análisis estático (uno en cada eje y/o combinación).
  - c. Análisis de vibraciones sinusoidales (uno en cada eje).
  - d. Análisis de vibraciones aleatorias (uno en cada eje).
  - e. Análisis termoelástico.
  - f. Análisis de pandeo.
  - g. Análisis de choque.
14. Tras finalizar cada análisis, el siguiente paso es realizar las actividades de posproceso, que incluyen la evaluación de los resultados, la visualización sobre el modelo de estos resultados y finalmente, la realización de informes que incluya toda la información referente a las características del modelo y a los resultados obtenidos.

En muchos casos, se puede crear los elementos de una pieza del modelo antes de iniciar la geometría de otras partes del modelo. Es decir, es usual aplicar las secuencias iniciales (del paso 1 al 7) por cada pieza, en vez de todo el conjunto a la vez.

A continuación se expone los pasos para la creación de la estructura del UPMSat-2. En este caso, el proceso de creación del modelo es pieza a pieza, es decir, primero se crea los materiales (paso 4) y después se ejecutan los pasos del 1 al 3 y del 5 al 7 para cada pieza de forma separada. Finalmente, se ejecutan el resto de los pasos para todo el modelo siguiendo el orden establecido.

## 5.1 Comienzo con el programa MSC Patran

El programa MSC Patran es el que se utiliza para las operaciones de preproceso (creación del modelo FEM y aplicación de condiciones de contorno) y para las operaciones de posproceso (importación de los resultados y visualización). Por lo tanto, es importante tener en cuenta los manuales de este programa, así como el Manual de cálculo estructural [1].

Una vez iniciado el programa, el primer paso es seleccionar el código y el tipo de análisis, así como el tamaño del modelo (valor aproximado) que aparece en el menú inicial.

- Tipo de análisis: Estructural
- Código de análisis: Nastran
- Tamaño del modelo: 0.6 (m).

Es importante tener en cuenta que en este programa no se especifica explícitamente el sistema de unidades. Por lo que el usuario debe procurar trabajar siempre en unidades del sistema internacional. Es decir, el valor de cada dimensión longitudinal se introduce siempre en metros, el módulo elástico (E) en pascales (pa), la densidad en kg/m<sup>3</sup>, etc...

## 5.2 Comandos esenciales para la creación del modelo FEM

Antes de empezar la geometría de las primeras piezas, se debe tener en cuenta cuáles son los comandos más utilizados para la creación de geometría, creación de propiedades, creación de mallado y verificación.

<b>Operaciones para la creación y modificación de geometría</b>	
Creación de puntos	Geometry/Create/Point
Creación de curvas definidas por 2 puntos	Geometry/Create/Curve/Point/2 Point
Creación de circunferencias	Geometry/Create/Curve/2D Circle
Creación de superficies planas regulares (3 o 4 lados)	Geometry/Create/Surface/Edge
Creación de superficies no regulares (más de 4 lados y/o con agujeros)	Geometry/Create/Surface/Trimmed
Extracción de una cara de un sólido	Geometry/Create/Surface/Extract/Face
División de una curva en dos por un punto intermedio	Geometry/Edit/Curve/Break/Point
División de una superficie en dos por una curva interior	Geometry/Edit/Surface/Break/Curve
Creación de sistemas de coordenadas	Geometry/Create/Coord
Borrado de entidades geométricas	Geometry/Delete

Tabla 5-1: Operaciones útiles para la creación de la geometría

<b>Operaciones de verificación de la geometría</b>	
Equivalencia de puntos	Geometry/Edit/ Point/Equivalence
Verificación de la continuidad de superficies adyacentes	Geometry/Verify/ Surface/Boundary
Comprobación de que no haya superficies duplicadas	Geometry/Verify/ Surface/Duplicates
Comprobación de que las direcciones normales de superficies copланarias apuntan la misma dirección	Geometry>Show/ Surface/Normal
Corrección de las direcciones normales erróneas de las superficies	Geometry/Edit/ Surface/Reverse
Comprobación de la congruencia de las superficies que delimitan un sólido	Geometry/Verify/Solid/B-rep
Corrección de la continuidad entre superficies adyacentes con vértices no compartidos	Geometry/Edit/Surface/Edge Match (option Surface-Point)
Corrección de la continuidad entre superficies adyacentes con vértices compartidos	Geometry/Edit/Surface/Edge Match (option 2 Surface)

Tabla 5-2: Operaciones útiles para la verificación de geometría

<b>Operaciones para la creación y modificación de las propiedades y materiales</b>	
Creación de materiales	Properties/Materials/Create/Isotropic/Manual Input
Creación de propiedades para masas puntuales	Properties/Element Properties/Create/0D/ Mass/Lumped
Creación de propiedades de vigas (rigidez a flexión, tracción-compresión, torsión y cortadura)	Properties/Element Properties/Create/1D/Beam
Creación de propiedades de varillas y cables (sólo rigidez a tracción-compresión)	Properties/Element Properties/Create/1D/Rod

Creación de propiedades de muelles	Properties/Element Properties/Create/1D/Spring
Creación de propiedades de láminas	Properties/Element Properties/Create/2D/Shell
Modificación de propiedades	Properties/Element Properties/Modify
Eliminación de propiedades	Properties/Element Properties/Delete

Tabla 5-3: Operaciones útiles para la creación de propiedades

<b>Operaciones para la creación de los elementos (malla)</b>	
Creación de la premalla uniforme	Meshing/Create/Mesh Seed/Uniform
Creación de la malla sobre una curva (creación de elementos 1D)	Meshing/Create/Mesh/Curve Topology: Bar2
Creación de la malla sobre una superficie regular (creación de elementos 2D)	Meshing/Create/Mesh/Surface Element Shape: Quad Mesher: Isomesh Topology: Quad4
Creación de la malla sobre una superficie no regular (creación de elementos 2D)	Meshing/Create/Mesh/Surface Element Shape: Quad Mesher: Paver o Hybrid Topology: Quad4
Creación de nodos puntuales (para las masas puntuales y otros usos)	Meshing/Create/Node/Edit
Creación de elementos individuales no pertenecientes a mallas	Meshing/Create/Element/Edit
Creación de elementos rígidos RBE2	Meshing/Create/MPC/RBE2
Operaciones de transformación de elementos (traslación, rotación o simetría)	Meshing/Transform/Element/...
Renumeración de nodos o elementos	Meshing/Renumber
Eliminación de nodos, elementos o mallas	Meshing/Delete

Tabla 5-4: Operaciones útiles para la creación de elementos, nodos y mallado

<b>Operaciones de verificación del mallado</b>	
Verificación de que no hay elementos duplicados	Meshing/Verify/ Element/Duplicates
Equivalencia de nodos	Meshing/Equivalence
Comprobación de que las direcciones normales de elementos 2-D adyacentes apuntan a la misma dirección	Meshing/Verify/ Element/Normals
Verificación de que los bordes libres sean los adecuados	Meshing/Verify/ Element/Boundaries
Verificación de que la conectividad de los elementos 3D es correcta	Meshing/Verify/ Element/Connectivity
Verificación de los elementos QUAD	Meshing/Verify/QUAD/All
Verificación de los elementos TRIA	Meshing/Verify/TRIA/ All
Verificación de los elementos TET	Meshing/Verify/TET/ All
Verificación de los elementos WEDGE	Meshing/Verify/ WEDGE/All
Verificación de los elementos HEX	Meshing/Verify/HEX/ All
Verificación de la posición de los nodos medios	Meshing/Verify/ Midnode/Tangent Offset
Verificación de los ángulos de los nodos medios	Meshing/Verify/ Midnode/Normal Offset

Tabla 5-5: Operaciones útiles para la verificación del mallado

<b>Operaciones de aplicación de condiciones de carga y de contorno</b>	
Creación de un caso de carga	Loads/BCs / Load Cases / Create
Creación de una restricción nodal SPC	Loads/BCs / Load/Boundary Conditions / Create / Displacement / Nodal / Standard
Modificación de un caso de carga	Loads/BCs / Load Cases / Modify

Eliminación de restricciones	Loads/BCs / Load/Boundary Conditions / Delete / Displacement
------------------------------	---

Tabla 5-6: Operaciones útiles para la aplicación de condiciones de carga y de contorno

<b>Operaciones auxiliares</b>	
Creación de grupos por selección de entidades	Group/Create>Select Entity
Creación de grupos por propiedades	Group/Create/Property Set/Multiple Groups (prefix: prop.)
Creación de grupos por materiales	Group/Create/Material/Multiple Groups (prefix: matl.)
Visualización del contenido de un grupo en particular	Group/Post
Modificación del contenido de los grupos	Group/Modify
Transformación (traslación, rotación, etc...) de las entidades pertenecientes a un grupo	Group/Transform
Eliminación de un grupo	Group/Delete
Cálculo de la masa total del modelo	Tools/Mass Properties>Show/3D Define region: All/FEM
Cálculo de la masa de los elementos de una pieza	Tools/Mass Properties>Show/3D Define region: Group/FEM
Mostrar o desaparecer elementos en el viewport (sólo afecta a la visualización)	Display / Plot/Erase
Aumentar el tamaño de los puntos geométricos (para visualizarlos mejor)	Home / Misc. / Point Size
Aumentar el tamaño de los nodos (para visualizarlos mejor)	Home / Misc. / Node Size

Tabla 5-7: Operaciones auxiliares

## 5.3 Consejos para la creación del modelo FEM

### 5.3.1 Utilización de grupos

En los siguientes apartados se va a realizar un proceso de creación del modelo de la estructura del satélite UPMSat-2, pieza a pieza. Es decir, se va a crear la geometría, las propiedades y el mallado de cada pieza de forma individual. Para realizar convenientemente este método, es aconsejable utilizar el potencial que ofrece la utilización de “grupos”. Los grupos tienen la versatilidad de incorporar cualquier tipo de entidad (puntos, superficies, nodos, elementos, etc...), de forma que una vez creado un grupo, se puede visualizar únicamente el contenido de ese grupo en particular y evitar que el resto de entidades del modelo, que no pertenecen a este grupo, estorben visualmente al usuario cuando esté creando la geometría o la malla de una pieza determinada.

Por lo tanto, se recomienda que antes de comenzar con la geometría de una pieza, se debe crear un grupo que vaya a incorporar únicamente las entidades de esa pieza y no las pertenecientes a otras piezas. De esta forma, cada pieza tendrá su grupo correspondiente y por tanto resulte fácil visualizar cada pieza (con toda su geometría, malla, nodos y elementos asociados) de forma individual para trabajar más cómodamente en la creación y modificación de entidades, y en la visualización de resultados.

Para crear un grupo, se debe ejecutar el siguiente comando en MSC Patran:

‘Group/Create>Select Entity’

El nombre que se le dé al grupo debe ser representativo de la pieza asociada (es decir, si se va a crear la bandeja A, el nombre del grupo puede ser “Bandeja A” o “Tray A”).

Se debe asegurar posteriormente que este grupo creado sea el grupo principal (Current group). Esto se suele conseguir por defecto para el último grupo en ser creado, pero para asegurarse se debe ejecutar el siguiente comando:

#### **‘Group/Set Current...’**

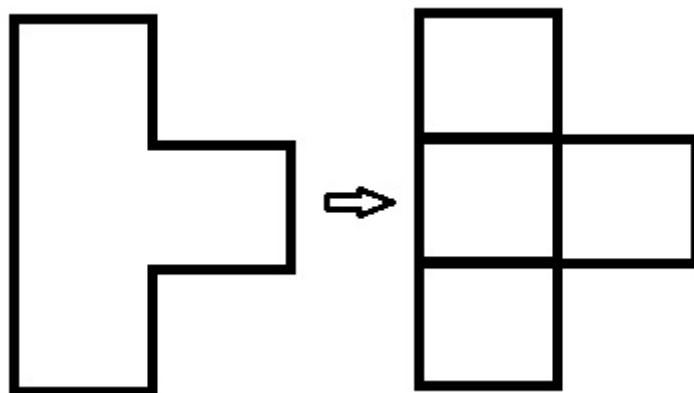
Una vez establecido el grupo como “Current Group”, esto implica que todas las entidades que se vayan a crear a partir de este momento se incluirán únicamente en este grupo. Por lo tanto, el usuario puede iniciar la creación de la geometría que define la pieza (puntos, curvas y superficies), seguido de la creación de propiedades y creación del mallado sobre esta geometría (cuando se haya realizado todas las operaciones de verificación de geometría). Así que finalmente, todos los elementos y nodos que definen el modelo FEM de esta pieza quedarán incluidos automáticamente en el grupo correspondiente. Cuando se haya finalizado con las comprobaciones para esta pieza, se puede pasar a la siguiente pieza repitiendo el proceso de creación de grupo para la nueva pieza.

### **5.3.2 Creación y modificación de geometría**

Para mejorar la eficiencia en la creación de un modelo FEM de cualquier estructura, se recomienda generar un modelo geométrico que esté compuesto de superficies y líneas simples. Esto provoca que se invierta más tiempo en las operaciones de creación y modificación de geometría que en el resto de operaciones, debido a que el proceso de simplificación de geometría implica muchas operaciones como dividir una superficie compleja en muchas superficies simples, crear más líneas y puntos de referencia, etc... Pero esta inversión de tiempo en la parte geométrica se ve compensada enormemente con una mayor automatización del mallado posterior y un menor número de problemas (ya que las superficies simples se mallan mejor y los elementos generados presentan menos errores que con las superficies complejas).

Por eso, se debe planificar el modelo geométrico para que cada pieza sea una composición de superficies triangulares o cuadriláteras, buscando siempre que los ángulos sean los más rectos posibles (cercanos a 90°), ya que los elementos 2D con ángulos muy agudos no cumplen con los requisitos de forma (ver las operaciones de verificación de los elementos QUAD y TRIA). Es habitual dividir las curvas en segmentos más pequeños (delimitados por puntos intermedios) y las superficies complejas en superficies más simples (delimitadas por líneas que cortan la superficie compleja) mediante los siguientes comandos:

**‘Geometry/Edit/Curve/Break/Point’**  
**‘Geometry/Edit/Surface/Break/Curve’**



**Figura 5-1: Esquema de la transformación de una superficie compleja (8 lados) a 5 superficies simples rectangulares**

Pero previamente se debe crear los puntos o líneas que sirven para delimitar estas entidades. Realizar esto implica un gran consumo de tiempo que se ve recompensado en el proceso de mallado, ya que las superficies simples (3 o 4 lados) se pueden mallar isométricamente obteniendo una malla más ordenada y con menor posibilidad de errores.

En el modelo del UPMSat-2 se recomienda seguir este esquema especialmente en las bandejas, ya que la superficie inicial que representa la lámina horizontal debe quedar dividida en rectángulos más pequeños delimitados por las líneas que representan los bordes de los rigidizadores. También se recomienda realizar este proceso en otras superficies del modelo.

### 5.3.3 Asignación de propiedades a los elementos

En la mayoría de los casos, primero se crea las propiedades incluyendo en cada una el material aplicado, el espesor (2D) o el tipo de sección (1D). Este paso se suele realizar antes de la creación de los elementos (proceso de mallado), por lo que a partir de este paso se puede dar una de las siguientes opciones:

- Creación del mallado sobre una entidad geométrica (curva, superficie o sólido): En este caso, en el mismo menú de la creación del mallado, se debe indicar la propiedad que deben tener los nuevos elementos que se generen.
- Duplicación de elementos mediante operaciones de transformación (traslación, giro, simetría, etc...): en este caso, cuando se hace una de estas operaciones, se tiene que elegir entre estas dos opciones: que los nuevos elementos tengan la misma propiedad que los elementos originales, o que los elementos nuevos se generen sin propiedad asignada. Por lo tanto, en la mayoría de los casos que se va a exponer en este documento, se debe elegir la segunda opción (los nuevos elementos no deben tener la misma propiedad que los originales). Posteriormente se debe modificar la propiedad que deben tener los nuevos elementos y seleccionarlos en “Select Application Region...” dentro del siguiente menú:  
‘Properties/Modify...’

### 5.3.4 Numeración de elementos y nodos

En la mayoría de los modelos se especifica un rango de numeración determinado para identificar a los nodos y a los elementos. Para este modelo, se recomienda elegir un rango de numeración lo suficientemente amplio para cada pieza. De esta forma, los elementos y nodos pertenecientes a una pieza deben tener números de identificación fácilmente distinguibles con respecto al resto del modelo.

Como se sabe, a la hora de generar elementos hay dos métodos: mallado de geometría y duplicación de elementos por transformación. En ambas operaciones se debe indicar el número inicial del rango de numeración para nodos y elementos. Por lo que se recomienda que el usuario, cuando empiece a generar elementos para cada pieza, modifique los valores por defecto para que sean los valores iniciales del rango elegido a esa pieza. Es decir, si el usuario decide que el rango de numeración de elementos de la bandeja A sea desde 1000 a 5000, se debe indicar el valor “1000” en la casilla correspondiente.

De todas formas, es recomendable que una vez terminados todos los elementos de una determinada pieza o zona, y cuando se haya realizado todas las operaciones de verificación correspondientes, se renumere tanto los nodos como los elementos mediante el siguiente comando, donde se puede volver a introducir el valor inicial del rango:

#### **‘Meshing/Renumber’**

En cuanto al valor final del rango depende del número de nodos y elementos de cada pieza, así que el usuario debe elegir el rango de la siguiente pieza para que no interfiera con la anterior, dejando un margen de numeración lo suficientemente amplio.

### **5.3.5 Operaciones de verificación geométrica y verificación del mallado**

En todos los modelos de elementos finitos se debe realizar las operaciones de verificación de geometría (ver Tabla 5-2) antes de comenzar el mallado, y posteriormente se debe realizar las operaciones de verificación del mallado (ver Tabla 5-5) cuando finalice éste.

Ambas secuencias de operaciones se pueden aplicar a todo el modelo a la vez o pieza a pieza. Debido a que el planteamiento de creación del modelo FEM del UPMSat-2 explicado en este documento sigue un desarrollo pieza a pieza, es decir, se crea la geometría y el mallado de una pieza, después la geometría y mallado de la siguiente, etc..., se recomienda aplicar las secuencias de operaciones de verificación de la geometría y mallado a cada pieza individualizada. Sólo se permite continuar la creación de la siguiente pieza cuando la anterior haya sido convenientemente chequeada.

Un detalle importante a tener en cuenta es la operación de equivalencia de nodos. Por defecto está configurado para que afecte a todo el modelo FEM, pero esto es peligroso porque puede provocar uniones no deseadas de piezas próximas. Por lo tanto, se recomienda realizar la operación de equivalencia de nodos por grupos (como se ha explicado previamente, se recomienda crear un grupo por cada pieza del modelo) pudiendo elegir uno o más grupos a la vez. Esto se configura en el comando de equivalencia de nodos:

#### **‘Meshing/Equivalence/Group...’**

En este menú se debe seleccionar la casilla “Filter” para que aparezca la lista de grupos creados y seleccionar a aquellos que se quiera aplicar la operación de equivalencia.

Por lo tanto, se recomienda realizar siempre esta operación, ya que es bastante habitual, tras realizar mallados en superficies adyacentes, encontrarse con discontinuidades o brechas entre estas superficies debido a parejas de nodos coincidentes en los bordes que las separan.

Como se ha explicado previamente, se debe tener la precaución de no generar uniones no deseadas entre distintas piezas. En cambio, si hay piezas distintas que sí deben quedar unidas de forma continua (sin necesidad de elementos rígidos), entonces se debe incluir todo este conjunto de piezas (seleccionando los grupos correspondientes) en la misma operación de equivalencia.

En el modelo del UPMSat-2 se recomienda incluir en la misma operación de equivalencia a las cuatro bandejas, las cuatro barras verticales y los cuatro paneles de cierre (ver sección 5.14). Pero es importante no juntar en la misma operación de equivalencia a los paneles de cortadura A-B con las bandejas A y B (las uniones entre estas estructuras se realizar con elementos rígidos RBE2). Lo mismo puede aplicarse a los paneles de cortadura B-C con sus respectivas bandejas, o al sistema de adaptación con la bandeja A. Todas las uniones de estas piezas se definirán mediante elementos rígidos RBE2 (ver sección 5.14).

### 5.3.6 Creación separada de modelos

El modelo UPMSat-2 está compuesto de distintas piezas. En este caso, casi todas tienen una geometría sencilla que se creará directamente desde el Patran (salvo el sistema de adaptación complejo). Por lo tanto, todas estas piezas estarán en el mismo archivo .db (archivo de base de datos que almacena la información del modelo FEM del programa MSC Patran). Pero en el apartado 5.13.1 se explica que para modelizar el sistema de adaptación real (opción compleja) del UPMSat-2, al ser un sistema estructural complejo, se recomienda importar el modelo CAD al programa MSC Patran, y así disponer de la geometría. Esta geometría conviene modificarla para pasar de geometría 3D inicial a geometría 2D y 1D (más fácil de mallar y con menor número de nodos).

Todo este proceso puede hacerse en el mismo archivo .db del Patran donde se está creando el FEM del resto del UPMSat-2. Pero el inconveniente es que al importar desde Catia, la posición y orientación de la geometría del sistema de separación no se corresponda con la que debería tener para incluirla con el resto del modelo del UPMSat-2. Esto implicaría realizar operaciones de transformación (traslación y giro) que, si no se tiene cuidado, puede afectar al resto del modelo de forma indeseada. Una opción interesante es importar la geometría del sistema de separación en un archivo .db aparte, modificar esta geometría y mallarla de forma independiente al resto del UPMSat-2. Una vez finalizado la creación y verificación del modelo FEM del sistema de separación, se debe incluirlo con el resto del modelo del UPMSat-2 mediante una de estas opciones:

- Importación del archivo .db del sistema de separación.  
Una vez finalizado el modelo del sistema de separación, se puede importar directamente el contenido desde archivo de Patran (.db) del sistema de separación al archivo de Patran del resto del UPMSat-2. Se realiza a través del siguiente comando:

#### ‘File/Import.../Model/MSC.Patran DB’

Esta es la opción preferida, ya que permite importar tanto la geometría, como el modelo FEM (nodos, elementos, propiedades, materiales). El usuario puede configurar qué tipo de entidades quiere importar en el menú “MSC.Patran DB Options...”, en el caso de que no quiera importar todo.

- Generación e importación del archivo neutro.  
Se puede generar un archivo neutro desde el Patran del sistema de separación mediante el siguiente comando:

#### ‘File/Export...’ Format: Neutral

Este archivo neutro contiene la información referente al modelo FEM del sistema de separación (nodos, elementos, MPCs, propiedades y materiales) y puede ser importado desde otro archivo .db (en este caso el archivo que contiene el resto del modelo del UPMSat-2) para incorporarlo al resto de la estructura.

- Generación e importación del archivo .bdf

El archivo .bdf es el fichero que contiene la información del modelo FEM y que sirve como input al programa MSC Nastran para poder analizarlo. Este archivo se genera mediante el comando de configuración de análisis:

**‘Analysis/Analyze/Entire Model/Analysis Deck’**

Y después importar esta información al modelo de Patran del UPMSat-2 mediante el siguiente comando:

**‘File/Import.../Model/MSC.Nastran Input’**

## 5.4 Creación de los materiales

El primer paso es la creación de los materiales. Para crear los materiales del modelo, se debe ir al menú de “Properties”. Para los usuarios principiantes, hay que advertir que este menú contiene a su vez tres submenús, uno para la creación de materiales, otro para la creación de propiedades y el tercero que es para la creación de campos (información tabulada). Por lo tanto, se debe seleccionar el ícono “Isotropic” que aparece en el menú superior para que aparezca el submenú de materiales y poder realizar las operaciones de creación, modificación y borrado de materiales.

El comando para crear materiales es el siguiente:

**‘Properties / Materials / Create / Isotropic / Manual Input’**

Se debe crear los siguientes materiales:

Propiedades		EN AW 7075-T6	Steel 4762
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$	2800	7470
Módulo elástico (Pa)	E	$7.1 \times 10^{10}$	$2.0 \times 10^{11}$
Coeficiente de Poisson	$\nu$	0.33	0.3
Límite elástico (Pa)	$\sigma_Y$	$4.34 \times 10^8$	$5.20 \times 10^8$
Resistencia última (Pa)	$\sigma_U$	$5.10 \times 10^8$	
Coeficiente de expansión térmica ( $\text{K}^{-1}$ )	$\alpha$	$2.2 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$
Temperatura de referencia	$^{\circ}\text{C}$	20	20

Tabla 5-8: Propiedades de los materiales

Los parámetros de resistencia última y límite elástico no se introducen en el programa, pero deben tenerse en cuenta en la evaluación de resultados para determinar si las máximas tensiones producidas superan o no estos límites.

Toda la estructura estará hecha de la aleación de aluminio, mientras que el acero sólo está presente en determinados tornillos del sistema de separación.

## 5.5 Creación de la bandeja A

Para definir la bandeja A, se deben crear superficies que modelan la placa y los rigidizadores. Se deben definir los rigidizadores siguiendo el esquema de medidas presentado en la Figura 5-2. La placa horizontal de la bandeja debe quedar dividida por un conjunto de superficies más pequeñas, delimitadas por las líneas de unión de los rigidizadores interiores con esta placa. De esta forma, se asegura que la estructura no presente gaps o discontinuidades entre la placa y los rigidizadores. Por lo tanto, la geometría de la placa está compuesta por superficies triangulares y cuadriláteras. Es recomendable en esta bandeja mallar con elementos TRIA las superficies triangulares, ya que los posibles elementos QUAD que puedan surgir en estas superficies si se

intentase mallar con estos elementos, no cumplirían con los requisitos de forma. Para las superficies cuadriláteras, se recomienda crear elementos QUAD4, que son más fiables.

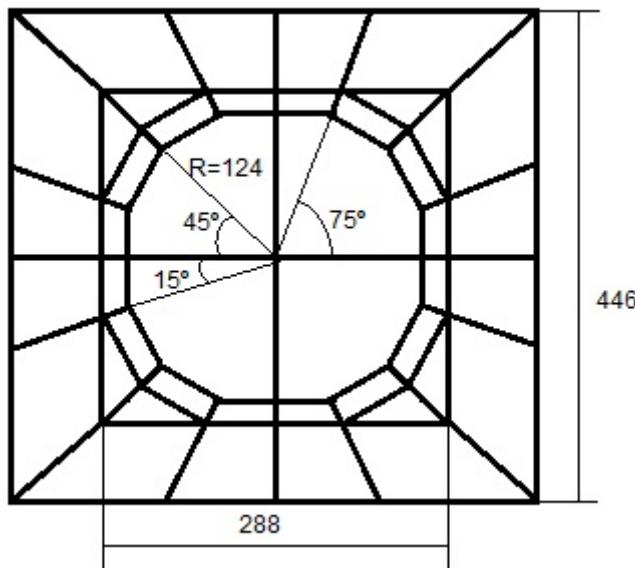


Figura 5-2: Medidas de la bandeja A

Cada rigidizador debe tener el espesor correspondiente (ver Figura 4-3 y Figura 5-4), por lo que se deberá crear tantas propiedades 2D como se consideren necesarias. Se recomienda definir una nomenclatura estándar para las propiedades de todo el modelo. En este caso, la nomenclatura empieza con la designación 2D o 1D dependiendo del tipo de propiedad, seguido del material asignado, pieza, parte y finalmente, el valor del espesor (2D) o tipo de sección (1D). Las propiedades necesarias para la bandeja A son las siguientes:

Nombre	Parte estructural	Material	Espesor (m)
2D_Al7075_TrayA_Plate_1mm	Placa horizontal	EN AW 7075-T6	0.001
2D_Al7075_TrayA_Rib_10mm	Rigidizadores interiores de 10 mm	EN AW 7075-T6	0.010
2D_Al7075_TrayA_Rib_5mm	Rigidizadores interiores de 5 mm	EN AW 7075-T6	0.005
2D_Al7075_TrayA_Rib_9.5mm	Rigidizadores exteriores de 9.5 mm	EN AW 7075-T6	0.0095

Tabla 5-9: Propiedades de la bandeja A

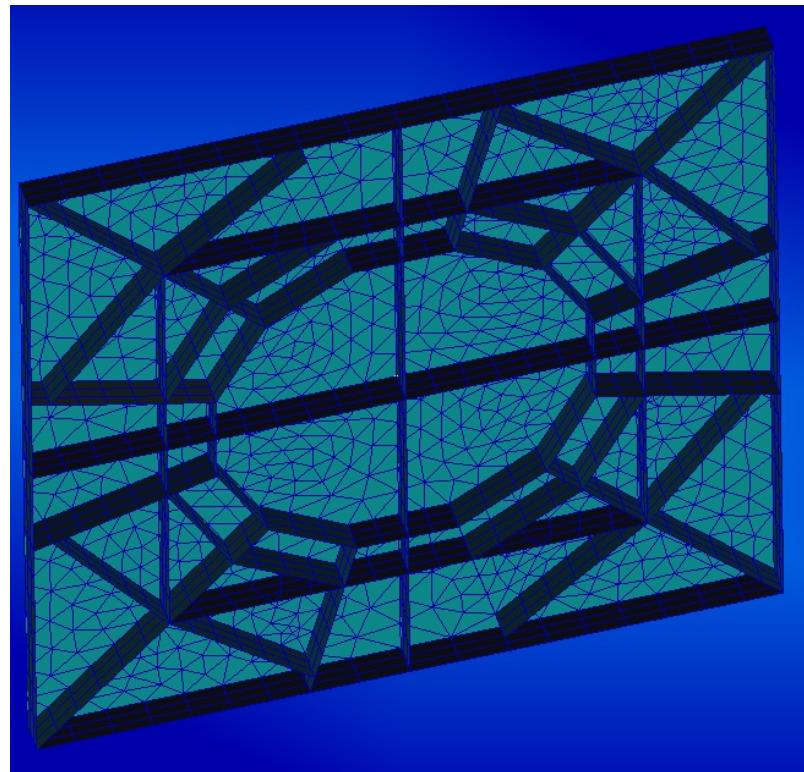


Figura 5-3: Modelo en Patran de la bandeja A

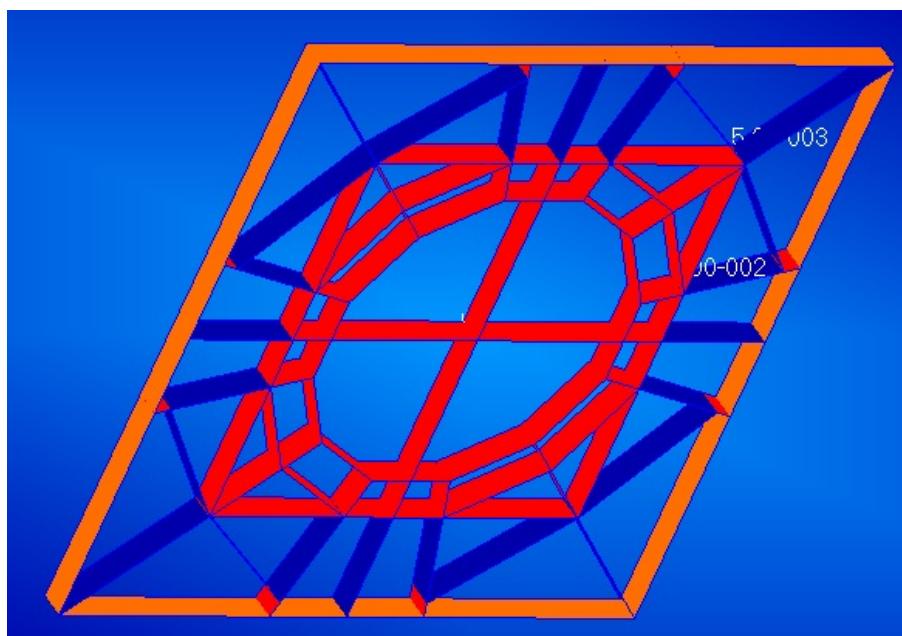
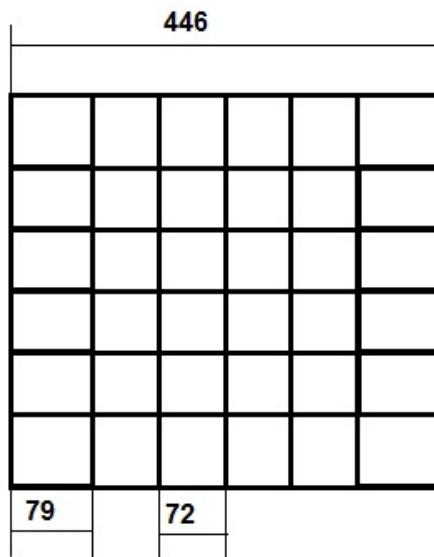


Figura 5-4: Visualización de espesores en Patran

## 5.6 Creación de la bandeja B

Para definir la bandeja B se debe crear superficies cuadradas y rectangulares para definir tanto la placa horizontal como los rigidizadores. Las medidas de esta bandeja (que son iguales a las de las bandejas C y D) se muestran en la Figura 5-5. Al igual que en la bandeja A, la placa de esta bandeja debe dividirse en superficies cuadradas y rectangulares separadas por las líneas donde se unen los rigidizadores a esta placa. De esta forma, se garantiza la correcta unión de los rigidizadores con la placa cuando se malle todo el conjunto y se realice la correspondiente equivalencia de nodos.

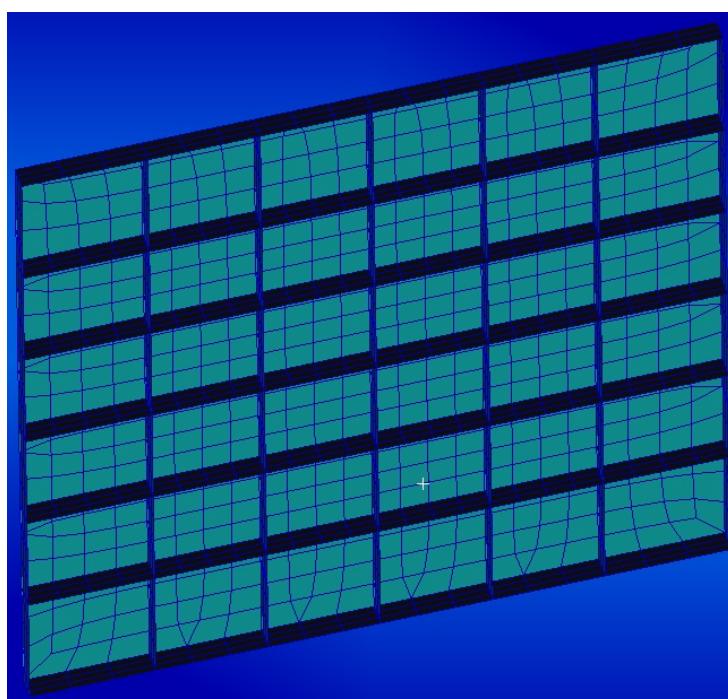


**Figura 5-5: Esquema de los rigidizadores de la bandeja B**

Las propiedades necesarias para la bandeja B son las siguientes:

Nombre	Parte estructural	Material	Espesor (m)
2D_Al7075_TrayB_Plate_2mm	Placa horizontal	EN AW 7075-T6	0.002
2D_Al7075_TrayB_Rib_5mm	Rigidizadores interiores de 5 mm	EN AW 7075-T6	0.005
2D_Al7075_TrayB_Rib_9.5mm	Rigidizadores exteriores de 9.5 mm	EN AW 7075-T6	0.0095

**Tabla 5-10: Propiedades de la bandeja B**



**Figura 5-6: Modelo en Patran de la bandeja B**

## 5.7 Creación de las bandejas C y D

Para crear estas bandejas, al ser iguales que la bandeja B pero situadas en distintas posiciones, se va a proceder a realizar una operación de transformación de grupos, es decir, se va a duplicar la geometría y los elementos que conforman la bandeja B para crear estas mismas entidades, pero pertenecientes a las bandejas C y D. Las transformaciones consisten en dos traslaciones verticales, una traslación a 170 mm (para crear la bandeja C desde la B) y la segunda a 170+265 mm (para crear la bandeja D a partir de la B). Estas operaciones se realizan con el siguiente comando:

### ‘Group/Transform.../Translate’

Se selecciona el grupo asociado a la bandeja B y se destaca la casilla “Copy”. Se recomienda dar un nuevo nombre al nuevo grupo, teniendo en cuenta que va a ser primero la bandeja C y después la bandeja D.

El siguiente paso es modificar la bandeja D para representar el agujero rectangular donde se va a alojar uno de los experimentos. Para ello, sencillamente se establece como “Current group” al grupo asociado a la bandeja D y se eliminan los elementos de la placa y del segmento de rigidizador correspondiente.

Las propiedades necesarias para las bandejas C y D son las siguientes:

Nombre	Parte estructural	Material	Espesor (m)
2D_Al7075_TrayC_Plate_2mm	Placa horizontal	EN AW 7075-T6	0.002
2D_Al7075_TrayC_Rib_5mm	Rigidizadores interiores de 5 mm	EN AW 7075-T6	0.005
2D_Al7075_TrayC_Rib_9.5mm	Rigidizadores exteriores de 9.5 mm	EN AW 7075-T6	0.0095

Tabla 5-11: Propiedades de la bandeja C

Nombre	Parte estructural	Material	Espesor (m)
2D_Al7075_TrayD_Plate_2mm	Placa horizontal	EN AW 7075-T6	0.002
2D_Al7075_TrayD_Rib_5mm	Rigidizadores interiores de 5 mm	EN AW 7075-T6	0.005
2D_Al7075_TrayD_Rib_9.5mm	Rigidizadores exteriores de 9.5 mm	EN AW 7075-T6	0.0095

Tabla 5-12: Propiedades de la bandeja D

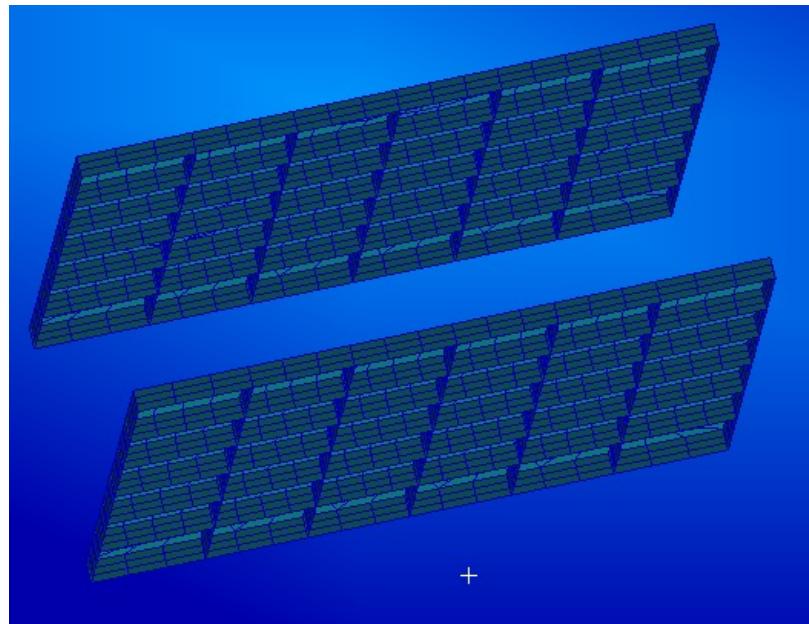


Figura 5-7: Modelo en Patran de la bandejas B y C

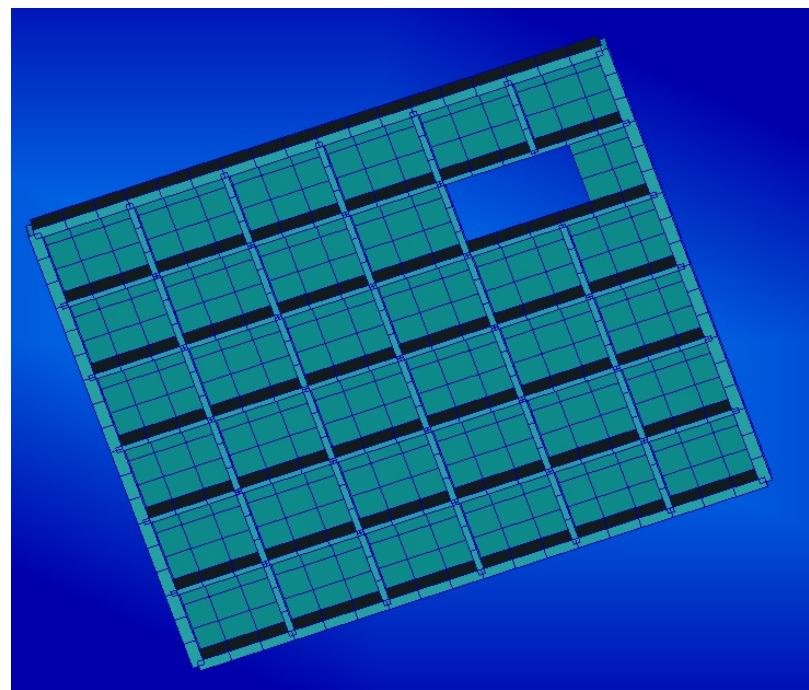


Figura 5-8: Modelo en Patran de la bandeja D

## 5.8 Creación de las barras verticales de sección L

Para crear las barras verticales, se deben crear cuatro propiedades tipo BEAM (1D), todas ellas con la sección en L con las dimensiones correspondientes (ver Figura 4-8), pero definiendo en cada propiedad su correspondiente vector de orientación para colocar adecuadamente cada barra vertical, según se muestra en la Figura 5-10.

Estas barras deben pasar por las esquinas correspondientes de las bandejas del satélite. Las propiedades de las barras verticales son las siguientes:

Nombre	Parte estructural	Material	Sección	Orientación
1D_Al7075_Lbar_Xn_Yn	Barra situada en la esquina X- Y-	EN AW 7075-T6	L_30_5.2mm	<1 0 0>
1D_Al7075_Lbar_Xn_Yp	Barra situada en la esquina X- Y+	EN AW 7075-T6	L_30_5.2mm	<0 -1 0>
1D_Al7075_Lbar_Xp_Yn	Barra situada en la esquina X+ Y-	EN AW 7075-T6	L_30_5.2mm	<0 1 0>
1D_Al7075_Lbar_Xp_Yp	Barra situada en la esquina X+ Y+	EN AW 7075-T6	L_30_5.2mm	<-1 0 0>

Tabla 5-13: Propiedades de las barras verticales L

Como se puede apreciar, todas las propiedades tienen la misma sección y el mismo material, pero se diferencian en el vector de orientación que determina el ángulo de cada barra sobre el eje vertical (en este caso z). Para asegurarse de que una propiedad 1D ha sido correctamente definida, después de la creación de los elementos se debe visualizar estos en 3D (ver Figura 5-10) mediante el comando:

‘Display / Load/BC/Elem. Props....’ Beam Display: 3D:FullSpan+Offsets

Cuando se mallen las líneas verticales que representan estas piezas, se debe tener especial precaución de que aparezcan nodos que pasen por las correspondientes esquinas de cada bandeja, y realizar la equivalencia de nodos para asegurar la continuidad de esta estructura. Para ello conviene dividir cada curva en segmentos delimitados por las esquinas de las bandejas.

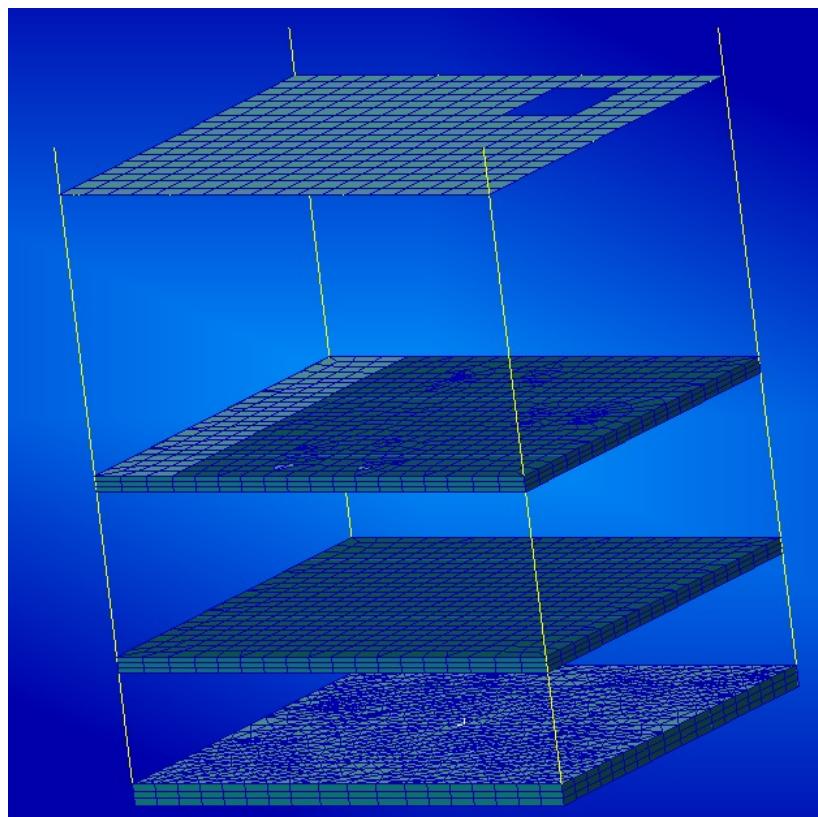


Figura 5-9: Modelo en Patran del esqueleto de la estructura con las barras verticales

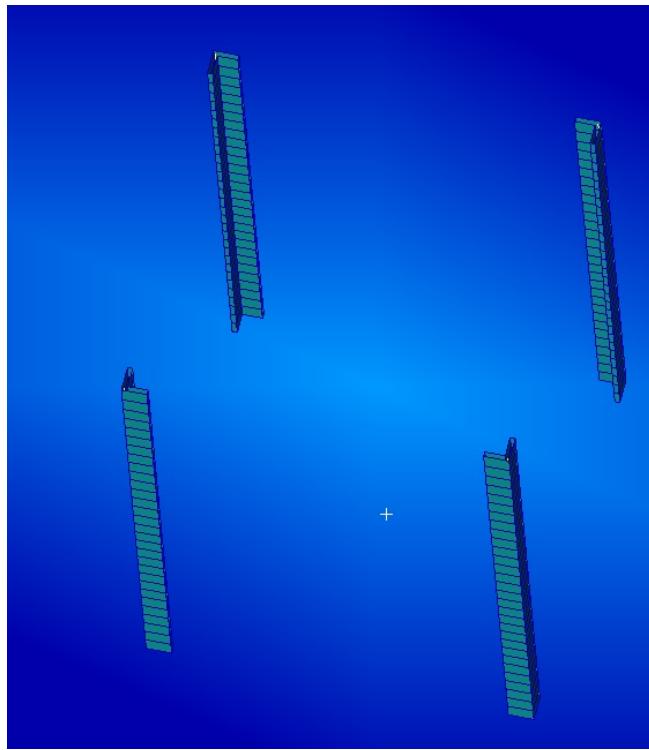


Figura 5-10: Visualización 3D de las barras verticales

## 5.9 Creación de los paneles de cortadura A-B

Para construir estos paneles, se crea el grupo correspondiente (al igual que con el resto de piezas) y se genera la geometría necesaria. Se recomienda incluir en este grupo los puntos o nodos pertenecientes a las bandejas A y B que el usuario considere necesario para utilizarlos como puntos de referencia. Por otra parte, como la geometría de los paneles de cortadura A-B (con sus dos pletinas) son iguales, se recomienda crear la geometría y la malla de uno de los paneles y trasladar y/o girar esta geometría con su malla asociada para crear el resto de paneles.

Es importante destacar que se deben representar los agujeros de las pletinas, para crear posteriormente los elementos RBE2 que unen los nodos que rodean estos agujeros con los nodos pertenecientes a las bandejas A o B según corresponda. Cada uno de estos agujeros está situado en el cruce de los rigidizadores interiores correspondientes.

Las propiedades de los paneles de cortadura A-B son las siguientes:

Nombre	Parte estructural	Material	Espesor (m)
2D_Al7075_Shear_AB_Plate_4mm	Panel vertical de cortadura de 4 mm	EN AW 7075-T6	0.004
2D_Al7075_Shear_AB_Top_4mm	Pletina superior de 4 mm del panel de cortadura A-B	EN AW 7075-T6	0.004
2D_Al7075_Shear_AB_Base_4mm	Pletina inferior de 4 mm del panel de cortadura A-B	EN AW 7075-T6	0.004

Tabla 5-14: Propiedades de los paneles de cortadura A-B

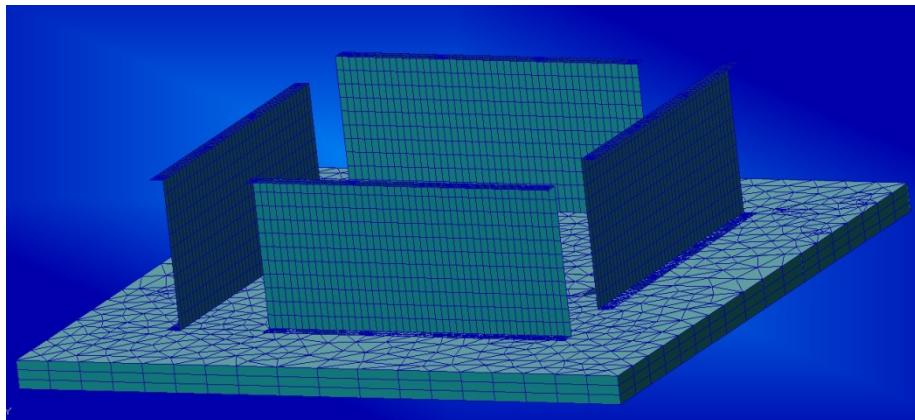


Figura 5-11: Modelo en Patran de los paneles de cortadura A-B sobre la bandeja A

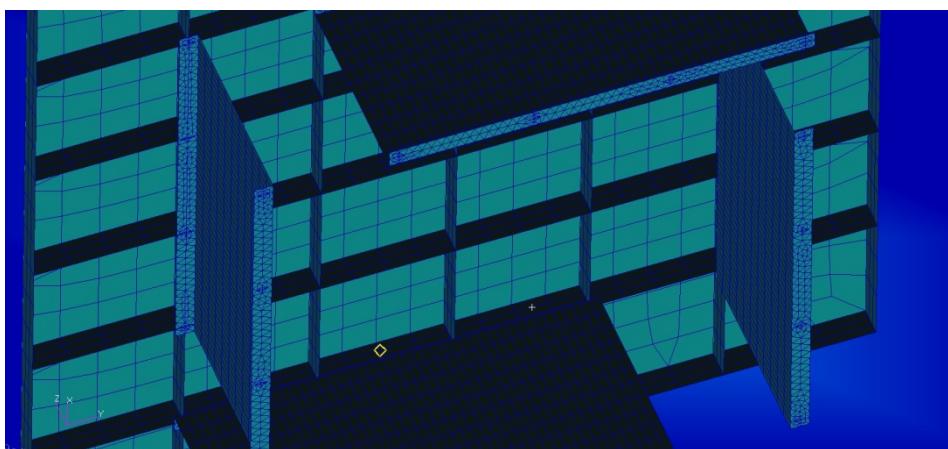


Figura 5-12: Modelo en Patran de los paneles de cortadura A-B debajo de la bandeja B

## 5.10 Creación de los paneles de cortadura B-C

La creación de los paneles de cortadura B-C sigue el mismo procedimiento que los anteriores paneles. Se debe tener cuidado en que las dimensiones no son exactamente las mismas con respecto a los anteriores paneles.

Las propiedades de los paneles de cortadura B-C son las siguientes:

Nombre	Parte estructural	Material	Espesor (m)
2D_Al7075_Shear_BC_Plate_2mm	Panel vertical de cortadura de 2 mm	EN AW 7075-T6	0.002
2D_Al7075_Shear_BC_Top_4mm	Pletina superior de 4 mm del panel de cortadura B-C	EN AW 7075-T6	0.004
2D_Al7075_Shear_BC_Base_4mm	Pletina inferior de 4 mm del panel de cortadura B-C	EN AW 7075-T6	0.004

Tabla 5-15: Propiedades de los paneles de cortadura B-C

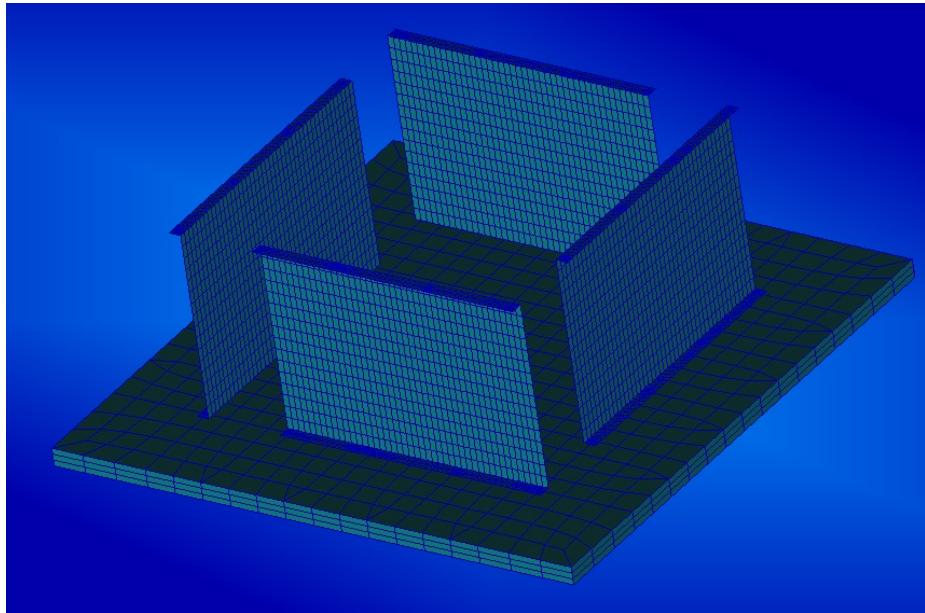


Figura 5-13: Modelo en Patran de los paneles de cortadura B-C sobre la bandeja B

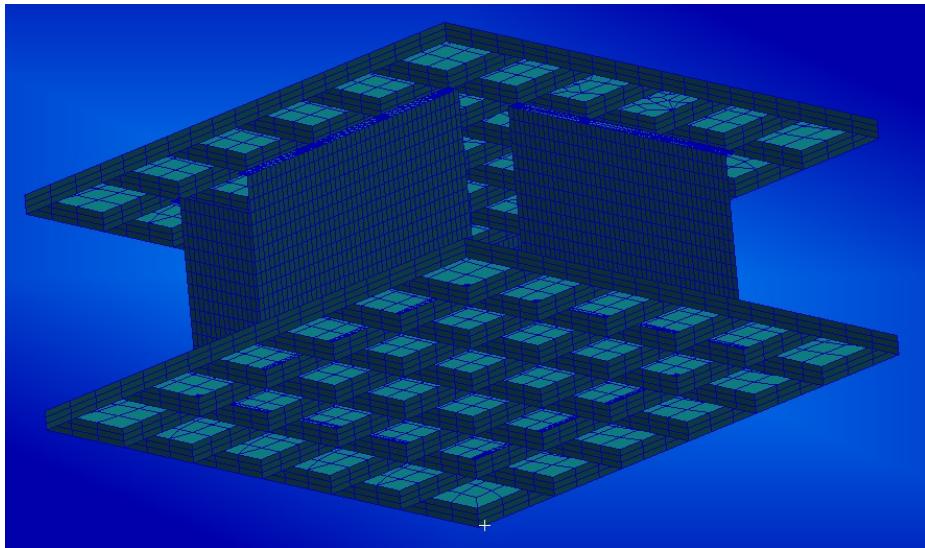
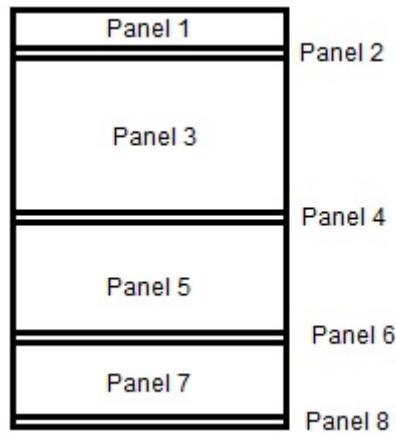


Figura 5-14: Modelo en Patran de los paneles de cortadura B-C entre las bandejas

## 5.11 Creación de los paneles de cierre

Los paneles de cierre constan de 4 láminas verticales. Cada panel debe estar unido a uno de los bordes de las cuatro bandejas y a dos barras verticales. Por lo tanto, para que haya continuidad en la estructura, se debe asegurar que los nodos pertenecientes a las barras verticales y a los bordes de las bandejas formen parte también del panel de cierre correspondiente. Así que se recomienda que al construir la geometría de cada panel de cierre, se divida la superficie inicial en varias superficies, cada una de las cuales está delimitada por las líneas que definen los bordes de las bandejas (ver sección 5.3.2).



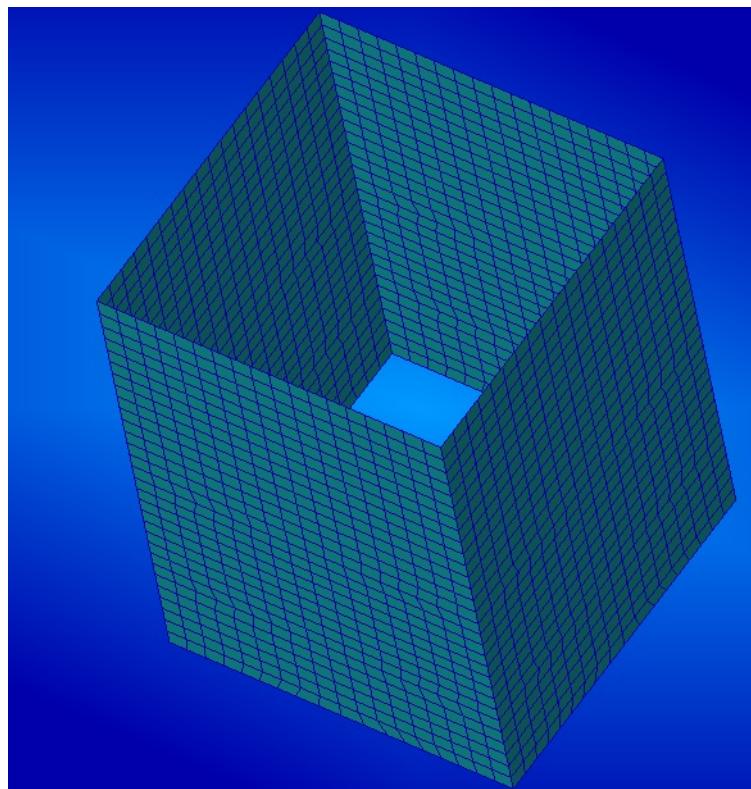
**Figura 5-15:** Esquema de la división de los paneles de cierre en varias superficies

Para estos paneles de cierre se recomienda crear la geometría y el mallado de uno de ellos, y después mediante operaciones de traslación y/o giro, replicar la misma geometría y mallado para definir el resto de paneles (similar al proceso de creación de paneles de cortadura).

La propiedad para los paneles de cierre son las siguientes:

Nombre	Parte estructural	Material	Espesor (m)
2D_Al7075_ClosePanel_1.5mm	Panel de cierre de 1.5 mm	EN AW 7075-T6	0.0015

**Tabla 5-16:** Propiedades de los paneles de cierre



**Figura 5-16:** Modelo en Patran de los paneles de cierre

## 5.12 Creación de los paneles de sustrato

Los paneles de sustrato son paneles con las mismas dimensiones que los paneles de cierre y separados de éstos una distancia de 6.5 mm hacia afuera. Por lo tanto, la mejor forma de crear estos paneles de sustrato es a través de la operación de transformación por traslación, generando cada panel de sustrato como una copia del panel de cierre correspondiente trasladada 6.5 mm hacia el exterior. Es recomendable realizar esta operación mediante grupos, pero desactivando la casilla “Transform Properties”, ya que los paneles de sustrato deben tener otras propiedades distintas que los paneles de cierre.

Por otro lado se debe crear el panel de sustrato sobre la bandeja D. Este elemento se puede crear desde cero o replicar la malla 2D de la mitad de la bandeja D mediante una traslación. Este panel de sustrato está separado 9.5 mm con respecto a la superficie de la bandeja D.

Posteriormente, se debe crear las propiedades correspondientes de los paneles de sustrato y seleccionar los elementos previamente creados en “Select Application Region...”. Si las propiedades han sido creadas antes que los elementos, se puede realizar la selección de elementos en el comando de modificación de propiedades.

Las propiedades para los paneles de sustrato son las siguientes:

Nombre	Parte estructural	Material	Espesor (m)
2D_Al7075_SustratPanel_2mm	Panel de sustrato de 2 mm	EN AW 7075-T6	0.002
2D_Al7075_SustratPanelZ_1.5mm	Panel de sustrato de 1.5 mm	EN AW 7075-T6	0.0015

Tabla 5-17: Propiedades de los paneles de sustrato

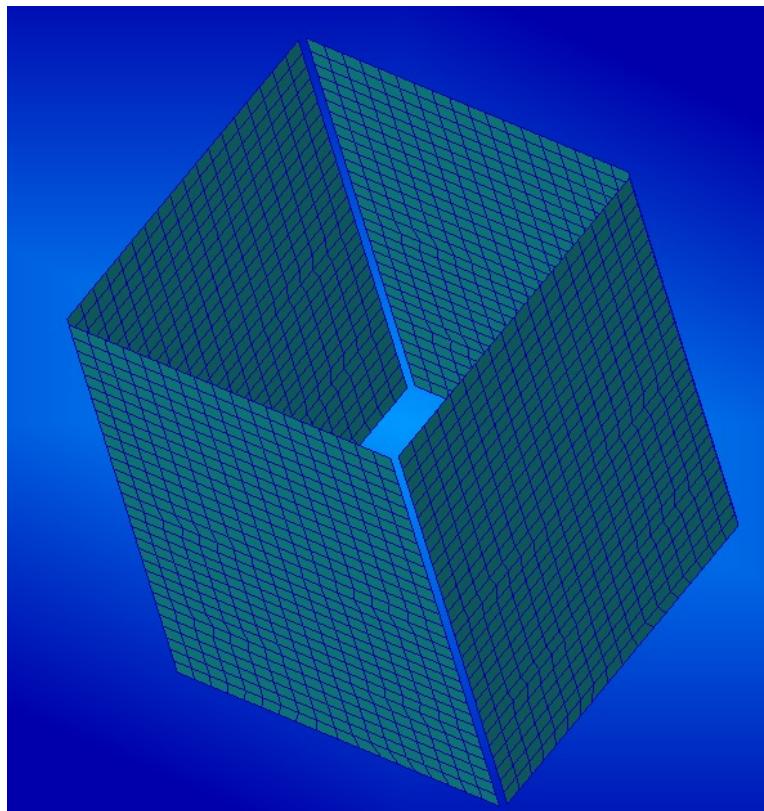


Figura 5-17: Modelo en Patran de los paneles de sustrato verticales

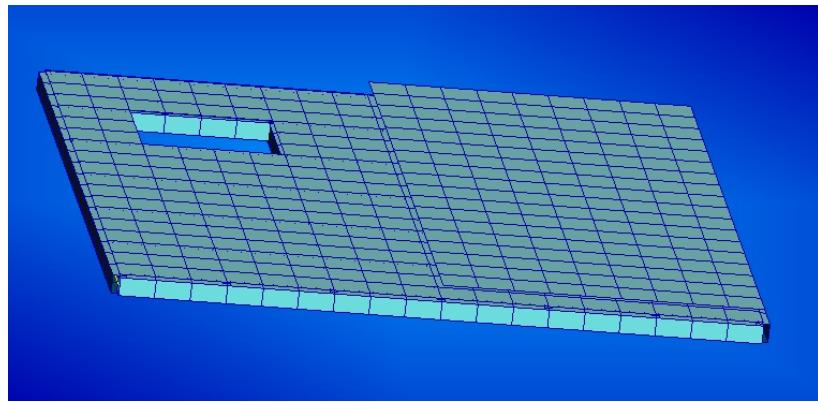


Figura 5-18: Modelo en Patran del panel de sustrato sobre la bandeja D

## 5.13 Creación del sistema de separación

El sistema de separación del UPMSat-2 es un sistema complejo cuya función es permitir la separación entre el satélite y la etapa final del lanzador en el momento adecuado. Para modelizar este conjunto existen dos formas:

### 5.13.1 Importación del modelo CATIA del sistema de separación

Consiste en disponer del modelo de este sistema en CATIA (versión .stp). Importar este modelo en el programa MSC Patran mediante el comando:

‘File/Import...’

‘Model/STEP’

‘STEP Options.../Model Units: 1.0 (Meters)

Activar la casilla “Import to Parasolid”

Tras esto se importa la geometría 3D de este conjunto en el programa MSC Patran. Hay que tener en cuenta que la geometría importada es la geometría preliminar y debe ser modificada para convertirla en una geometría compuesta por superficies y líneas y apta para ser mallada. De esta forma, el resultado final es obtener un modelo FEM de esta pieza compuesto por elementos 2D y 1D

El inconveniente de mallar directamente la geometría inicial, es que se obtiene elementos sólidos (3D) que, para que no presenten problemas de forma y tengan en cuenta todos los detalles, deben tener un tamaño medio muy pequeño. El resultado final sería una malla 3D muy fina y compuesta por muchos nodos, que presenta el inconveniente del enorme tiempo de ejecución necesario para realizar análisis dinámicos, así como un tamaño desorbitado para los ficheros de salida. Por eso se hace necesario el paso de trasformación de la geometría inicial (3D) en una geometría más simple (2D y 1D).

Para la transformación de esta geometría, se recomienda obtener superficies a través de las caras del sólido mediante el siguiente comando:

‘Geometry/Create/Surface/Extract/Face’

Una vez extraídas estas superficies, el siguiente paso es posicionarlas en las localizaciones adecuadas (operaciones de traslación) y modificarlas para crear superficies más simples que permitan ser malladas fácilmente. Las operaciones de modificación de superficies se encuentran en los siguientes comandos:

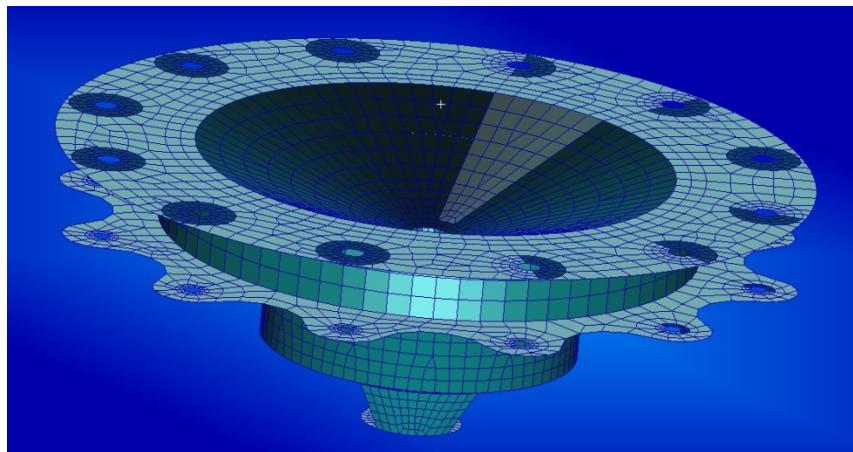
‘Geometry/Edit/Surface’

### ‘Utilities/Geometry/Trimmed Surface Edit...’

Finalmente, se debe unir todo el conjunto geométrico para dar continuidad a la estructura mediante los siguientes comandos:

‘Geometry/Edit/Surface/Sew’

‘Geometry/Edit/Surface/Edge Match’



**Figura 5-19: Modelo en Patrón del sistema de separación (con el método de importación del modelo CATIA)**

Para la creación de propiedades, esta pieza está fabricada en aluminio EN AW 7075-T6, y está constituida por láminas y elementos rigidizadores cuyos espesores y secciones deben ser determinados por el usuario a través del modelo CATIA. El tornillo maestro, así como el resto de tornillos que unen las distintas partes están hechos de acero 4762. Estos elementos, si se decide modelarlos, suelen ser representados como elementos 1D.

### 5.13.2 Creación del modelo FEM simplificado del sistema de separación

Este método consiste en sustituir el complejo sistema de separación por una representación más simple de éste. Esta representación simplificada consta de un cilindro hueco de 10 mm de espesor, de 149 mm de radio exterior y de 41 mm de altura. La parte superior del cilindro se sitúa inmediatamente debajo de los rigidizadores de la bandeja A, y dispone de una superficie anular de 8 mm de espesor, 149 mm de radio exterior y 110 mm de radio interior. Esta superficie debe incluir una distribución circunferencial de 12 agujeros de 3 mm de radio, cuyos centros se localizan a 124 mm del eje del cilindro (cada agujero está alineado con un cruce de rigidizadores de la bandeja A). La parte inferior del cilindro está constituida por una superficie anular de 8 mm de espesor, cuyo radio exterior coincide con la del cilindro y cuyo radio interior es 110 mm. Esta superficie debe incluir una distribución circunferencial de 12 agujeros de 3 mm de radio, cuyos centros se localizan a 117 mm del eje del cilindro. Estos 12 agujeros representan el lugar donde se alojan los 12 tornillos que definen la interfaz de la estructura del satélite con el adaptador del vehículo lanzador. Por lo tanto, en el centro geométrico de cada agujero se va a crear un nodo. En todos estos nodos se aplicarán las condiciones de contorno del conjunto del UPMSat-2 (ver sección 5.17).

Las propiedades para el modelo simplificado del sistema de separación son las siguientes:

Nombre	Parte estructural	Material	Espesor (m)
2D_Al7075_SSep_cil_10mm	Cuerpo cilíndrico del sistema de separación	EN AW 7075-T6	0.010
2D_Al7075_SSep_base_8mm	Base del sistema de separación	EN AW 7075-T6	0.008

2D_Al7075_SSep_top_8mm	Superficie superior del sistema de separación	EN AW 7075-T6	0.008
------------------------	---	---------------	-------

Tabla 5-18: Propiedades del modelo simplificado del sistema de separación

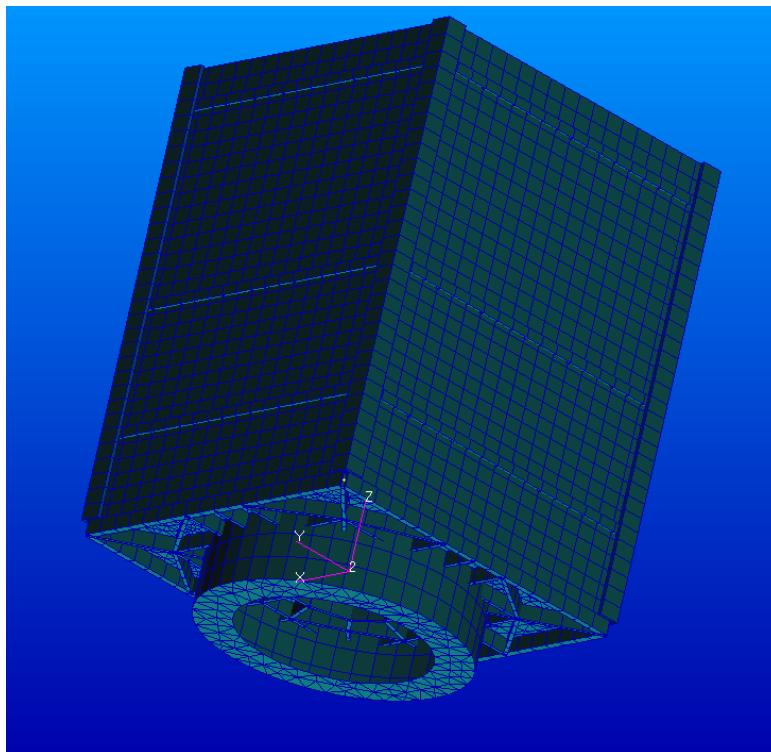


Figura 5-20: UPMSat-2 con el sistema de separación simplificado

## 5.14 Creación de las uniones entre piezas

Para unir las distintas piezas de un modelo, existen estas posibilidades:

- Continuidad de la estructura mediante equivalencia de nodos.

Consiste simplemente en que dos o más piezas en contacto compartan todos los nodos de la zona común. De esta forma, se asegura la correcta transmisión de esfuerzos y deformaciones entre estas piezas.

Generalmente, la zona común entre dos piezas suele ser curvas o puntos y, de forma más ocasional, pueden ser superficies.

Para el caso de curvas coincidentes (cada curva es el borde de una pieza distinta), se debe asegurar haber hecho la misma premalla sobre ambas curvas. De esta forma, al mallar cada pieza, se generan sobre estas curvas parejas de nodos coincidentes que son fácilmente combinados mediante la operación de equivalencia de nodos:

**‘Meshing/Equivalence/Group’** (se debe seleccionar únicamente los grupos correspondientes a las piezas que se van a unir).

Para el caso en que dos piezas comparten una zona superficial, el asunto es más complejo porque se debe garantizar que las mallas sean exactamente coincidentes en esas superficies. Si se cumple esto, se procede de igual manera mediante la equivalencia de nodos.

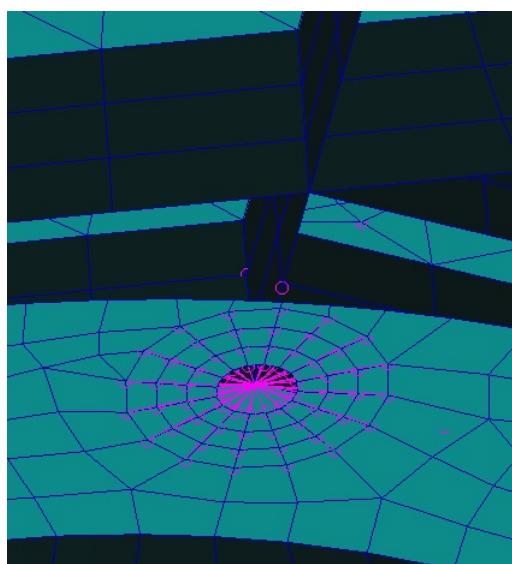
Este tipo de unión se modeliza para piezas que son unidas de forma continua (soldadura, pegamento, distribución numerosa de tornillos, etc...).

- Unión de piezas mediante elementos rígidos (generalmente RBE2).

En este caso, no debe existir nodos compartidos por ambas piezas (se debe evitar la equivalencia de nodos que incluyan ambas piezas a la vez). Ambas piezas son unidas a través de elementos rígidos, que son representaciones de ligaduras multipunto. Estos elementos rígidos unen nodos independientes con nodos dependientes.

El elemento rígido más utilizado es el RBE2, que une los DOFs seleccionados (no afecta necesariamente a los 6 DOFs de los nodos implicados, sino sólo a los DOFs que elija el usuario) de una lista de nodos dependientes con los mismos DOFs de un único nodo independiente (este elemento rígido sólo permite un único nodo independiente).

Generalmente, los elementos rígidos se usan cuando se quiere representar uniones puntuales (uniones atornilladas generalmente). Se debe incluir en cada pieza el alojamiento del tornillo o elemento de unión equivalente, mediante un agujero en la superficie. Posteriormente, se crea un nodo central en el eje de la unión (no debe formar parte de ningún mallado), y unir este nodo (que va a ser el independiente) con el conjunto de nodos que rodean los agujeros de cada pieza. Es decir, el conjunto de nodos dependientes debe estar formado por nodos de ambas piezas en las cercanías de la zona de unión.



**Figura 5-21: Modelización de la unión del sistema de separación con los rigidizadores de la bandeja A mediante RBE2**

Para crear RBE2 individuales, se realiza con el siguiente comando:

**‘Meshing/Create/MPC/RBE2’**

El problema con el anterior comando es que no permite crear más de un RBE2 a la vez. Hay métodos alternativos: el primero permite crear automáticamente el nodo central de cada RBE2 seleccionando sólo los nodos dependientes (pero no permite crear más de un RBE2 a la vez) y el segundo puede crear más de un RBE2 a la vez, pero previamente hay que crear manualmente todos los nodos centrales.

**‘Utilities / FEM-General / RBE2/RBE3 Spider...’**

**‘Utilities / FEM-General / RBE2 Coupling’**

- Unión de piezas mediante elementos elásticos 1D y RBE2.

Este método es una evolución del anterior, pero es más complejo porque se debe modelizar los tornillos mediante elementos tipo barra (CBEAM) o elementos elásticos tipo muelle (CELAS o CBUSH). Estos tornillos son unidimensionales y quedan situados en el eje de los agujeros correspondientes, así que no quedan directamente en contacto con las piezas que deben unir. Por tanto, se debe emplear dos elementos RBE2, uno que une un nodo del tornillo (independiente) con los nodos de una pieza, y el otro

RBE2 que une otro nodo del tornillo con los nodos de la otra pieza. Usualmente, los dos nodos elegidos del tornillo son los nodos independientes de cada RBE2 y se sitúan en ambos extremos del tornillo.

Este método se utiliza si se conoce el material y las dimensiones del tornillo que se quiera modelizar, y se quiera calcular los esfuerzos en el tornillo.

- Creación de cuerpos de contacto y configuración de las propiedades del contacto.

Esta opción se emplea por dos razones:

- Unir de forma permanente (Glued contact) dos superficies o caras de sólidos:  
Esta opción es similar a una equivalencia de nodos entre dos superficies coincidentes, sólo que con contacto pegado se puede unir dos superficies que no tengan mallas iguales y por tanto, es un método más polivalente.
- Modelizar el contacto simple (Touched contact): Esto sólo debe ser utilizado en ocasiones especiales donde dos piezas no unidas pero próximas entre sí pueden tocarse, separarse o deslizar entre ellas con fricción. El problema de esta modelización, es que emplea algoritmos no lineales y no es compatible con análisis dinámicos.

Para el modelo UPMSat-2, se recomienda emplear las siguientes uniones:

Piezas implicadas	Tipo de unión
Bandejas – Barras verticales – Paneles de cierre	Equivalencia de nodos
Paneles de cortadura - Bandejas	RBE2
Sistema de separación – Bandeja A	RBE2
Paneles de sustrato – Paneles de cierre	RBE2
Panel de sustrato horizontal – Bandeja D	RBE2
Masas puntuales – Resto de la estructura	RBE2
Piezas del sistema de separación complejo	RBE2

Tabla 5-19: Uniones del UPMSat-2

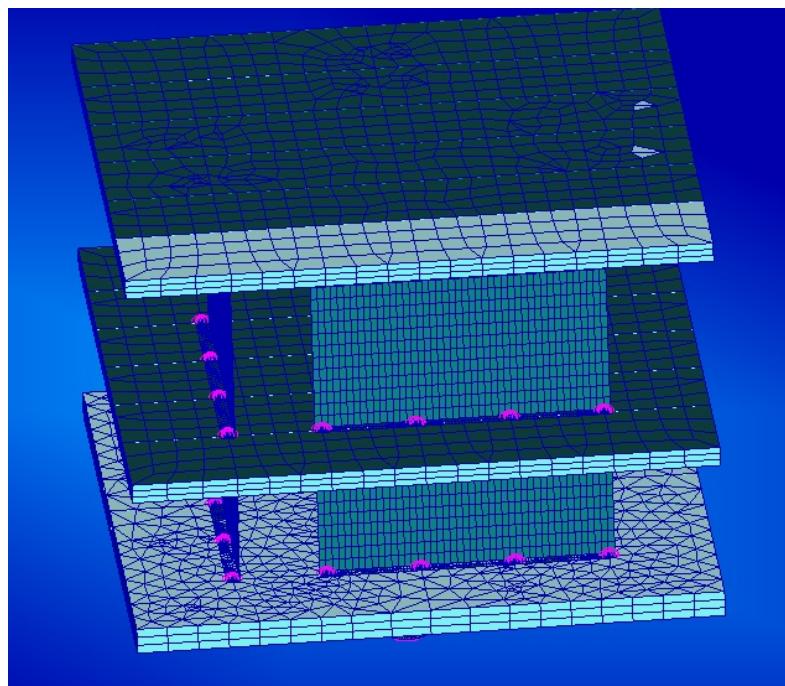


Figura 5-22: Modelización de las uniones de los paneles de cortadura a las bandejas

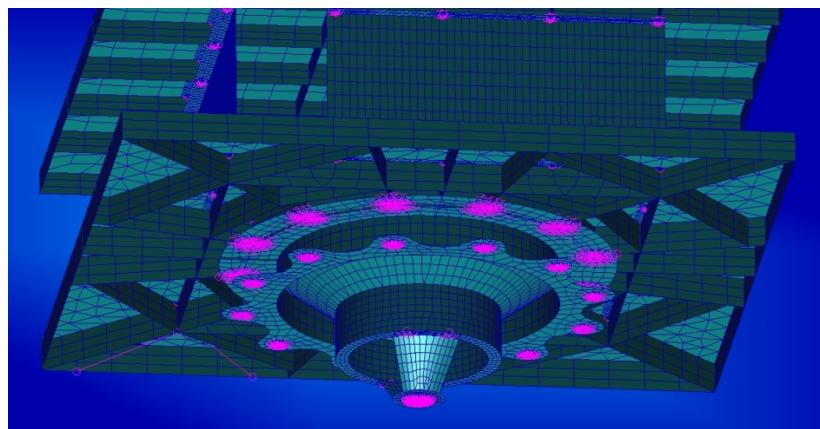


Figura 5-23: Modelización de las uniones del sistema de separación

## 5.15 Creación de las masas puntuales que representan los equipos no estructurales

Toda estructura se diseña para que sirva de soporte a un conjunto de equipos. En el caso de satélites, estos equipos constituyen subsistemas como la carga de pago, el AOCS, el subsistema de potencia, etc... Generalmente, se deciden modelizar estos equipos de forma sencilla mediante masas puntuales, unidas a la estructura con elementos rígidos. Esto es debido a que la modelización de estos equipos de forma más realista implica diseños complejos y excesivamente detallados, lo cual conlleva a que se puede exceder el número de nodos que permite el análisis. Por eso, si se quiere analizar en detalle estos equipos, se crean modelos FEM detallados de cada uno de ellos de forma independiente y separada del resto de la estructura.

En este caso, se debe conocer el presupuesto de masa (mass budget) del satélite para obtener los valores de las masas, centro de masas y momentos de inercia de estos equipos.

Equipo	Bandeja	Nº puntos de unión	Masa (kg)
Batería	Bandeja A	8	3.784
Magnetopar X	Bandeja A	4	0.411
Magnetopar Y	Bandeja A	4	0.411
Magnetopar Z	Bandeja B – Bandeja C	4	0.411
Ebox	Bandeja B	6	3.160
Magnetómetro 1	Bandeja C	4	0.110
Magnetómetro 2	Bandeja C	4	0.441
Rueda de reacción - motor	Bandeja C	4	0.387
Rueda de reacción - electrónica	Bandeja C	4	0.535
Experimento MTS	Bandeja D	4	0.513

Tabla 5-20: Lista de equipos del UPMSat-2

Equipo	Xcg* (m)	Ycg* (m)	Zcg* (m)	Ix (kg·m <sup>2</sup> )	Iy (kg·m <sup>2</sup> )	Iz (kg·m <sup>2</sup> )
Batería	0.000	0.000	0.045	0.01646	0.00853	0.023911
Magnetopar X	0.015	-0.174	0.005	0.000015	0.00322	0.00322
Magnetopar Y	-0.174	0.000	0.005	0.00322	0.000015	0.00322
Magnetopar Z	-0.158	-0.183	0.205	0.00322	0.00322	0.000015
Ebox	0.000	0.000	0.153	0.007595	0.009548	0.016237
Magnetómetro 1	-0.144	0.000	0.295	0.000077	0.000018	0.000093
Magnetómetro 2	0.144	0.000	0.299	0.000339	0.000256	0.000477

Rueda de reacción - motor	0.000	0.144	0.299	0.000231	0.000231	0.000357
Rueda de reacción - electrónica	0.000	-0.072	0.300	0.000385	0.000385	0.000621
Experimento MTS**	-0.141	0.108	0.560	0.00056	0.00111	0.001661

\*Con respecto al sistema de coordenadas localizado en el centro de la placa horizontal de la bandeja A  
\*\*Debe quedar en el agujero cuadrado de la bandeja D

Tabla 5-21: Propiedades básicas y localización del centro de gravedad de los equipos del UPMSat-2

Para crear masas puntuales, el proceso es el siguiente:

1. Crear puntos en las localizaciones de los centros de masas de cada equipo:

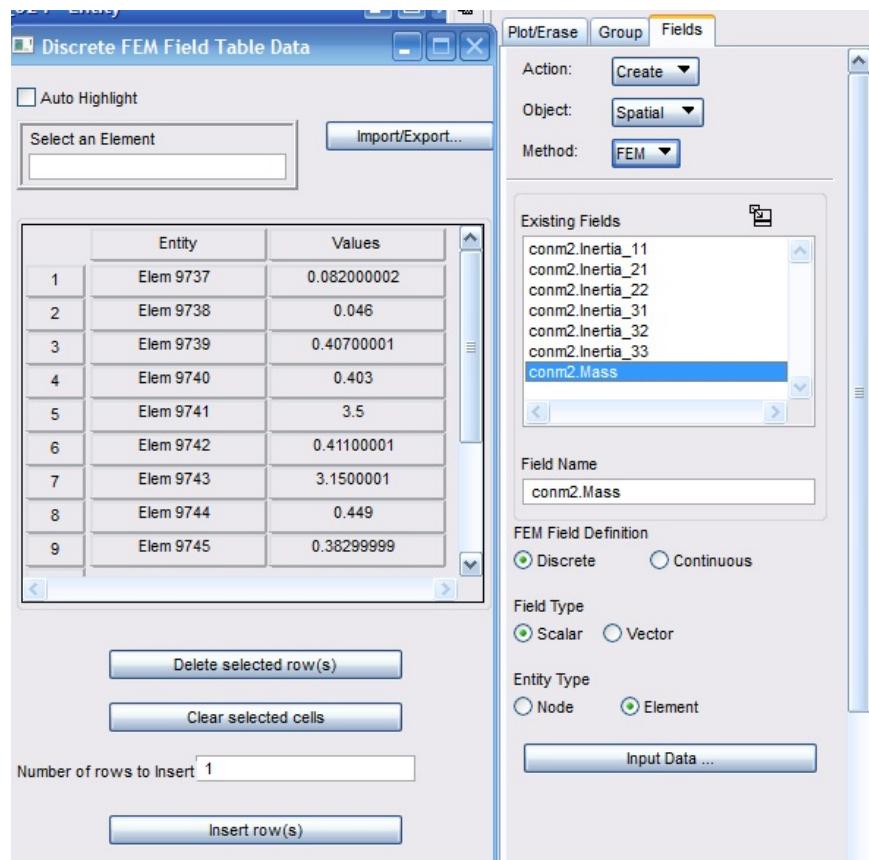
**‘Geometry/Create/Point/XYZ’**

Se debe tener especial precaución de que el sistema de coordenadas elegido para el modelo corresponda con el que se emplea en la Tabla 5-21; si no es así, se debe crear en primer lugar un sistema de coordenadas que coincida con el de referencia e introducir las coordenadas de cada punto según este nuevo sistema:

**‘Geometry/Create/Coord’**

2. Crear nodos individuales en cada punto (se recomienda que la numeración de estos nodos estén en un rango totalmente distingible del resto de nodos de la estructura):  
**‘Meshing/Create/Node/Edit’**
3. Crear elementos puntuales (0D) en cada nodo anteriormente creado (se recomienda que el ID de estos elementos coincida con el ID de los nodos correspondientes, si es posible):  
**‘Meshing/Create/Element/Edit/Point/Point’**
4. Crear al menos 4 tablas de información (fields), uno para las masas, y los otros tres para los momentos de inercia de cada equipo. Cada tabla tiene una columna con la lista de los elementos 0D previamente creados, y una segunda columna que contiene los valores de las masas o momentos de inercia según corresponda.

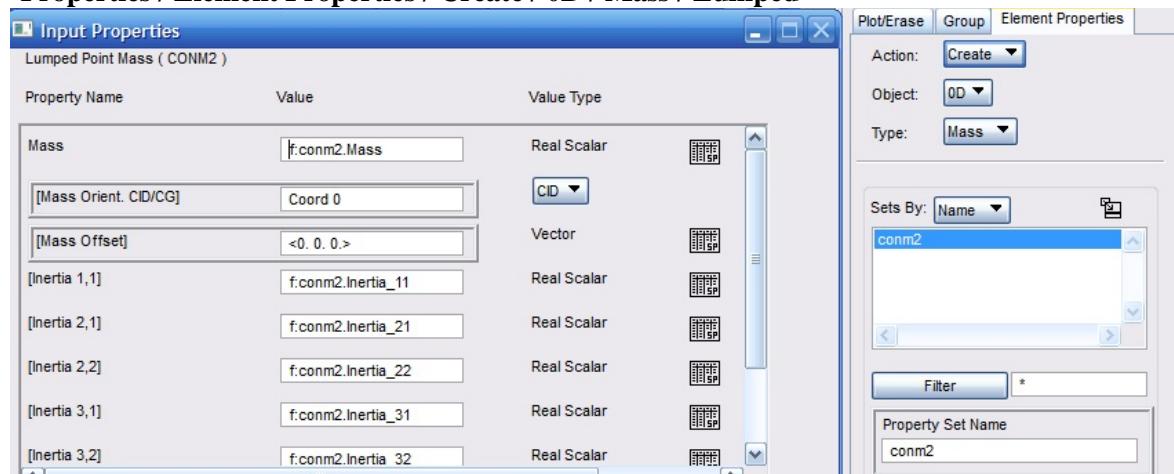
**‘Properties / Fields / Create / Spatial / FEM’**



**Figura 5-24:** Creación de tablas de masas y momentos de inercia

5. Creación de una propiedad 0D de masa puntual. Esta propiedad debe hacer referencia (en sus casillas correspondientes) a los 4 campos previamente creados. Además, se debe seleccionar el conjunto de elementos 0D en el menú “Select Application Region...” del siguiente menú:

#### ‘Properties / Element Properties / Create / 0D / Mass / Lumped’



**Figura 5-25:** Creación de la propiedad 0D referente a las masas puntuales

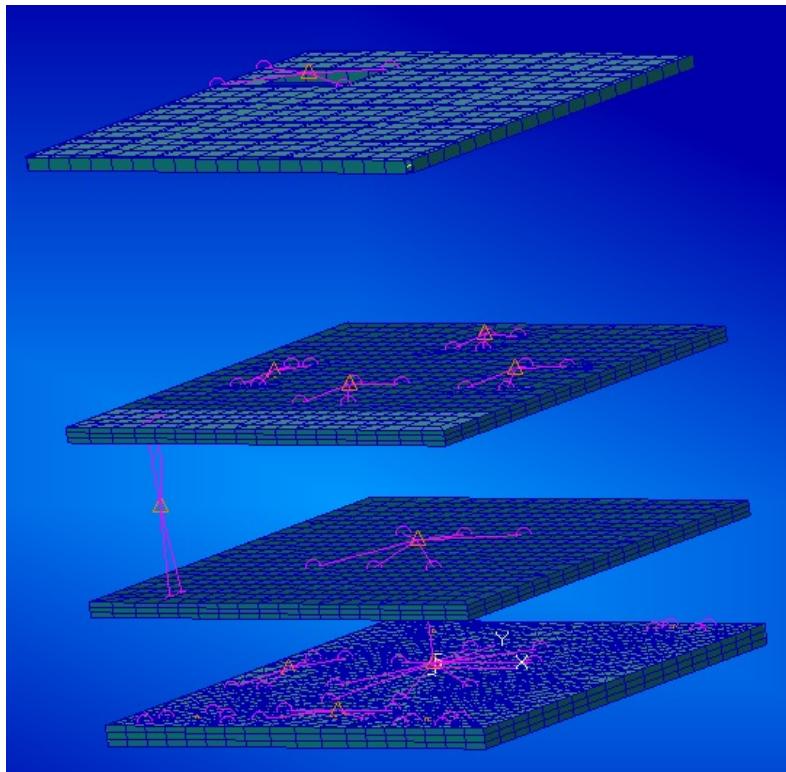


Figura 5-26: Modelización de los equipos mediante masas puntuales

## 5.16 Aplicación de la masa no estructural y procesos de verificación

Una vez finalizado la parte estructural del modelo y después de incluir todos los equipos que se han decidido crear mediante masas puntuales, el siguiente paso es representar el resto de masa del modelo, que lo conforma todo el material que no haya quedado representado de las anteriores maneras (paneles solares, cableado, revestimientos, etc...). Esto se consigue mediante el parámetro de masa no estructural (NSM) que aparece en las propiedades de los elementos 2D. Este parámetro indica la cantidad de masa no estructural por unidad de área de los elementos 2D.

Para el modelo UPMSat-2, el primer paso es modificar las propiedades 2D de los paneles de sustrato para incluir la masa no estructural de las células solares que se apoyan sobre ellos. El valor del parámetro NSM se mide en  $\text{kg}/\text{m}^2$ , y se calcula dividiendo la masa que se desea añadir entre el área de la superficie total correspondiente.

Las masas de los paneles solares son:

Panel solar	Masa (kg)
Panel solar X+	1.030
Panel solar X-	1.030
Panel solar Y+	1.030
Panel solar Y-	1.030
Panel solar Z+	0.555

Tabla 5-22: Masas de los paneles solares

Se recomienda conocer en primer lugar la masa estructural de cada panel de sustrato mediante el comando:

‘Tools/Mass Properties>Show/3D’ Define Region...: Group (se debe seleccionar el grupo correspondiente al panel de sustrato)

Después se calcula cuál debería ser su masa total si se le añade la masa no estructural del panel solar correspondiente. Éste es el valor que se desea conseguir.

El siguiente paso es modificar la propiedad del panel de sustrato para incluir el valor de la masa no estructural por unidad de área (NSM).

#### ‘Properties / Element Properties / Modify / 2D / Shell’

El siguiente paso es comprobar que la masa final de cada panel de sustrato coincide con lo previamente calculado mediante el mismo comando de cálculo de masa.

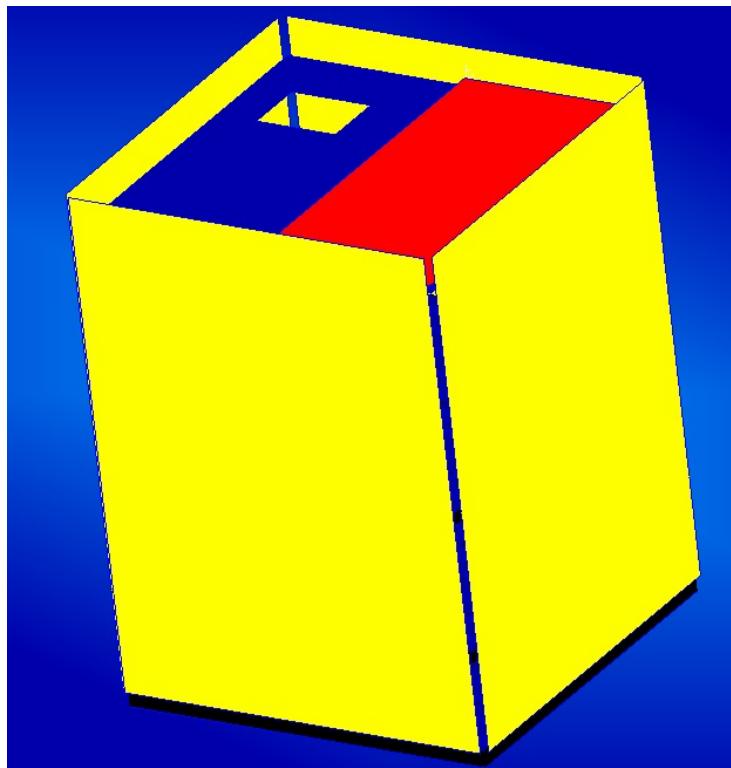


Figura 5-27: Visualización de la masa no estructural sobre los paneles de sustrato

Para el resto del modelo se modifica la NSM de otras zonas, como los paneles de cada bandeja, para que la masa total del UPMSat-2 llegue a 45 kg. El proceso es análogo que en el cálculo de masa no estructural sobre los paneles de sustrato, pero aquí se calcula la masa total del modelo.

Finalmente, se recomienda realizar un chequeo a la estructura global. Se puede volver a repetir las verificaciones del mallado (la equivalencia de nodos se debe realizar con cuidado) y realizar las inspecciones mediante la visualización de propiedades o materiales aplicados a la estructura:

#### ‘Properties>Show’

#### ‘Display /Load/BC/Element Prop...’ Beam Display: 3D: FullSpan+Offsets

También es conveniente crear grupos por propiedades y por materiales (cada grupo creado contiene elementos que comparten la misma propiedad o el mismo material respectivamente) para chequear la correcta aplicación de propiedades y de materiales. Estos grupos son utilizados posteriormente para la visualización de los resultados en la fase de posproceso.

‘Group/Create/Property Set/Multiple Groups ‘ (prefix: prop.)

‘Group/Create/Material/Multiple Groups ‘ (prefix: matl.)

## 5.17 Aplicación de las condiciones de contorno

En la mayoría de las estructuras, las condiciones de contorno se aplican únicamente en la interfaz de estas estructuras. En el caso del UPMSat-2, la interfaz es una distribución circunferencial de 12 tornillos en la parte inferior del sistema de separación. Estos tornillos unen el sistema de separación con el adaptador del vehículo lanzador (durante el lanzamiento) o con el útil de ensayos (para ensayos en tierra). Para el modelo FEM del satélite, se ha representado los 12 agujeros en la base del sistema de separación, así que se procede de manera similar que con la creación de uniones por RBE2, es decir, se deben crear 1 nodo en el centro de cada agujero y unirlo mediante RBE2 a los nodos de la base que rodean a cada agujero.

Posteriormente, se crea restricciones de punto único (SPC) en todos los nodos centrales, restringiendo los tres DOF de traslación, y los DOF de rotación salvo el de rotación en dirección al eje del agujero (en este caso, se restringen los DOF 1, 2, 3, 4 y 5).

El comando que permite crear las restricciones de punto único es:

**‘Loads/BCs / Load/Boundary Conditions / Create / Displacement / Nodal / Standard’**

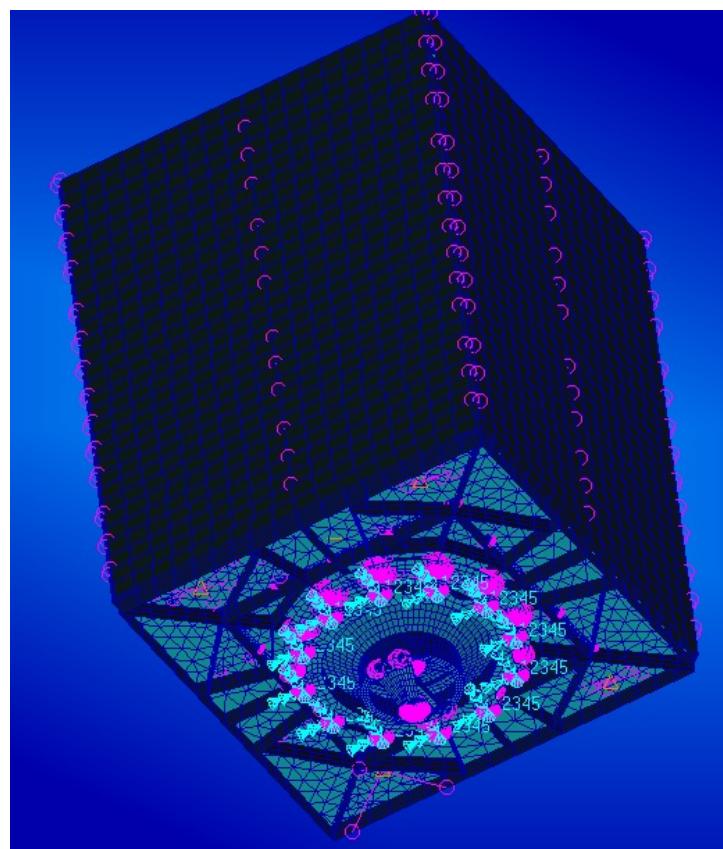


Figura 5-28: Aplicación de las condiciones de contorno

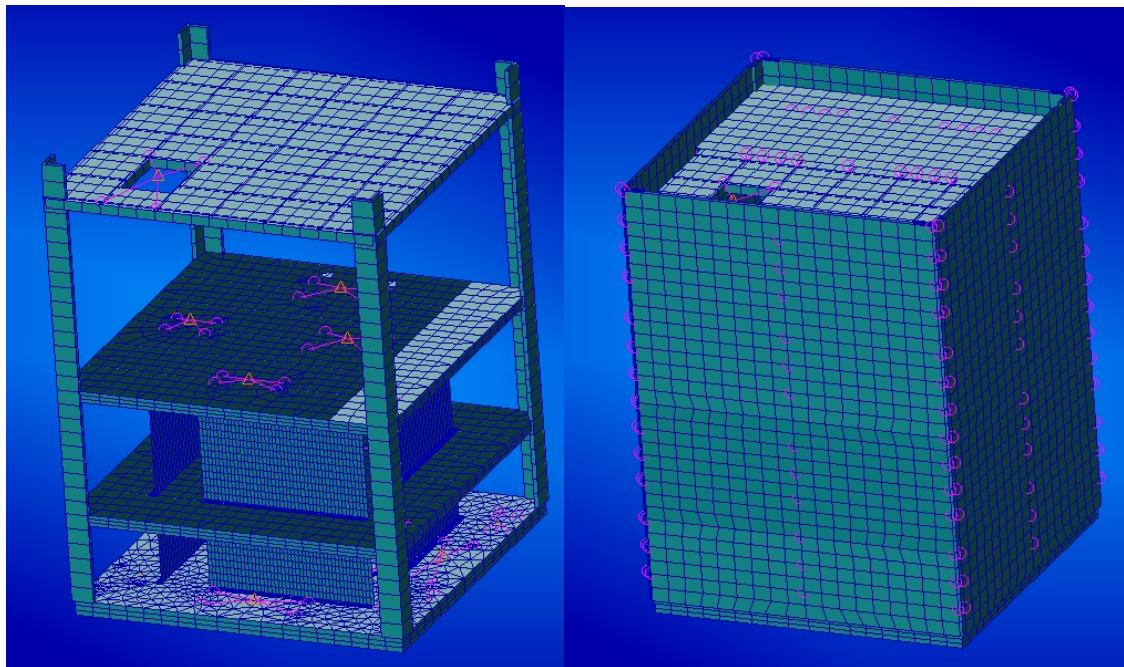


Figura 5-29: Modelo completo (sin paneles de cierre y con paneles) del UPMSat-2

## 6 Configuración de los análisis

La última fase del preproceso es generar un archivo .bdf con todos los datos del modelo FEM (nodos, elementos, propiedades, materiales, condiciones de contorno, etc...) que sirve como input al programa MSC Nastran para ejecutar los análisis. La idea es disponer de un .bdf modificado (sin cabecera de análisis) con toda la información del modelo y de un conjunto de cabeceros estándar para cada tipo de análisis, que contienen las sentencias relativas a la aplicación de cargas, tipo de análisis y solicitud de resultados.

En este paso, se va a crear el archivo .bdf mediante el comando de configuración de análisis: **‘Analysis/Entire Model/Analysis Deck’**

En este caso da igual qué tipo de análisis se configure, ya que la información referente al tipo de análisis (que aparece en las primeras secciones del archivo .bdf) debe ser borrado posteriormente de forma manual.

Cuando se aplica el anterior comando, se va generando el archivo con el nombre que se haya definido. Una vez creado el .bdf, se abre con cualquier editor de texto y se eliminan las primeras sentencias (desde el inicio hasta la definición de parámetros inclusive, justo después del inicio del Bulk Data) y la sentencia final “ENDDATA” (ver [1]). En cuanto a las condiciones de contorno, se recomienda copiarlas en los cabeceros que las necesitan (modos propios, estático) y después borrar estas sentencias en el archivo .bdf.

Con esto, queda finalizada la etapa de preproceso (creación del modelo de elementos finitos y configuración de análisis). Los siguientes pasos es modificar los cabeceros de los diferentes análisis para adaptarlos al modelo, realizar los análisis con MSC Nastran, verificar los resultados e importarlos (a través del archivo .xdb o del archivo .op2) al programa MSC Patran para visualizarlos sobre el modelo (etapa de posproceso).

Para los análisis que se indican a continuación, se recomienda leer los capítulos correspondientes del Manual de Cálculo Estructural [1] para aprender a manejar los cabeceros de análisis.

### 6.1 Chequeos

El primer grupo de análisis son los análisis de chequeos que sirven para comprobar que el satélite ha sido modelizados correctamente. Estos análisis son:

- Energía de deformación
- Gravedad
- Frecuencias de cuerpo rígido

### 6.2 Análisis de modos propios

Para el análisis de modos propios se aplica las condiciones de contorno sobre los puntos de la interfaz (ver sección 5.17) y se debe comprobar que las frecuencias propias más importantes del modelo cumplen con los siguientes requisitos:

- 1<sup>a</sup> frecuencia lateral > 45 hz
- 1<sup>a</sup> frecuencia longitudinal > 90 hz

### 6.3 Análisis estático

Se debe aplicar análisis estáticos sobre el modelo con las condiciones de contorno aplicadas a los puntos de la interfaz. La carga estática consiste en una carga inercial que afecta a todos los

elementos que tengan masa y se contrarresta con las fuerzas de reacción en las condiciones de contorno. Mediante los cabeceros de carga estática se definen la dirección y magnitud de las aceleraciones estáticas aplicadas. Se debe aplicar las siguientes aceleraciones:

Análisis estático - Aceleraciones (g)		
X	Y	Z
6	6	8

Tabla 6-1: Especificaciones para el análisis estático

## 6.4 Análisis de vibraciones sinusoidales

Para los análisis de vibraciones sinusoidales se utiliza los cabeceros correspondientes que permiten aplicar la aceleración en un punto ficticio y transmitir esta aceleración a los puntos de la interfaz mediante RBE2 (todos estos elementos están incluidos en el cabecero). El usuario simplemente tiene que adaptar el cabecero al modelo e incluir la siguiente especificación:

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 6-2: Especificaciones para el análisis de vibraciones sinusoidales

## 6.5 Análisis de vibraciones aleatorias

Los análisis de vibraciones aleatorias comparten los mismos elementos auxiliares que las vibraciones sinusoidales. Igualmente el usuario debe adaptar los cabeceros al modelo y a las especificaciones:

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

Tabla 6-3: Especificaciones para el análisis de vibraciones aleatorias

## **ANEXO 2: EJEMPLOS DE MODELIZACIÓN DE LAS PLACAS DE LA EBOX DEL UPMSAT-2**

### **1 Introducción**

El propósito de este documento es describir la estructura de la Ebox del UPMSat-2 y detallar los pasos para la creación del modelo de elementos finitos (FEM).

### **2 Documentos aplicables y de referencia**

- [1] García Pérez, A. y Fernández de Toro Espejel, J.J.: “Manual de cálculo estructural”
- [2] Pérez, J. “UPMSat-2 Geometry Envelope”
- [3] MSC Patran 2012.2: User’s Guide
- [4] MSC Nastran 2012: Getting Started with MSC Nastran User’s Guide
- [5] MSC Nastran 2013.1: Quick Reference Guide
- [6] MSC Nastran 2013.1: Linear Static Analysis User’s Guide
- [7] MSC Patran 2012.2: Reference Manual Part 1: Basic Functions
- [8] MSC Patran 2012.2: Reference Manual Part 2: Geometry Modeling
- [9] MSC Patran 2012.2: Reference Manual Part 3: Finite Element Modeling

### **3 Definiciones y abreviaturas**

AOCS	Attitude and Orbital Control System
CAD	Computer Aided Design
DOF	Degree of freedom (grados de libertad)
FEM	Modelo de elementos finitos
MPC	Ligadura multipunto
MSC	MacNeal-Schwendler Corporation
RBE2	Elemento rígido (tipo 2)
UPM	Universidad politécnica de Madrid

## 4 Descripción de la estructura

El subsistema de CDH (Command and Data Handling) es la caja electrónica que está compuesto por una carcasa metálica con forma prismática que aloja en su interior las tarjetas electrónicas que componen la parte electrónica de este subsistema. Cada una de las tarjetas (PCB) está sujetada mediante un marco metálico o chasis, que su vez está unida a la carcasa.

Todas las piezas estructurales que conforman la estructura del Ebox (carcasa y marcos) están fabricadas con la aleación de aluminio EN AW 7075-T6, mientras que las tarjetas electrónicas están hechas de FR4.

Propiedades		EN AW 7075-T6	FR4
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$	2800	1850
Módulo elástico (GPa)	E	71	20.1
Coeficiente de Poisson	$\nu$	0.33	0.118
Límite elástico (MPa)	$\sigma_Y$	434	310
Resistencia última (MPa)	$\sigma_U$	510	345
Coeficiente de expansión térmica ( $\text{K}^{-1}$ )	$\alpha$	$22 \times 10^{-6}$	$20 \times 10^{-6}$

Tabla 4-1: Propiedades de los materiales

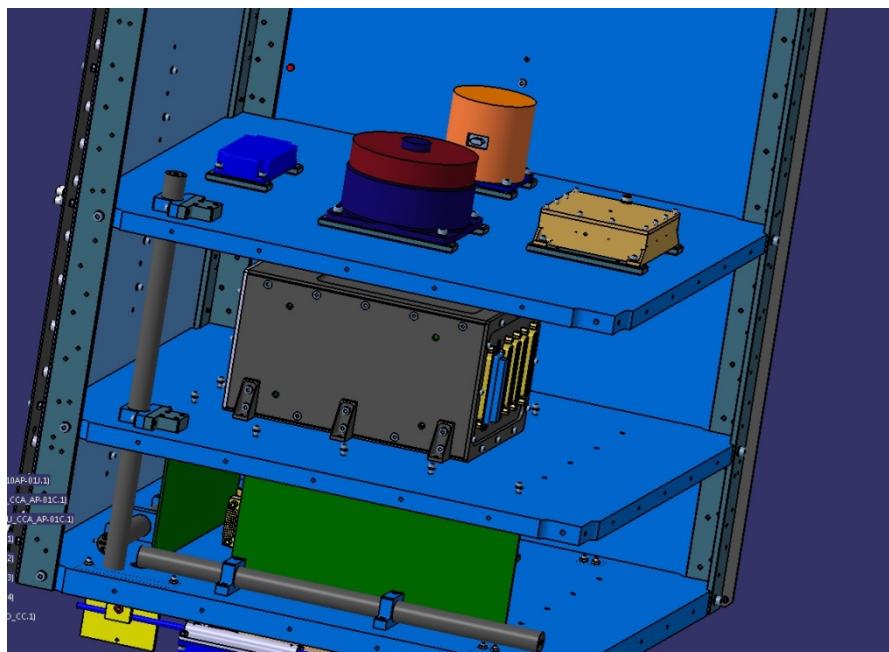


Figura 4-1: Subsistema C&DH situado sobre la bandeja B del UPMSat-2



Figura 4-2: Subsistema C&DH

## 4.1 Carcasa

La carcasa es la parte estructural fundamental de este subsistema y es la que debe ser representada en el modelo de elementos finitos. Tiene forma de prisma (6 caras rectangulares). Cada cara constituye una pieza compuesta por una lámina (el espesor de cada lámina no es necesariamente uniforme, como se verá más adelante) y una distribución de elementos rigidizadores y zonas de unión.

Unidos a dos caras laterales opuestas están un total de 6 pestañas reforzadas que sirven para unir esta carcasa a la bandeja B del UPMSat-2.

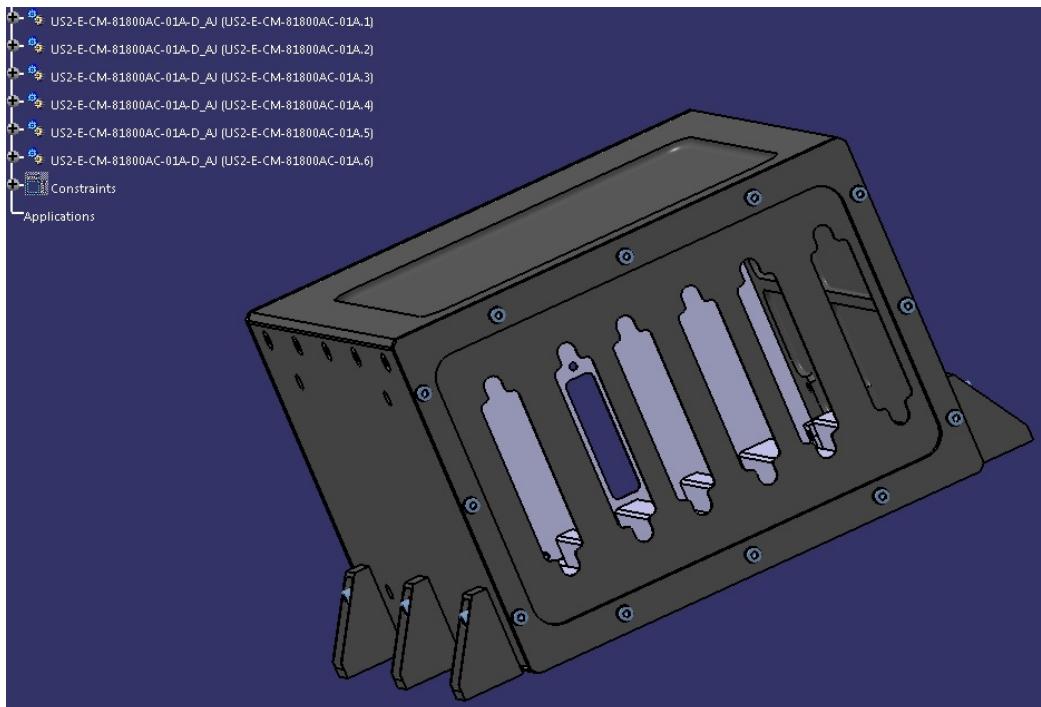


Figura 4-3: Carcasa de la caja electrónica

#### 4.1.1 Placa inferior

La placa inferior está situada en la cara Z- de la carcasa de la Ebox. Está fabricada con aleación de aluminio EN AW 7075-T6.

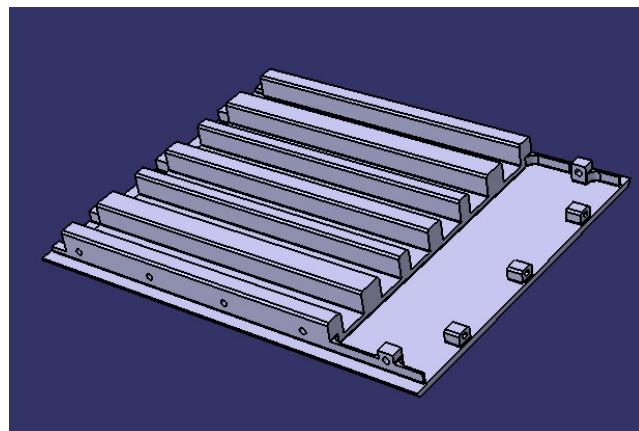


Figura 4-4: Placa inferior

#### 4.1.2 Placa superior

La placa superior está situada en la cara Z+ de la carcasa de la Ebox. Está fabricada con aleación de aluminio EN AW 7075-T6. Es similar a la placa inferior, pero orientada de forma simétrica al plano XY. La diferencia es que la placa superior presenta una zona central con menor espesor.

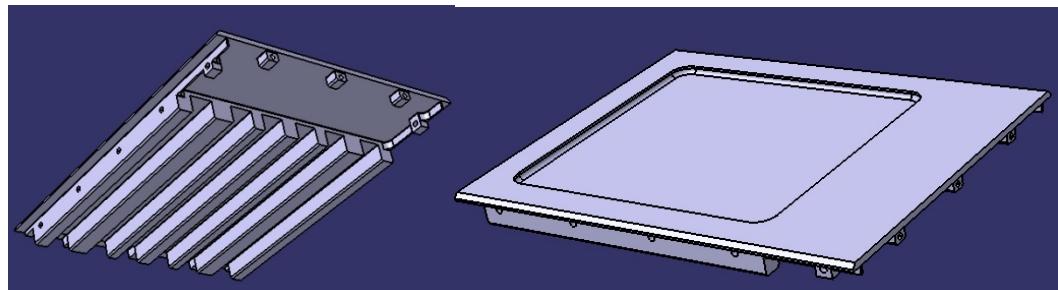


Figura 4-5: Placa superior

#### 4.1.3 Placas laterales

Las placas laterales se sitúan en las caras Y+ e Y- de la carcasa de la Ebox. Están fabricadas con aleación de aluminio EN AW 7075-T6.

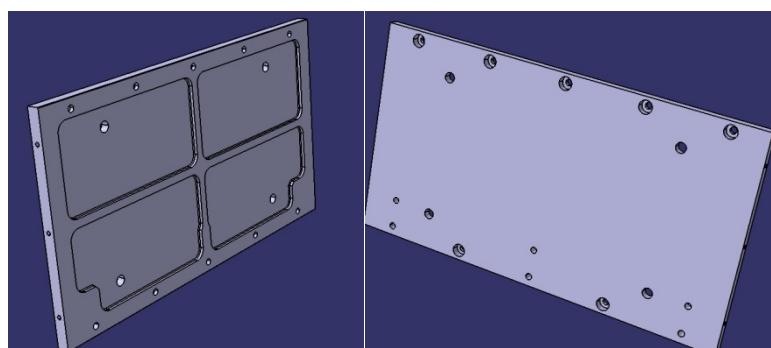


Figura 4-6: Placa lateral

#### 4.1.4 Placa frontal

La placa frontal se sitúa en la cara X+ de la carcasa de la Ebox. Está fabricada con aleación de aluminio EN AW 7075-T6.

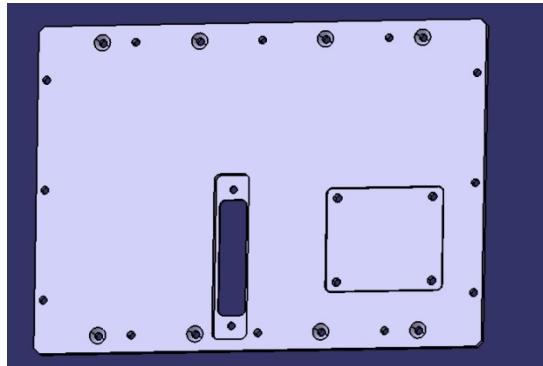


Figura 4-7: Placa frontal

#### 4.1.5 Placa trasera

La placa trasera se sitúa en la cara X- de la carcasa de la Ebox. Está fabricada con aleación de aluminio EN AW 7075-T6.

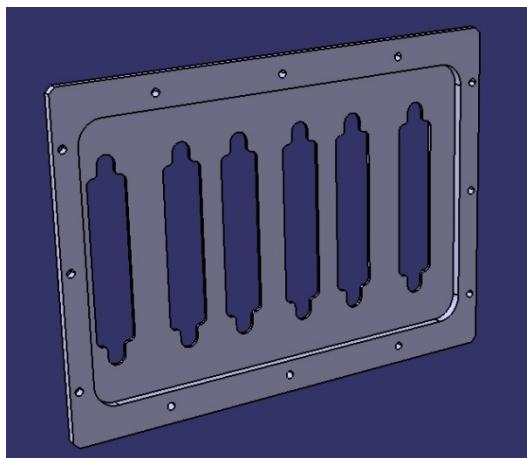


Figura 4-8: Placa trasera

#### 4.1.6 Pestañas reforzadas

Son elementos que están unidos a las placas laterales y a la bandeja del satélite mediante tornillos. Están fabricadas con aleación de aluminio EN AW 7075-T6.

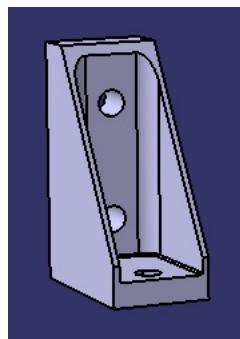


Figura 4-9: Pestaña reforzada

## 5 Estrategias de modelización

Para crear cada pieza, se puede seguir una de las siguientes estrategias de modelización:

- Modelización esquemática.
- Modelización detallista.
- Modelización híbrida.

### 5.1.1 Modelización esquemática

Esta estrategia de modelización consiste en transformar radicalmente la geometría importada de cada pieza en un conjunto de entidades más simples. Es decir, el modelo geométrico final debe quedar dividido en superficies simples (3 o 4 lados) siempre que se pueda, y sólo se representan los agujeros importantes (agujeros relacionados con los elementos de unión entre las distintas piezas). Algunos detalles simplemente se omiten (si no son realmente importantes desde el punto de vista estructural) y otras zonas se transforman en geometría más simple (generalmente los elementos rigidizadores se sustituyen por líneas que van a generar elementos tipo BEAM (1D), las esquinas redondeadas se sustituyen por esquinas rectas, etc...).

Este tipo de modelización representa la geometría estructural esencial y de forma simplificada. Por tanto, las dimensiones y la masa del modelo FEM no son exactamente iguales a las del modelo CAD. La diferencia de masa se corrige fácilmente aplicando una masa no estructural a las propiedades 2D. En cuanto a la diferencia de dimensiones, se debe tener en cuenta este aspecto fundamentalmente a la hora de ensamblar distintas piezas para que el modelo final quede sin solapamientos ni gaps.

Las ventajas de esta estrategia de modelización son:

- Mallados regulares y con menor probabilidad de error (mallas rectangulares).
- Menor consumo de tiempo para las correcciones de elementos y remallados.

Las desventajas de esta estrategia de modelización son:

- Mayor consumo de tiempo para la modificación de geometría y creación de geometría auxiliar.
- Representación más esquemática y por tanto, menos detallada de la estructura real.
- Mayores diferencias dimensionales entre modelo FEM y modelo CAD.

### 5.1.2 Modelización detallista

Esta estrategia de modelización consiste en realizar pocas modificaciones a la geometría importada para adaptarla con el objetivo de poder mallarla más fácilmente. Esta geometría modificada suele ser más fiel a la representada por el modelo CAD ya que suele incluir bastantes detalles como agujeros, bordes redondeados, etc... Por tanto, la geometría que va a ser mallada suele estar constituida por superficies irregulares que al mallarlas generan una distribución irregular de elementos. Esto tiene el inconveniente de que hay mayor probabilidad de que aparezcan elementos erróneos que deben ser modificados.

Las ventajas de esta estrategia de modelización son:

- Menor consumo de tiempo para la modificación de geometría.
- Representación más detallada de la estructura real.

Las desventajas de esta estrategia de modelización son:

- Mallas irregulares y con mayor probabilidad de error.
- Mayor consumo de tiempo para las correcciones de elementos.

### **5.1.3 Modelización híbrida**

Esta estrategia es una combinación de las dos anteriores. Se suele aplicar la estrategia esquemática para aquellas zonas que son más fáciles de simplificar, mientras que en las zonas más complejas se aplica la estrategia detallista. De esta forma, se pretende que al menos una parte importante del modelo quede representada de forma regular y sencilla, pero sin malgastar tiempo en modificar la geometría de las zonas más complejas.

## 6 Ejemplo de modelización con la estrategia esquemática - Placa inferior

A continuación se va a indicar como ejemplo los principales pasos a seguir para la creación de modelos.

### 6.1 Configuración de las preferencias del modelo

El primer paso siempre es configurar las preferencias del modelo. Hay que indicar que se va a construir un modelo para análisis estructural realizado con el programa MSC Nastran. Se debe poner el tamaño aproximado del modelo para que el programa determine automáticamente la tolerancia dimensional.

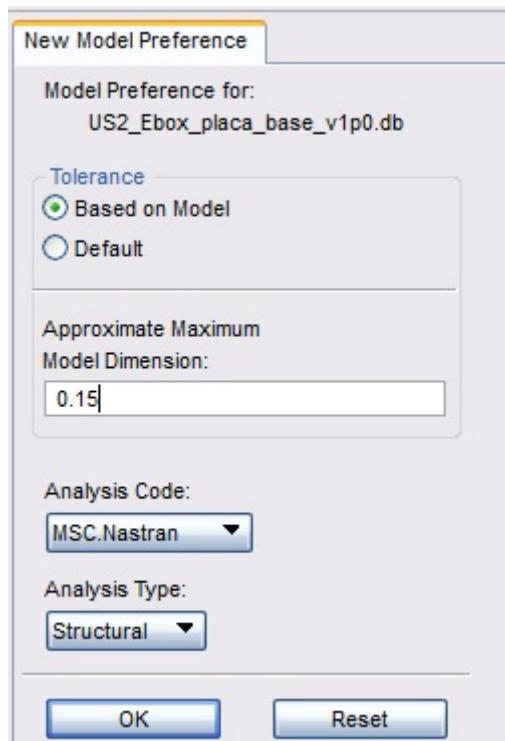


Figura 6-1: Configuración de las preferencias del modelo

### 6.2 Importar el modelo CAD (archivo step)

El siguiente paso es importar el modelo en el programa MSC Patran. En este caso, el modelo CAD fue construido con CATIA y se encuentra en formato STEP. Es importante indicar en el proceso de importación el sistema de unidades del modelo CAD. En este caso las dimensiones vienen indicadas en metros (ver Figura 6-3).

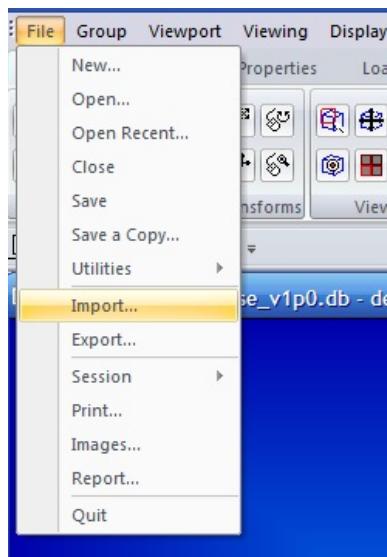


Figura 6-2: Importar un modelo CAD al programa MSC Patran

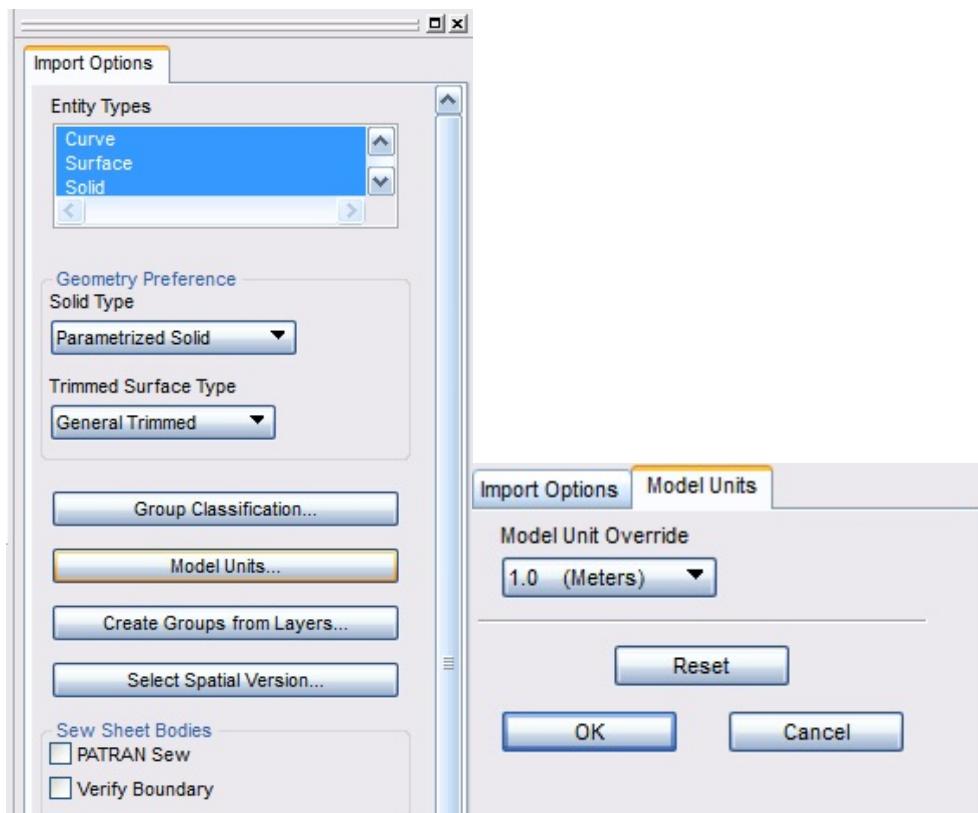


Figura 6-3: Especificación del sistema de unidades en la operación de importación

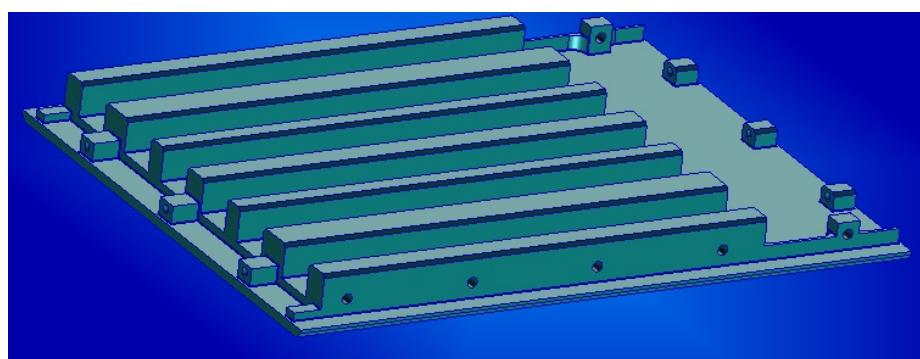


Figura 6-4: Geometría importada

## 6.3 Creación de grupos

Siempre es conveniente crear desde el inicio grupos donde incluir determinados elementos y diferenciarlos de otros. En este caso, cuando se importa un modelo se crean automáticamente los grupos asociados a las piezas geométricas de este modelo importado. A partir de aquí conviene crear grupos que incluyan la geometría auxiliar que se vaya creando y la geometría definitiva.

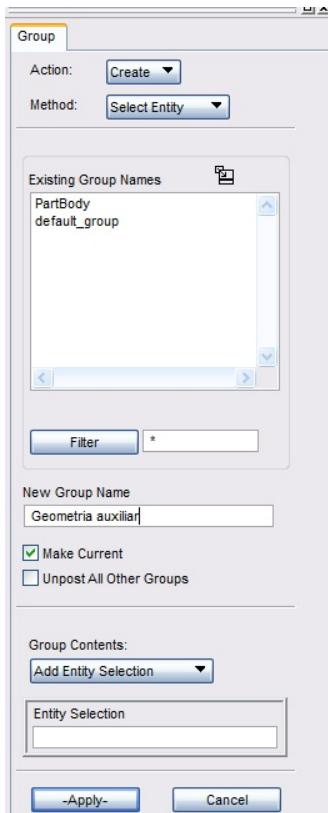


Figura 6-5: Creación de un grupo para almacenar la geometría auxiliar

## 6.4 Operaciones de creación de geometría

Para esta estrategia, conviene seleccionar aquellas entidades de la geometría importada que sirvan como referencia para construir la geometría auxiliar. Se suelen tomar los vértices de la placa, las líneas rectas que sirven de contorno, etc... A partir de los puntos de referencia, se crean puntos auxiliares mediante las operaciones de proyección e interpolación de puntos:

**‘Geometry / Create / Point / Project’**

**‘Geometry / Create / Point / Interpolate’**

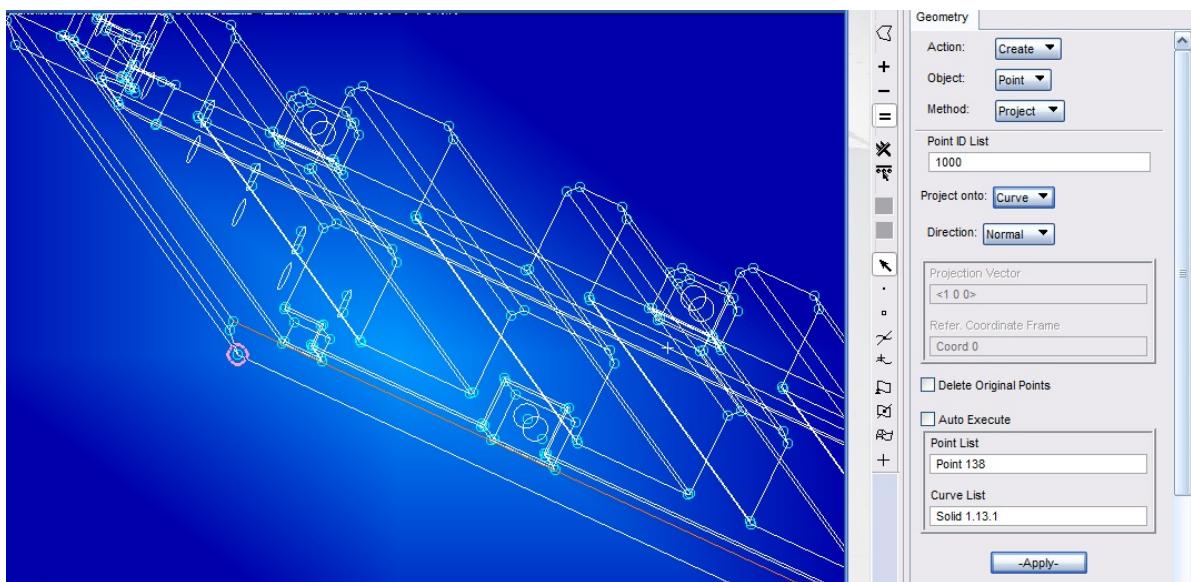


Figura 6-6: Creación de puntos de referencia mediante proyección de puntos sobre superficies o curvas

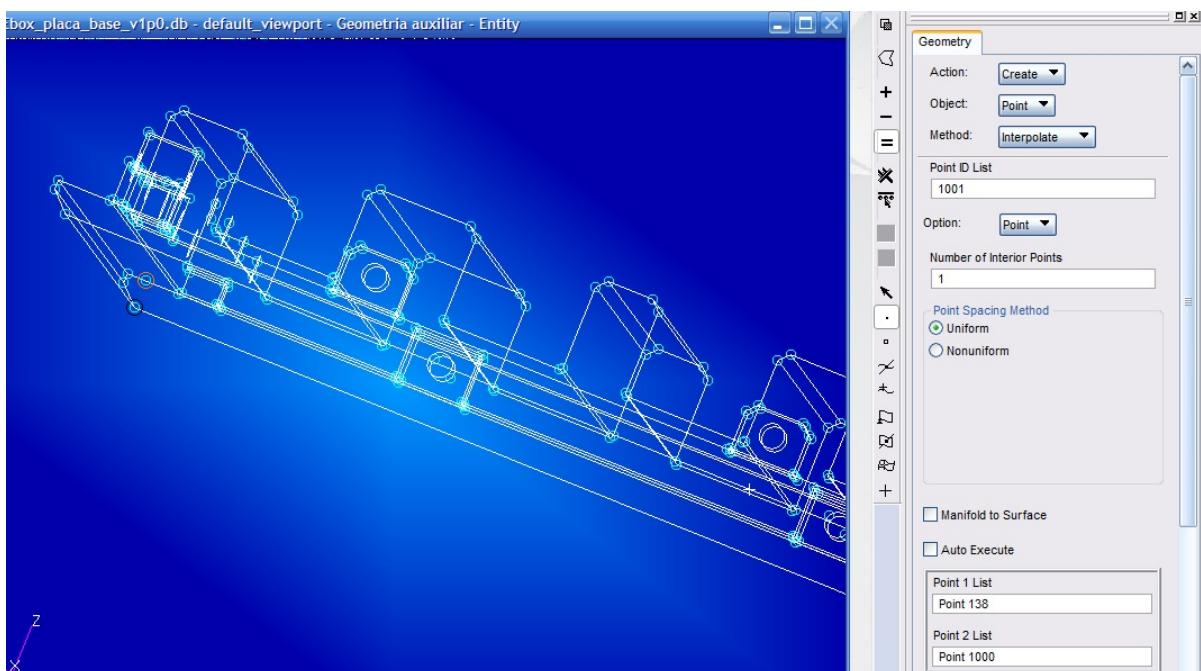


Figura 6-7: Creación de puntos de referencia mediante interpolación de puntos

Es conveniente que al crear las entidades geométricas, se defina rangos de numeración (ID) que identifiquen claramente si una entidad pertenece a la geometría importada, a la geometría auxiliar o a la geometría final.

Con los puntos creados, se crean curvas y superficies auxiliares mediante los comandos habituales. Suele ser habitual proyectar las curvas más determinantes de la geometría importada (aquellas que delimitan zonas de diferente espesor, o que indican la presencia de rigidizadores) sobre la superficie auxiliar.

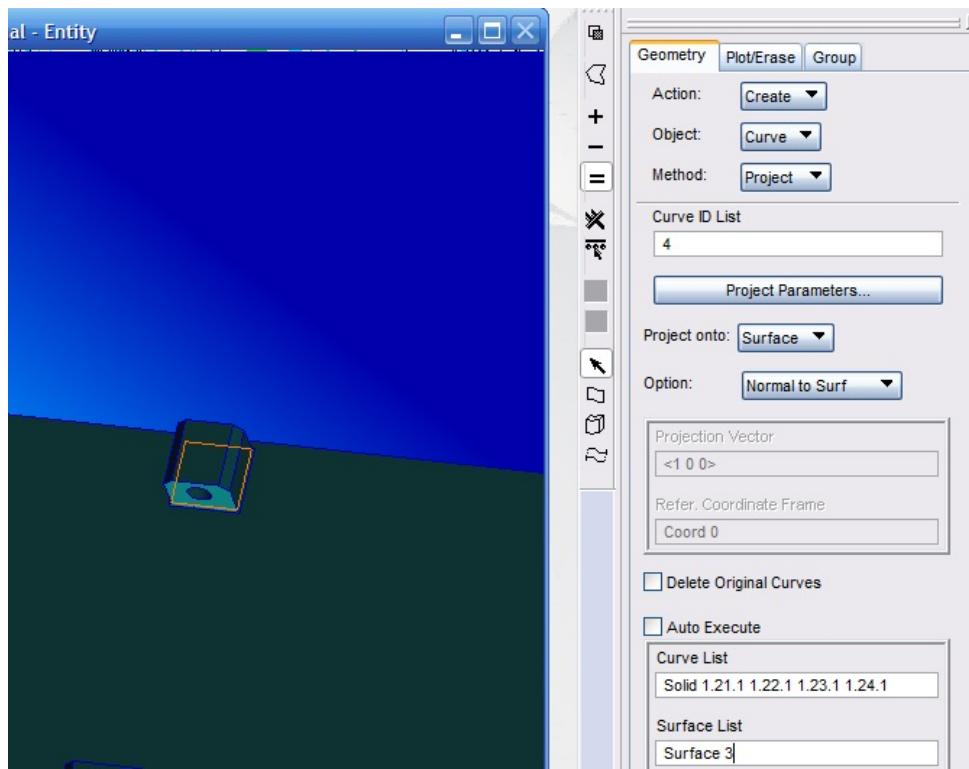


Figura 6-8: Proyección de curvas sobre superficies

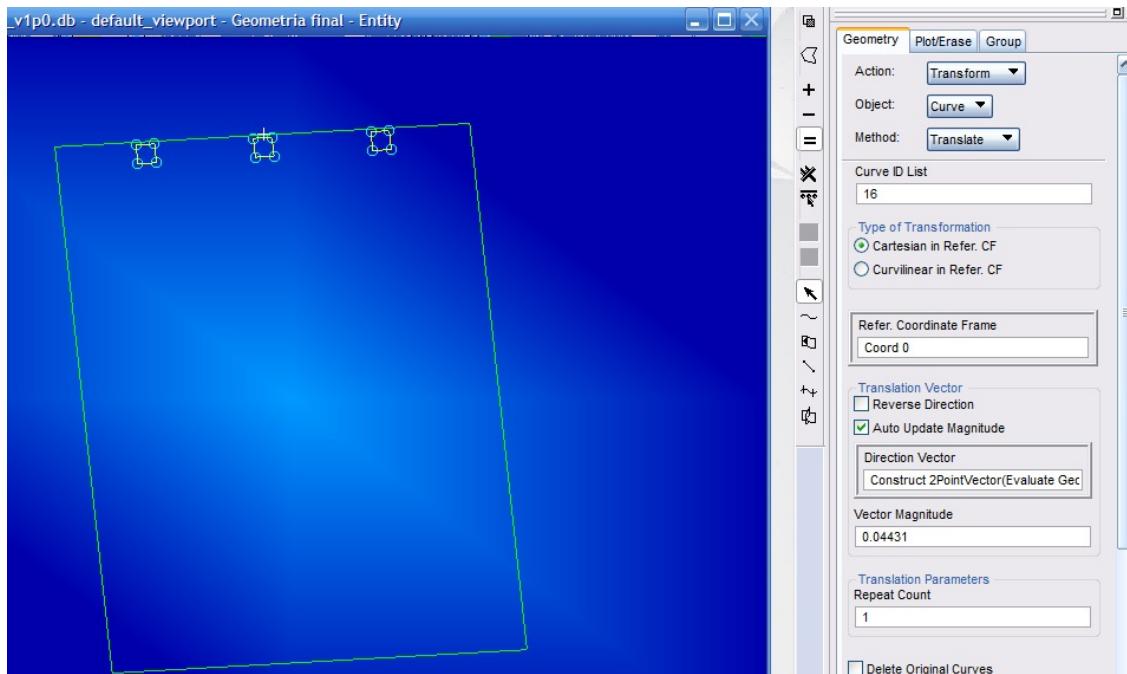


Figura 6-9: Traslación de curvas (1)

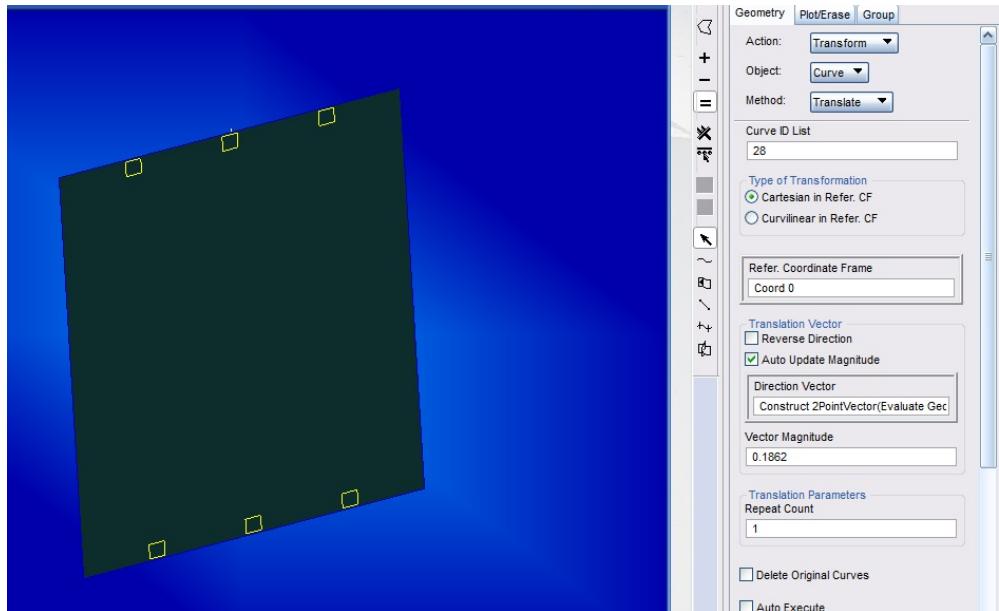


Figura 6-10: Traslación de curvas (2)

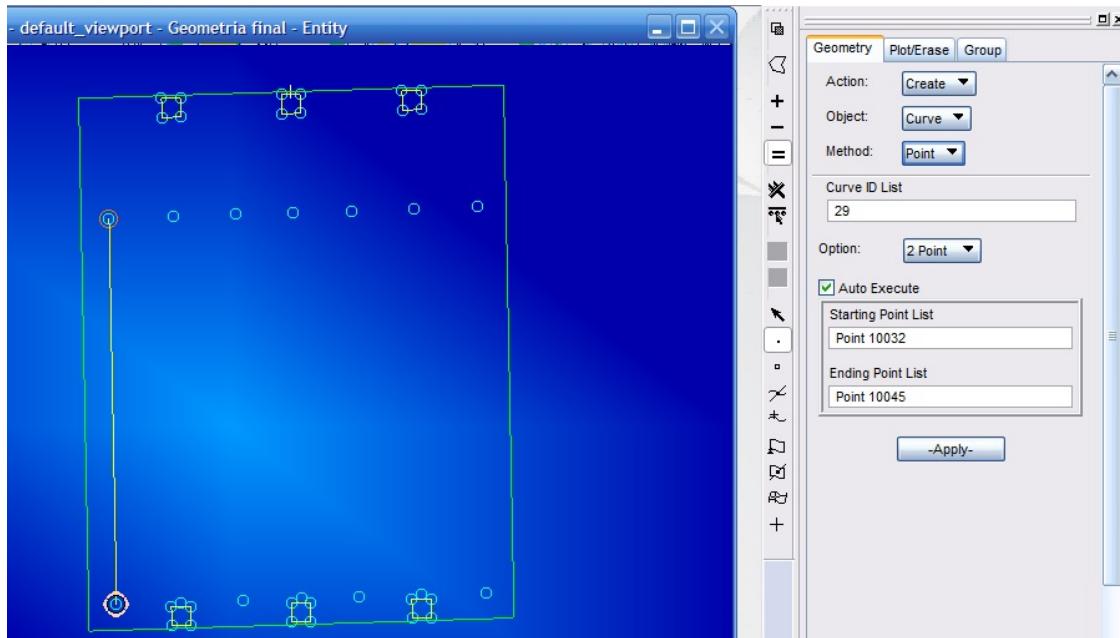


Figura 6-11: Creación de líneas medias para representar los rigidizadores como elementos 1D

En este modelo, la geometría final o definitiva que representa la placa de forma esquemática consta de una superficie rectangular (superficie regular) y un conjunto de curvas proyectadas sobre ella que indican la presencia de rigidizadores (que van a ser modelizados con elementos 1D) y zonas de unión (que van a ser representados con elementos 3D).

## 6.5 Creación de materiales y propiedades

Una vez finalizada la geometría, se pueden crear los materiales y las propiedades del modelo.

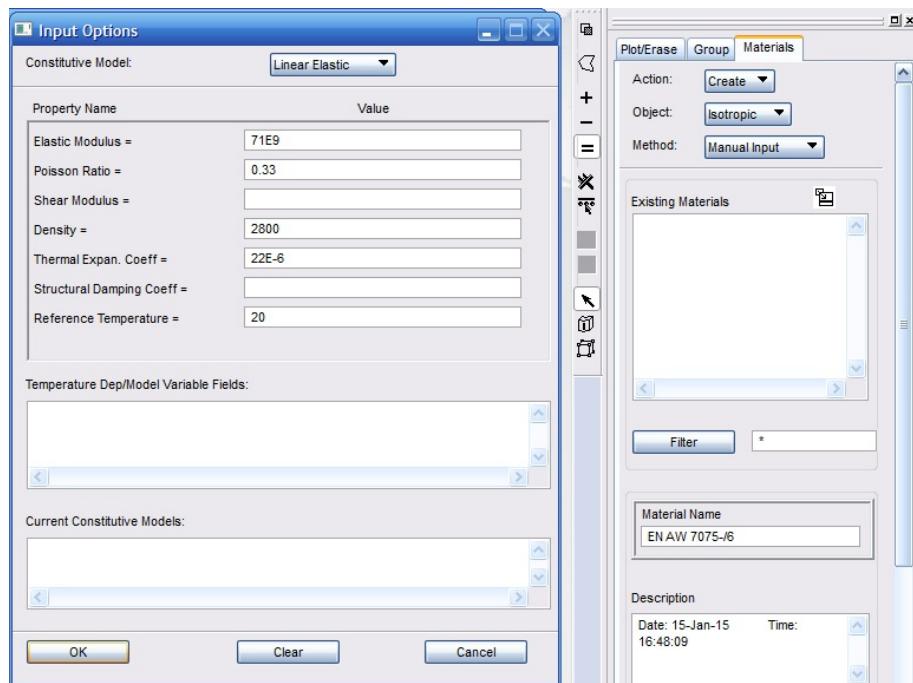


Figura 6-12: Creación del material EN AW 7075-T6

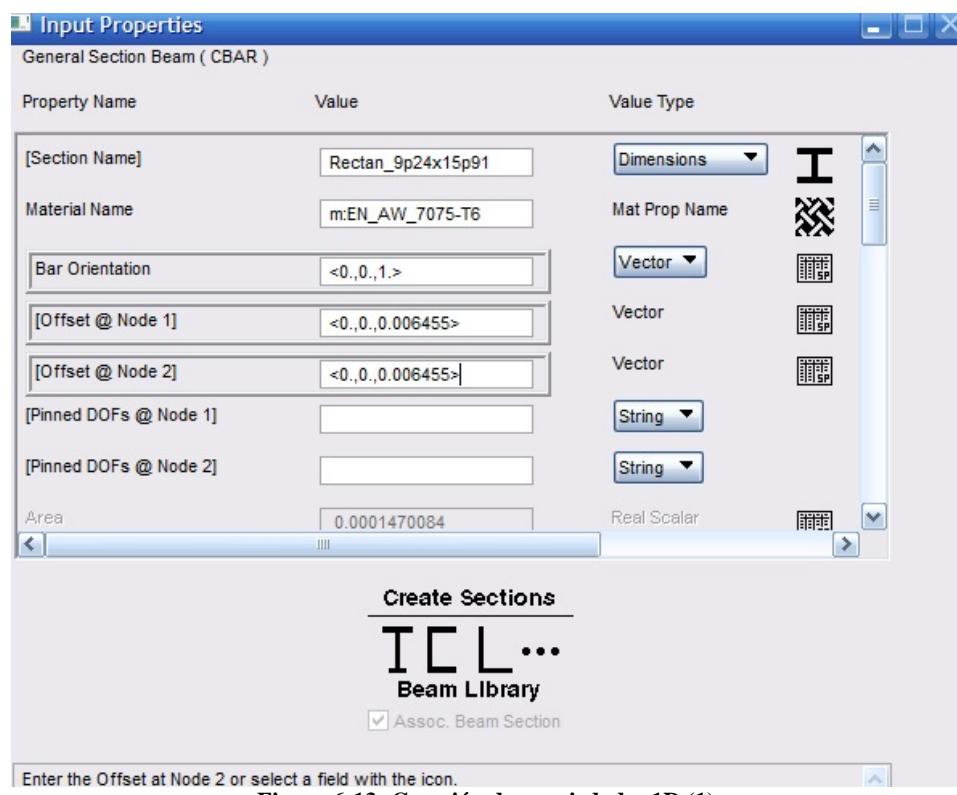


Figura 6-13: Creación de propiedades 1D (1)

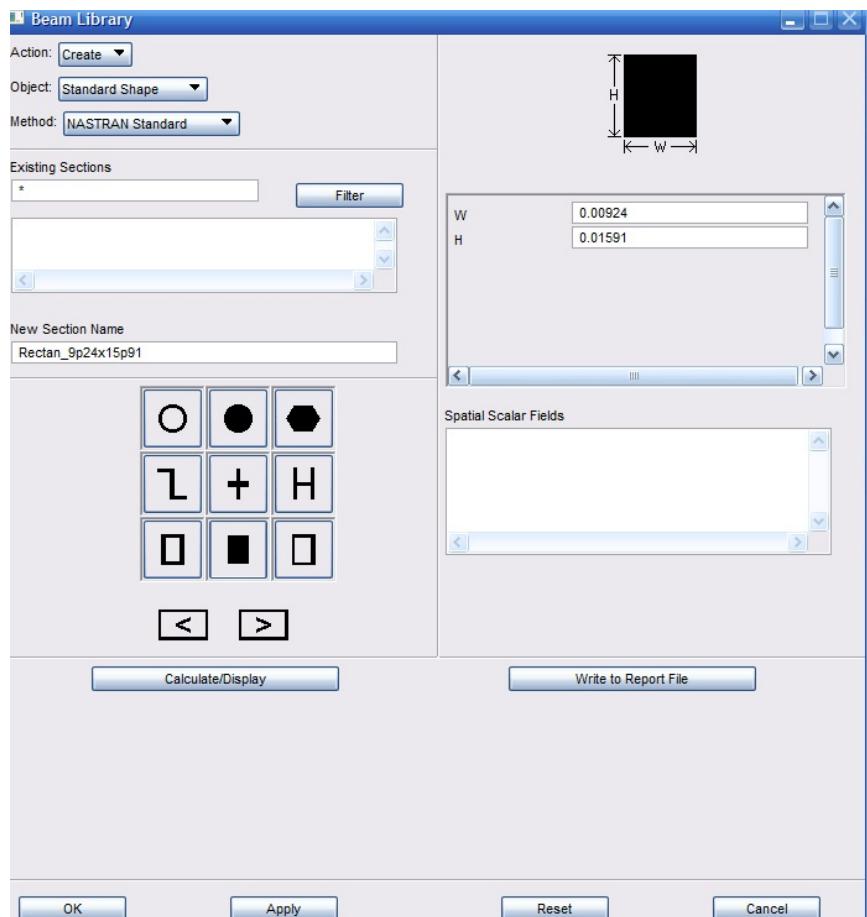


Figura 6-14: Creación de propiedades 1D (2): Definición de la sección

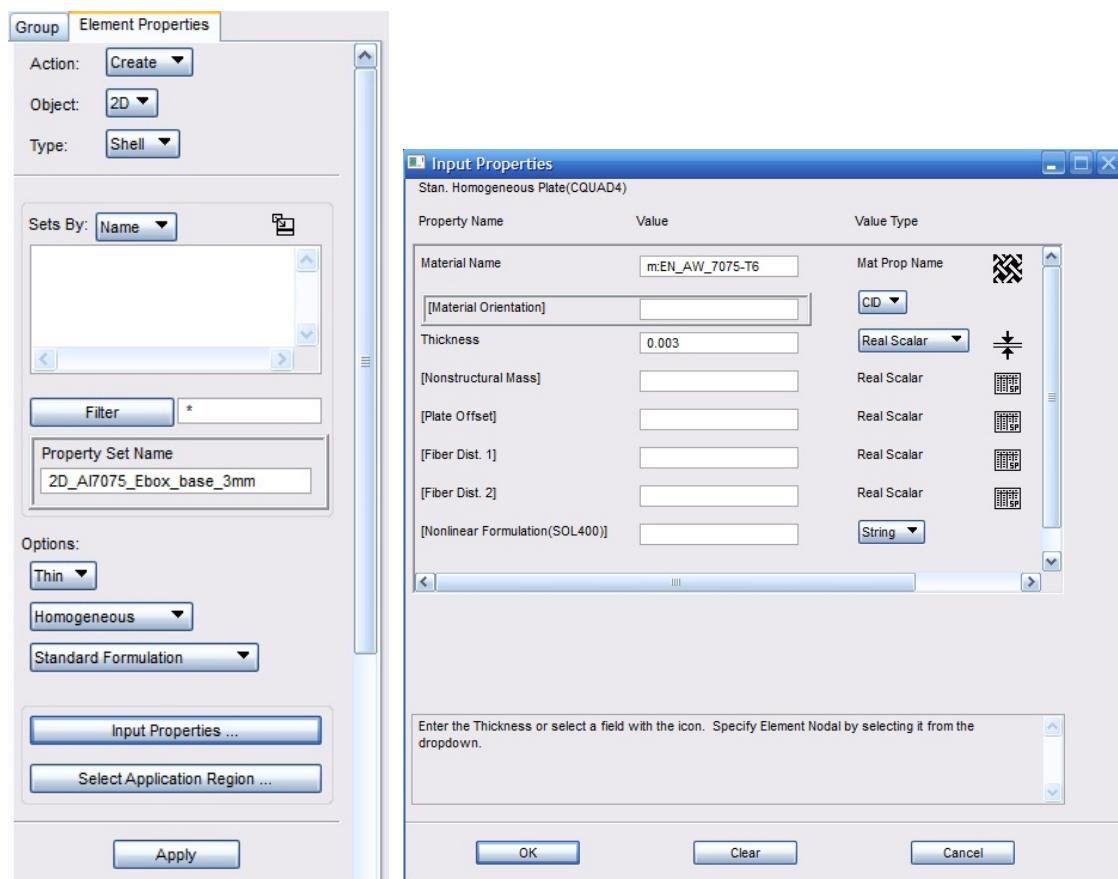


Figura 6-15: Creación de propiedades 2D

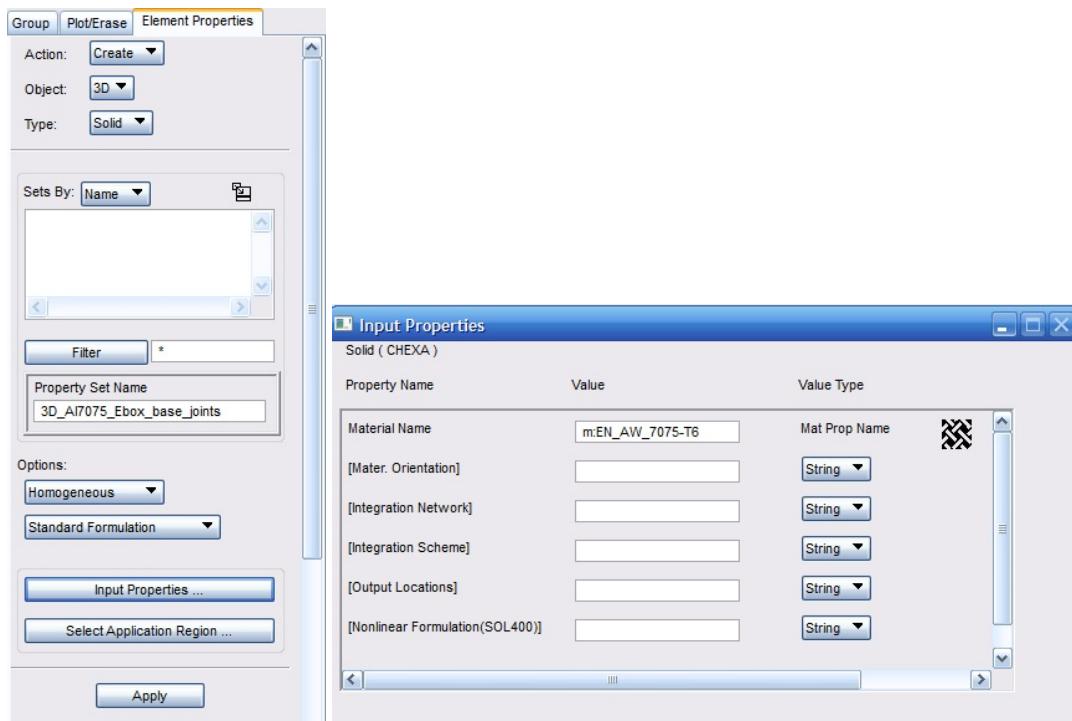


Figura 6-16: Creación de propiedades 3D

## 6.6 Operaciones de mallado

Generalmente, el proceso de mallado consta de la generación de una premalla sobre las curvas (para indicar el tamaño medio de los elementos o el número de elementos por cada curva), seguido del proceso de mallado. El mallado se puede realizar sobre curvas (elementos 1D), superficies (elementos 2D) o sólidos (elementos 3D).

A continuación se va a describir un proceso alternativo que no cumple rigurosamente con lo anterior y que se ha utilizado en este modelo. Este proceso puede ser útil en casos especiales.

El primer paso es la generación de la premalla. Es recomendable indicar un tamaño medio para poder seleccionar más de una curva en la misma operación.

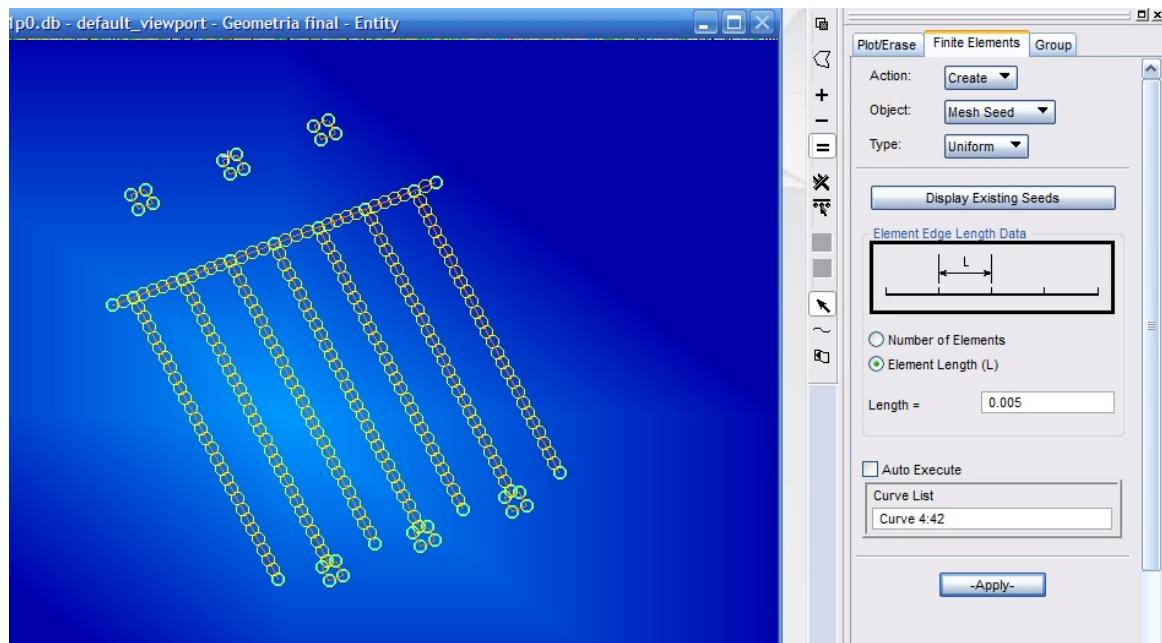


Figura 6-17: Creación de premalla o semilla de malla

Posteriormente se va a realizar mallados 1D sobre las curvas interiores. Estos mallados tienen como objetivo crear nodos que deben incluirse en el mallado 2D de la superficie. Esto debe ser así para asegurarse la continuidad estructural entre la superficie con los elementos rigidizadores y las zonas de unión. Por tanto, los elementos 1D creados son elementos auxiliares que deben eliminarse al finalizar la última operación de este proceso (ver Figura 6-27). Así que en el proceso de generación de estos elementos, no hace falta indicar ninguna propiedad (ver Figura 6-18).

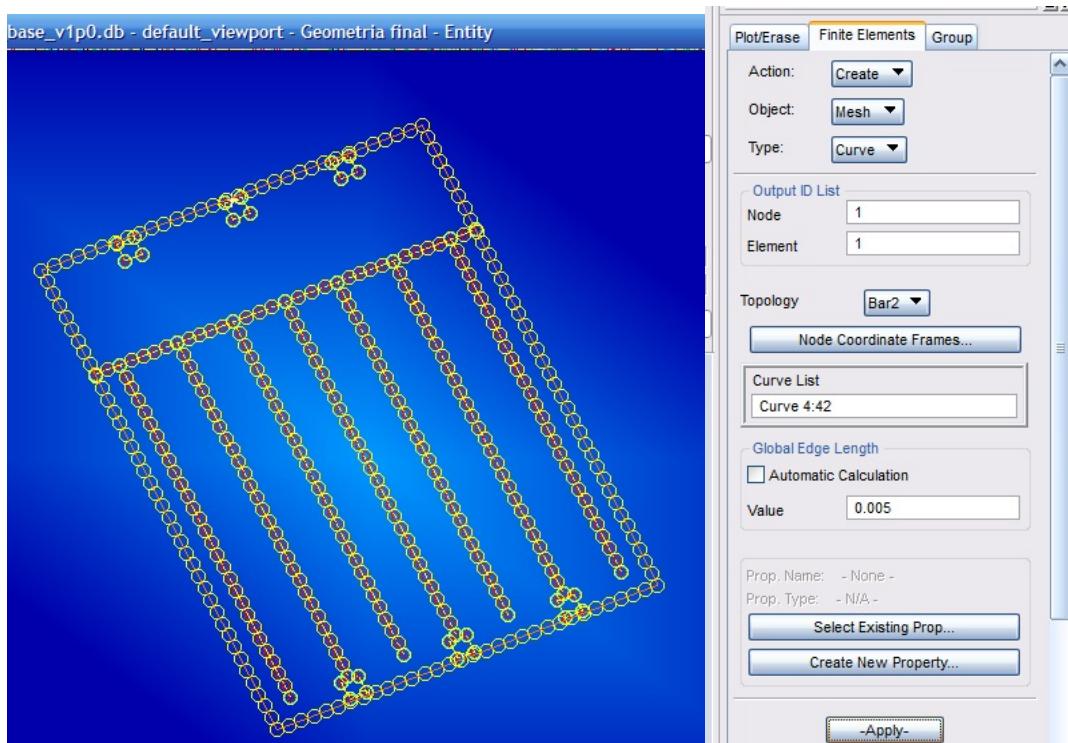


Figura 6-18: Creación del mallado 1D (elementos auxiliares que deben ser eliminados al finalizar el modelo)

El siguiente paso es realizar un mallado 2D sobre la superficie regular. Es recomendable realizar un mallado regular (IsoMesh) siempre que se pueda, como en este caso. La malla creada es

provisional, ya que como se puede apreciar en la Figura 6-19, los nodos de esta malla no coinciden con los nodos de las curvas interiores (y por tanto no hay continuidad estructural).

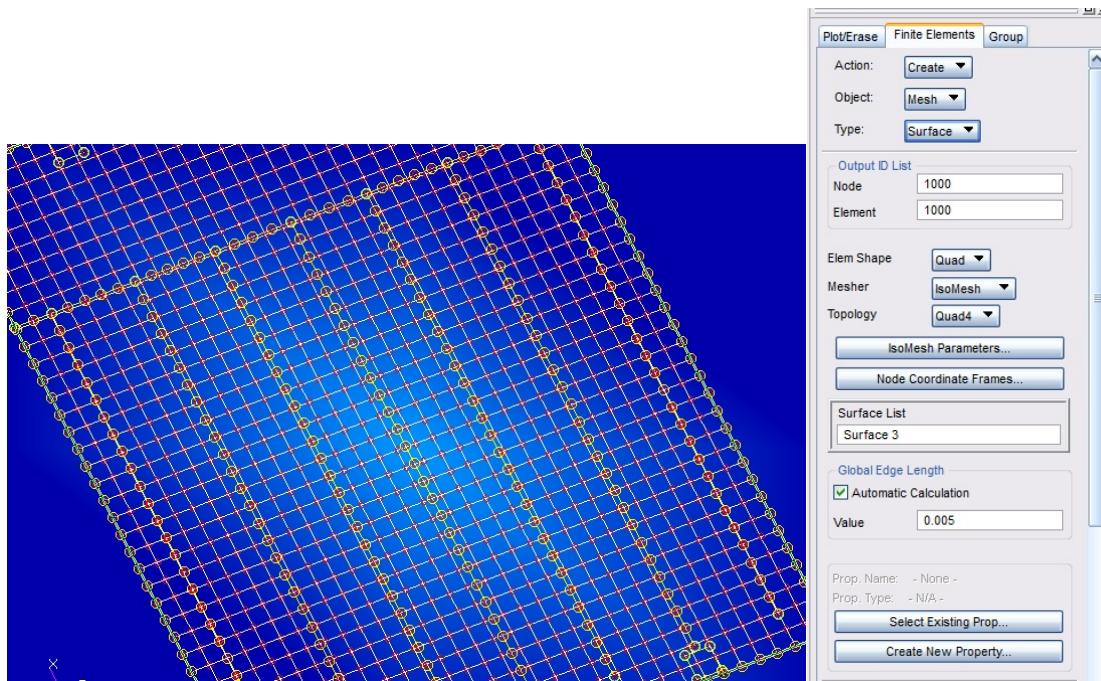


Figura 6-19: Creación del mallado regular 2D provisional sobre la superficie

Para facilitar la selección de nodos y elementos, es recomendable crear grupos. En este caso, se van a crear grupos que clasifican los elementos (y sus nodos correspondientes) según la topología (1D o 2D).

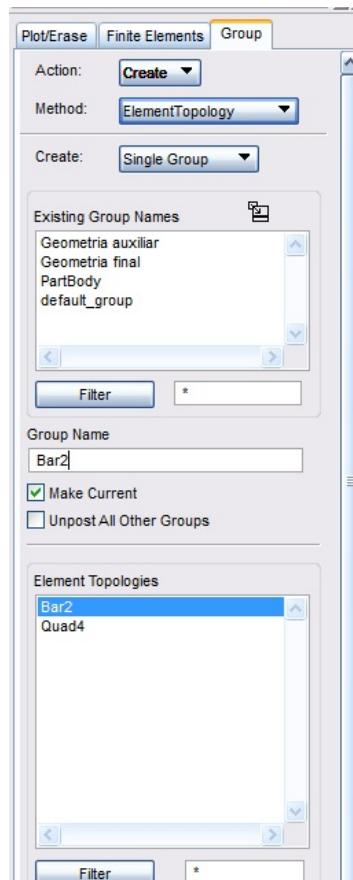


Figura 6-20: Creación de grupos que separen por topología de elementos

Para modificar la malla 2D previamente creada, se va a realizar una operación interesante que permite adaptar cualquier malla para que incorpore los nodos que el usuario decida incluir. **‘Meshing / Create / Mesh / On Mesh’**

El menú de esta operación permite seleccionar los nodos que se quieran incluir en la malla modificada a través de la pestaña “Feature Selection”. En este caso, es recomendable incluir todos los elementos 1D como “Hard Bars”.

Como se puede ver en la Figura 6-22, la nueva malla presenta un aspecto casi regular e incluye los nodos indicados. Con esta operación se debe tener cuidado, ya que el resultado puede no ser el deseado.

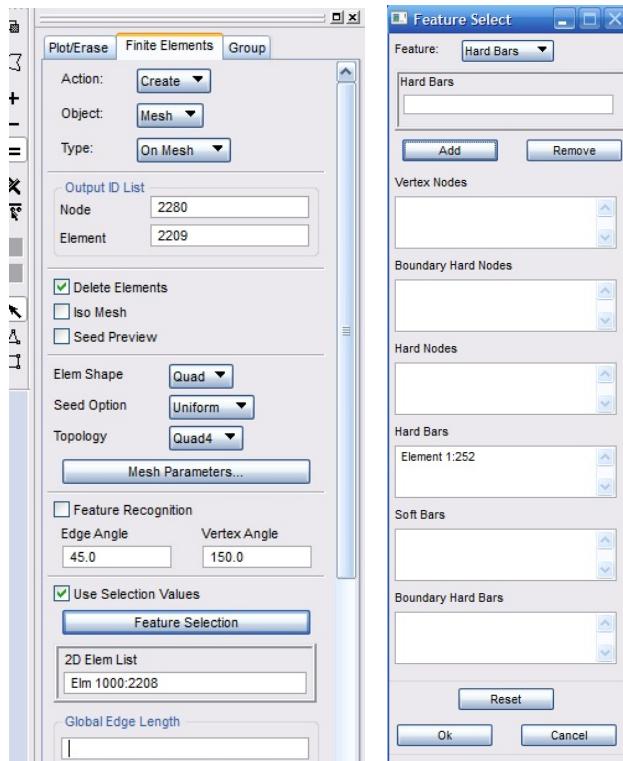


Figura 6-21: Modificación de la malla 2D para que coincida con las mallas 1D de las líneas internas

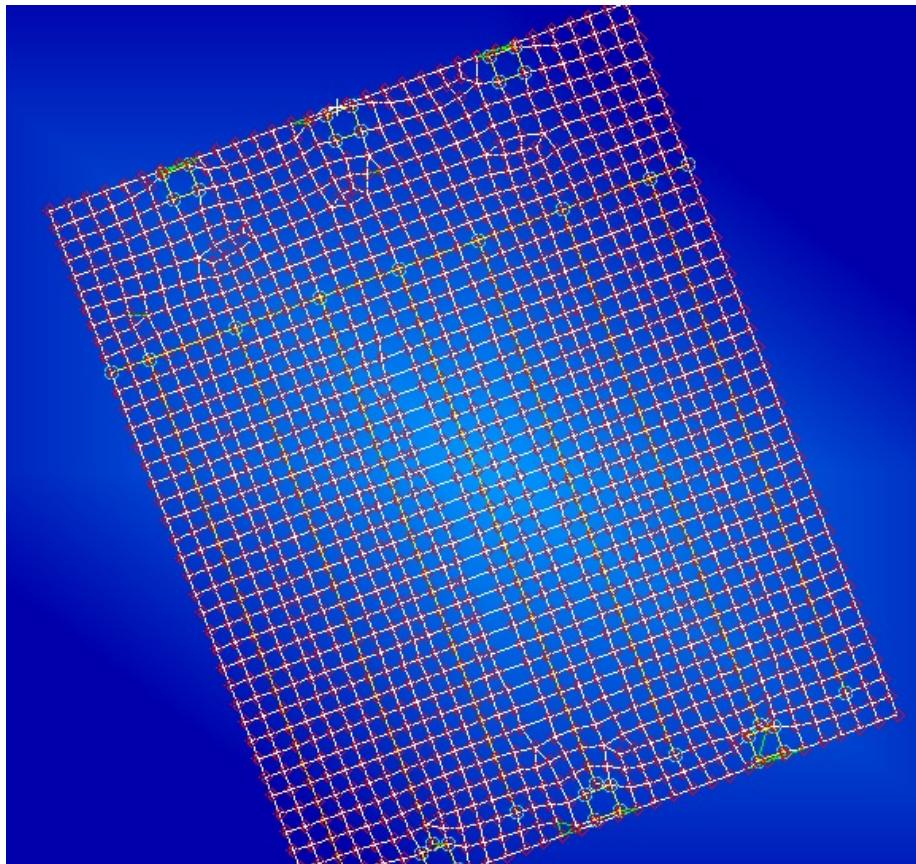


Figura 6-22: Malla 2D modificada

## 6.7 Operaciones de verificación y corrección del mallado 2D

Cuando se crea una malla, se debe comprobar rigurosamente que no presenta errores como discontinuidades o elementos erróneos. Se debe revisar encarecidamente la forma de los elementos QUAD y se suele corregir mediante la división por la diagonal.

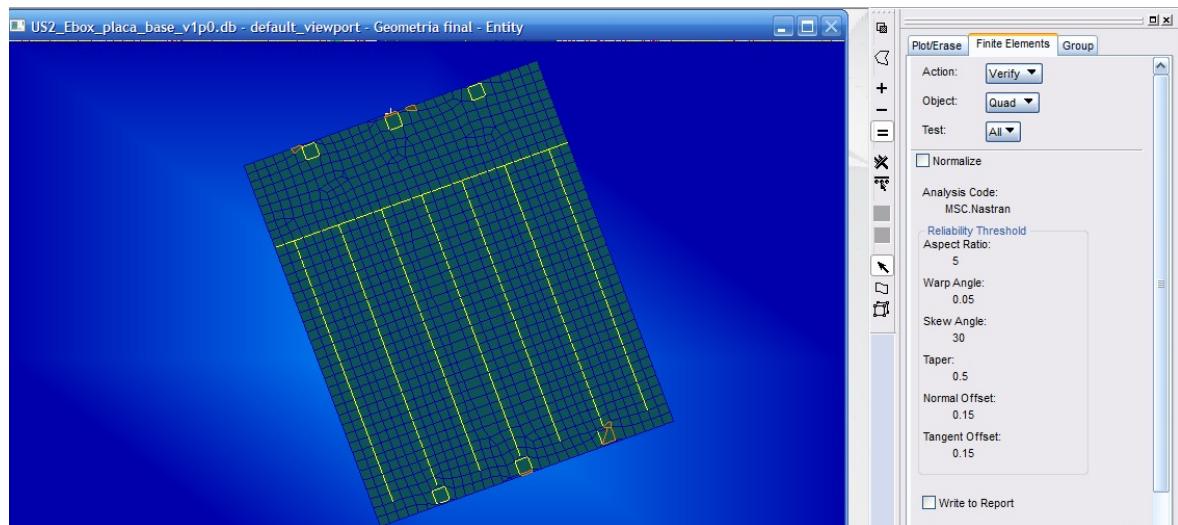


Figura 6-23: Verificar los elementos QUAD

Quad Verification Summary			
Test	Total Failed	Worst Case	At Element
Aspect	2	Max=6.0251584	3190
Warp	0	Max=0.	0
Skew	0	Min=47.131481	3472
Taper	4	Max=0.61866927	2210
Normal Offset	0	Max=0.	0

Figura 6-24: Resultados de la verificación con 6 elementos erróneos

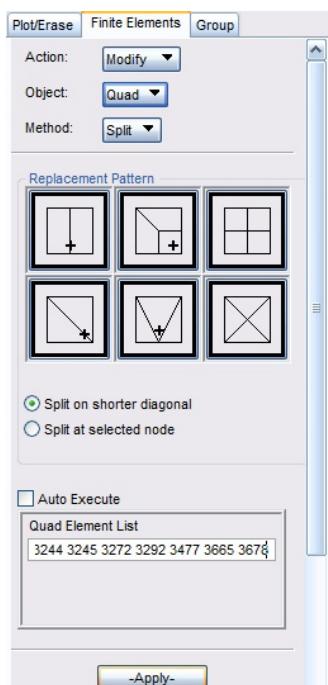


Figura 6-25: Modificación de los elementos QUAD erróneos mediante su división por la diagonal

Otra de las operaciones habituales es la equivalencia de nodos, para asegurarse de que no hay nodos coincidentes indeseables.

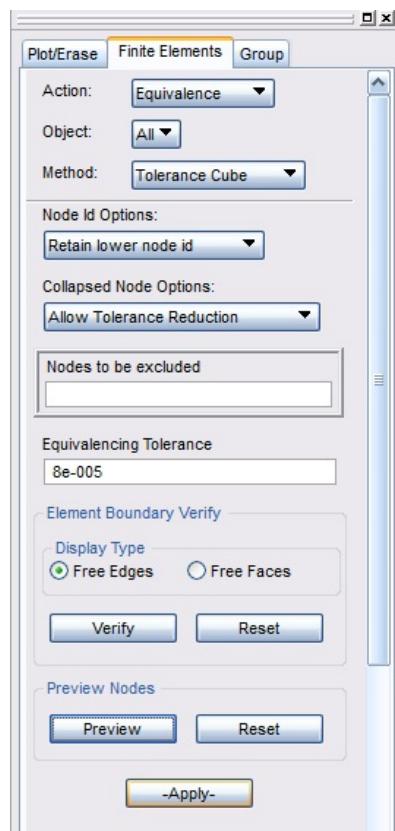


Figura 6-26: Equivalencia de nodos

Finalmente, se debe borrar los elementos auxiliares una vez finalizado su uso (se borran los elementos, pero no los nodos). En este modelo se mantienen los elementos 1D sobre las líneas de los rigidizadores, ya que los rigidizadores se representan precisamente con estos elementos 1D. Simplemente, hay que asignarles la propiedad 1D correspondiente.

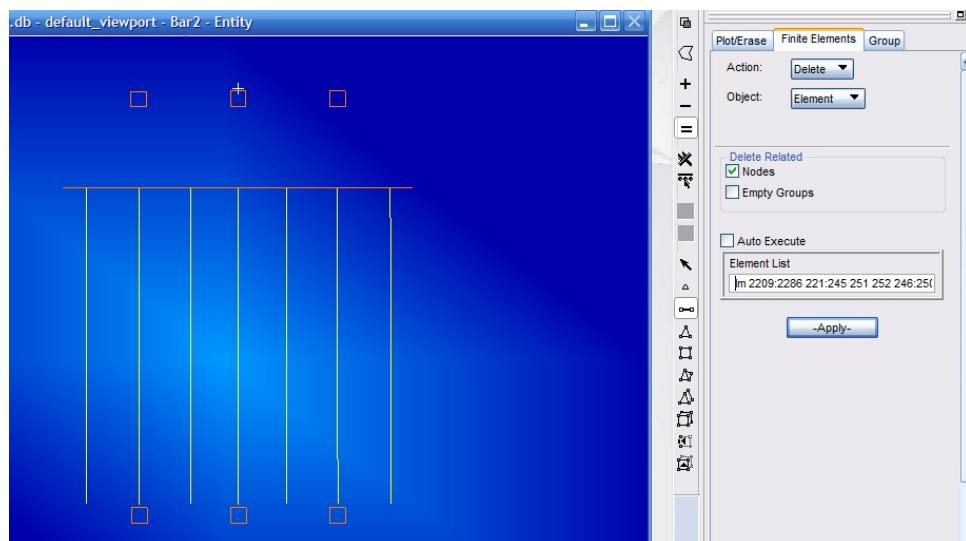


Figura 6-27: Borrado de los elementos 1D auxiliares

## 6.8 Creación de elementos 3D

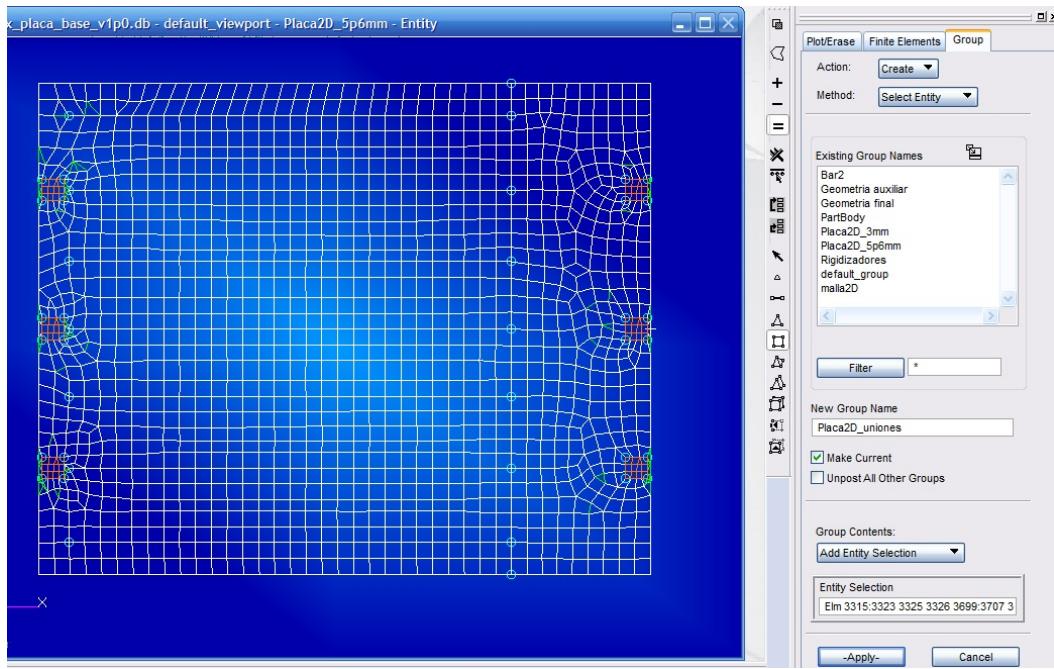


Figura 6-28: Malla 2D final

El último paso de la creación de elementos es generar los elementos 3D que representan zonas de unión. Son un total de 6 zonas cúbicas situados cerca de dos bordes de la placa. Para ello, se va a aprovechar los elementos 2D que se sirven como interfaz de estas zonas con la placa para crear los elementos 3D mediante extrusión.

‘Meshing / Sweep / Element / Extrude’

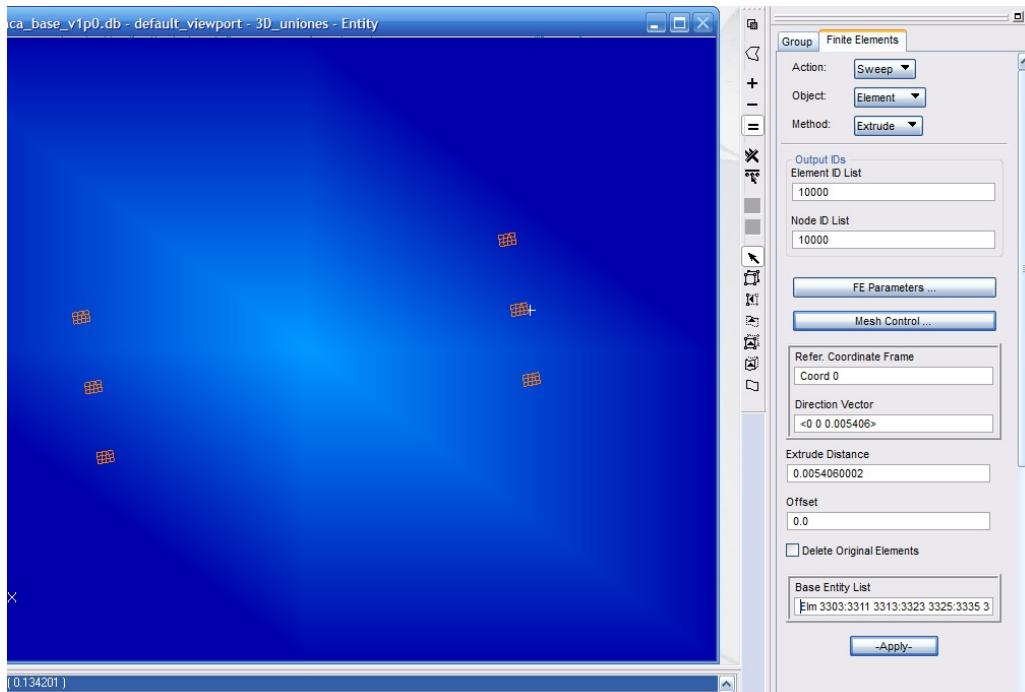


Figura 6-29: Creación de elementos 3D mediante extrusión de malla 2D (para los tacos de unión)

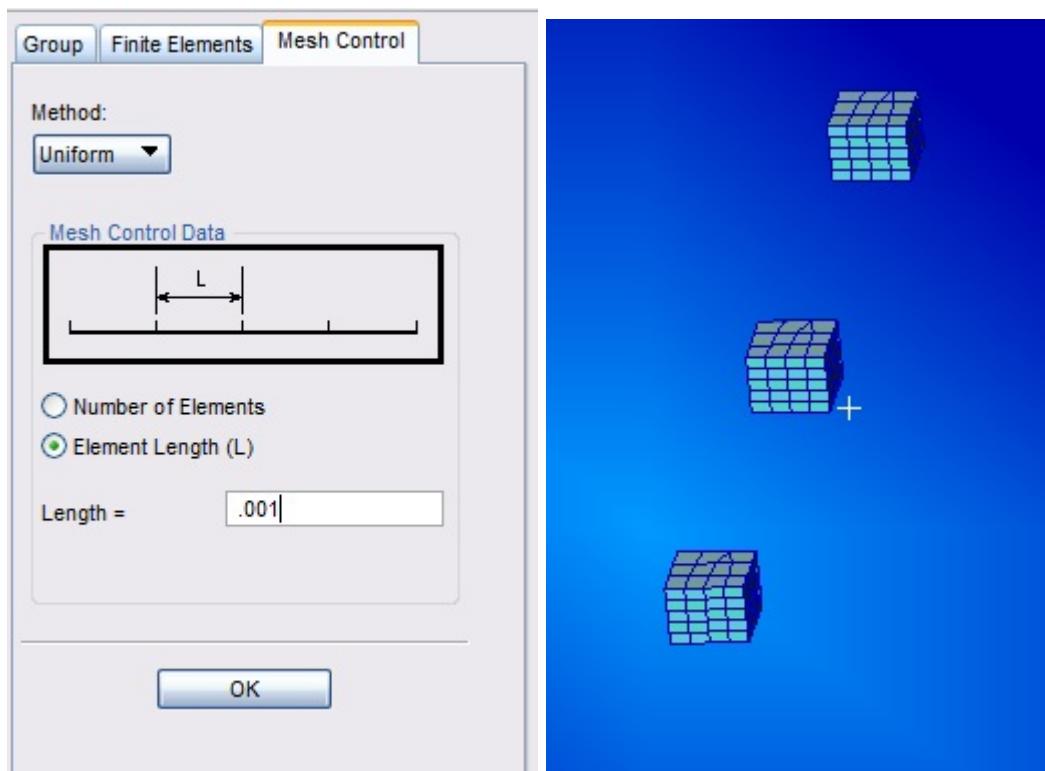


Figura 6-30: Elementos 3D creados

## 6.9 Operaciones de verificación final

Llegados a este punto, debido a que las operaciones de “Mesh On Mesh” y de extrusión crea elementos sin propiedad asignada, se debe modificar las propiedades creadas al principio para asignar a los elementos su propiedad correspondiente, seleccionándolos en la pestaña de “Select Application Region” dentro del comando de modificación de propiedades. Después siempre se recomienda utilizar las operaciones de visualización para asegurarse de que las propiedades hayan sido correctamente asignadas.

Se recomienda volver a realizar toda la secuencia de operaciones de verificación para asegurarse de que el modelo final está correcto y sin errores (ver Tabla 5-5). Una de las operaciones más importantes es la verificación del contorno libre de los elementos (ver Figura 6-31) para asegurarse de que la estructura está debidamente unida.

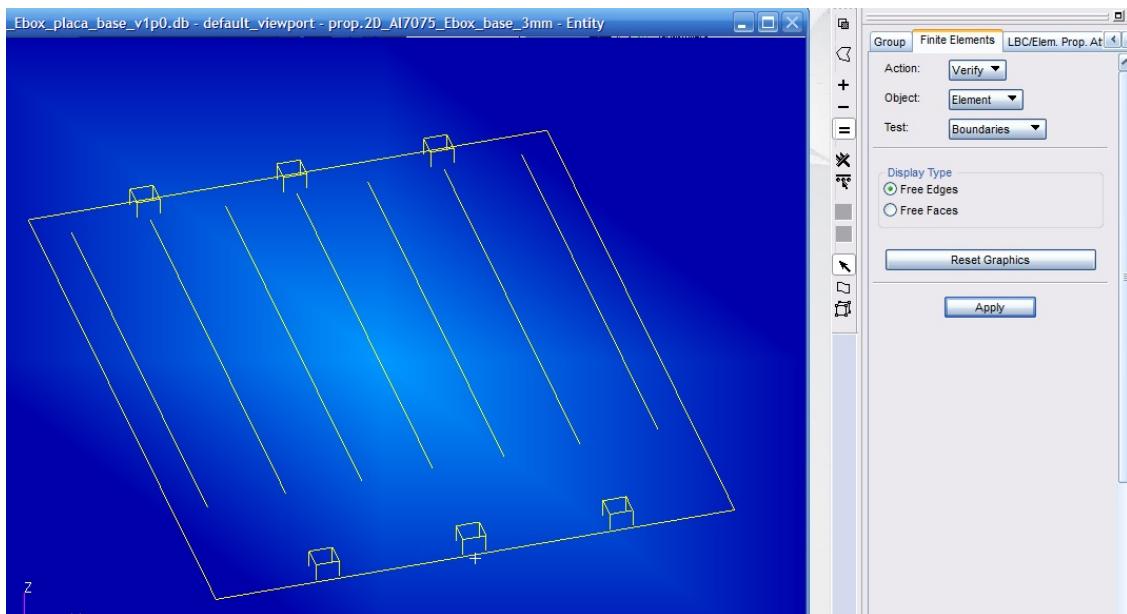


Figura 6-31: Verificación de contornos

## 6.10 Modelo final

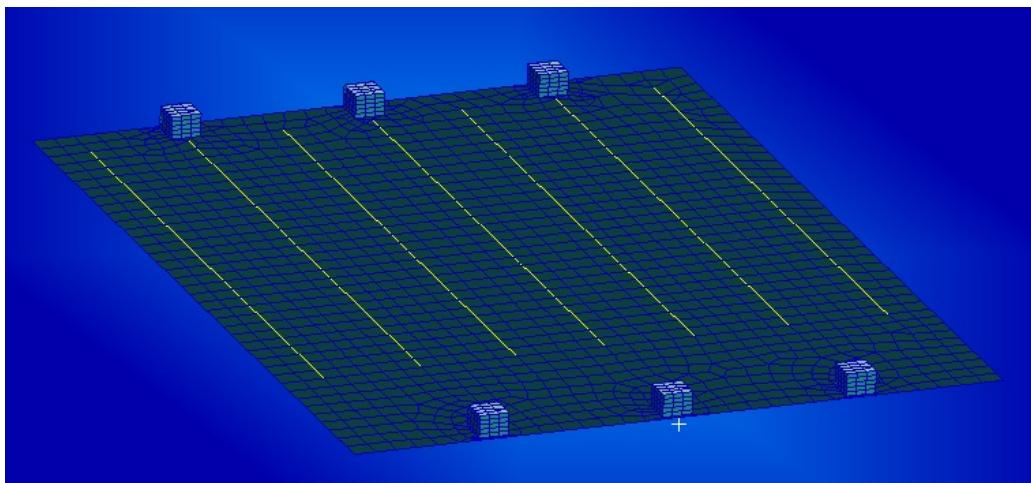


Figura 6-32: Modelo final esquemático de la placa inferior

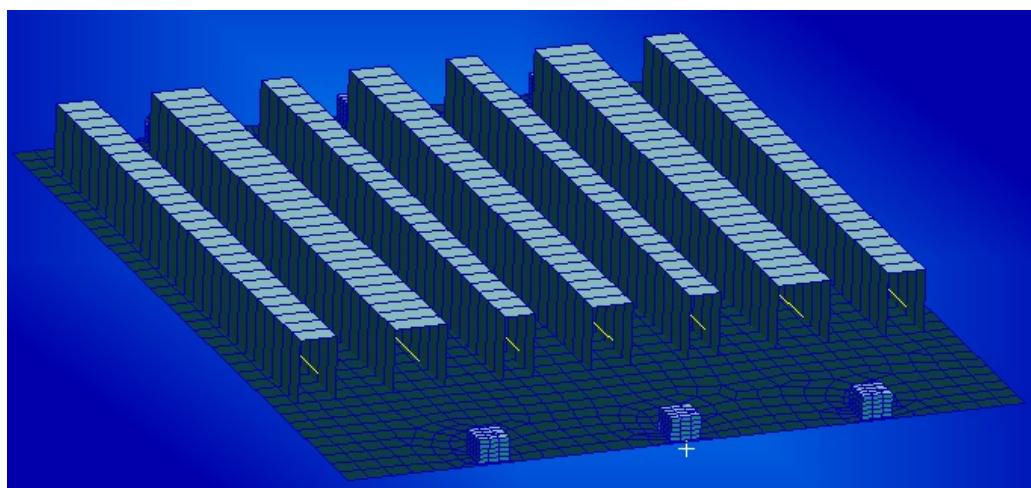


Figura 6-33: Modelo final con visualización 3D para los elementos BEAM

## 7 Ejemplo de modelización con la estrategia detallista - Placa lateral

### 7.1 Configuración de las preferencias del modelo

El primer paso siempre es configurar las preferencias del modelo. Hay que indicar que se va a construir un modelo para análisis estructural realizado con el programa MSC Nastran. Se debe poner el tamaño aproximado del modelo para que el programa determine automáticamente la tolerancia dimensional.

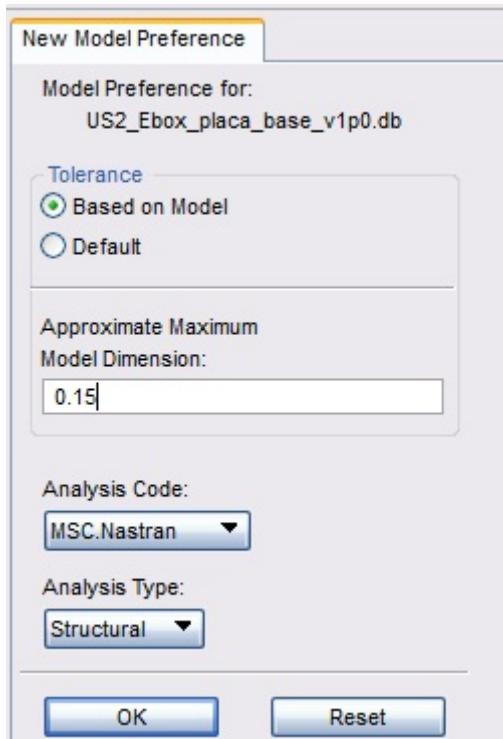


Figura 7-1: Configuración de las preferencias del modelo

### 7.2 Importar el modelo CAD (archivo step)

El siguiente paso es importar el modelo en el programa MSC Patran. En este caso, el modelo CAD fue construido con CATIA y se encuentra en formato STEP.

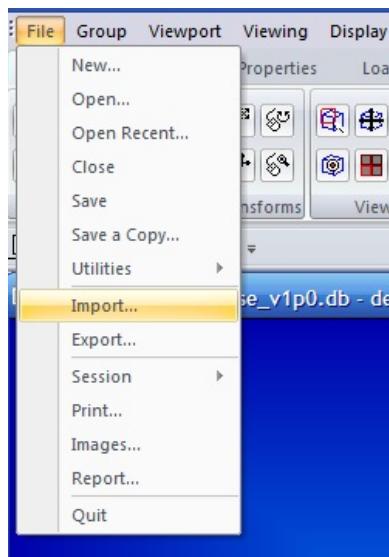


Figura 7-2: Importar un modelo CAD al programa MSC Patran

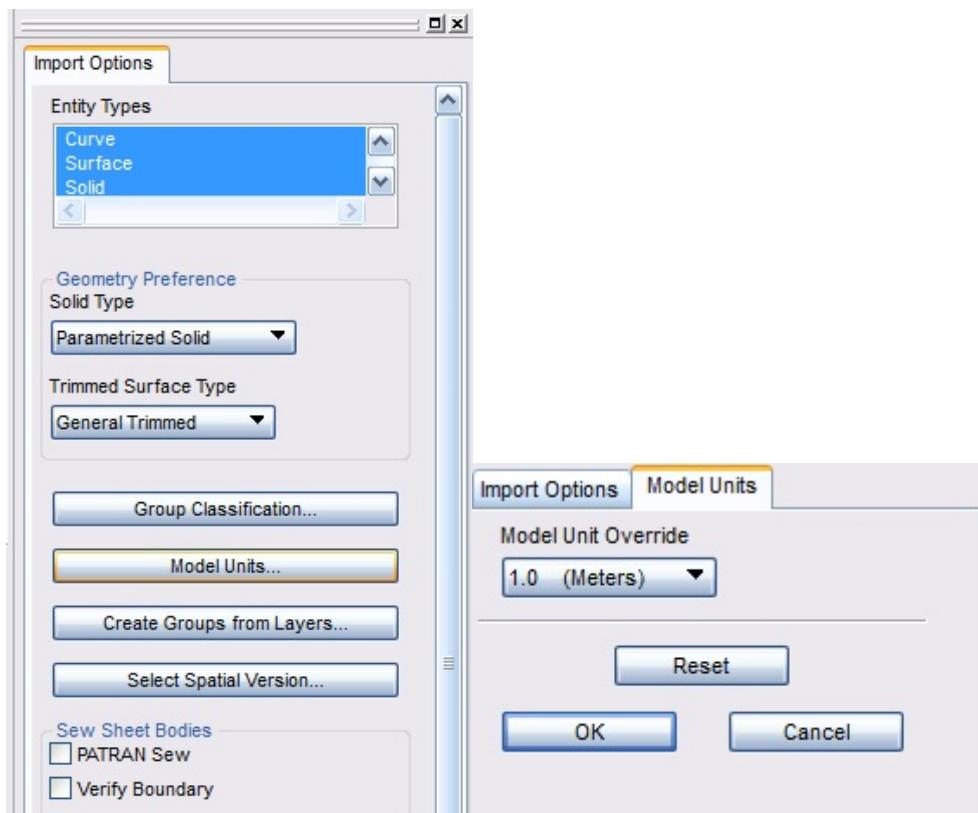


Figura 7-3: Especificación del sistema de unidades en la operación de importación

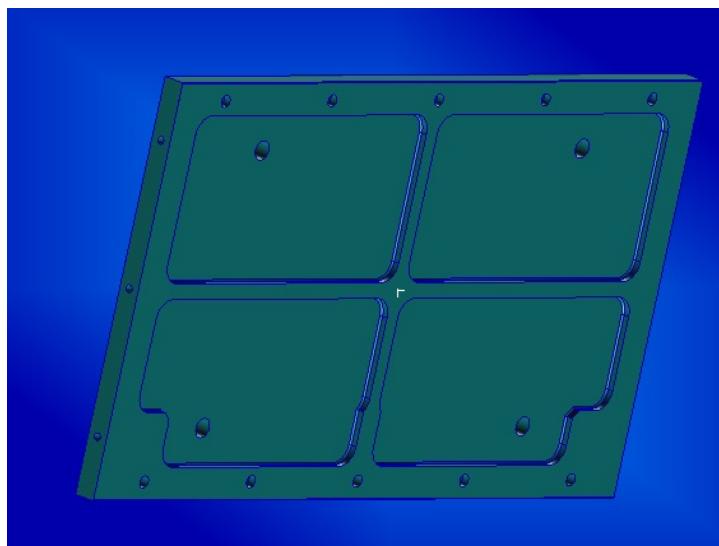


Figura 7-4: Placa lateral importada

### 7.3 Operaciones de creación de geometría

Con esta estrategia de modelización, la operación básica para crear la geometría final 2D a partir de la geometría importada es la creación de superficies mediante la extracción de determinadas caras del sólido original.

**‘Geometry / Create / Surface / Extract / Face’**

En este caso, se ha considerado extraer la cara que dibuja el contorno exterior y los rigidizadores centrales de la placa. Esta cara incluye los principales agujeros que sirven para alojar los elementos de unión (tornillos principalmente) y que son importantes modelizar porque suelen ser zonas de alta solicitud de esfuerzos.

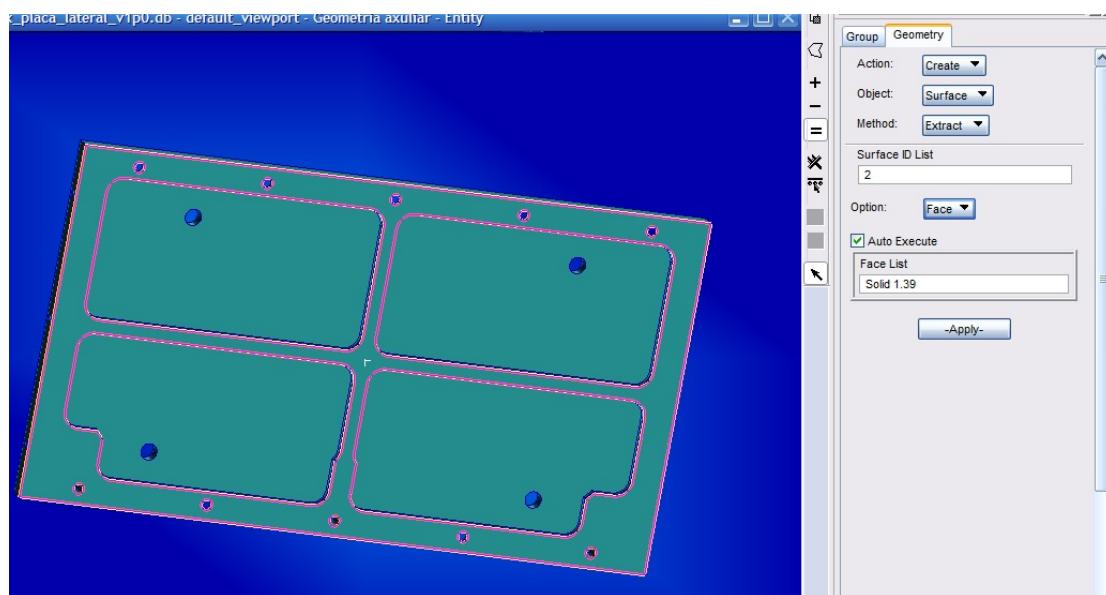


Figura 7-5: Creación de una superficie mediante la extracción de la cara de un sólido

Además, se va a extraer otros elementos de la geometría original como las curvas que representan los 4 agujeros centrales.

**‘Geometry / Create / Curve / Extract / Edge’**

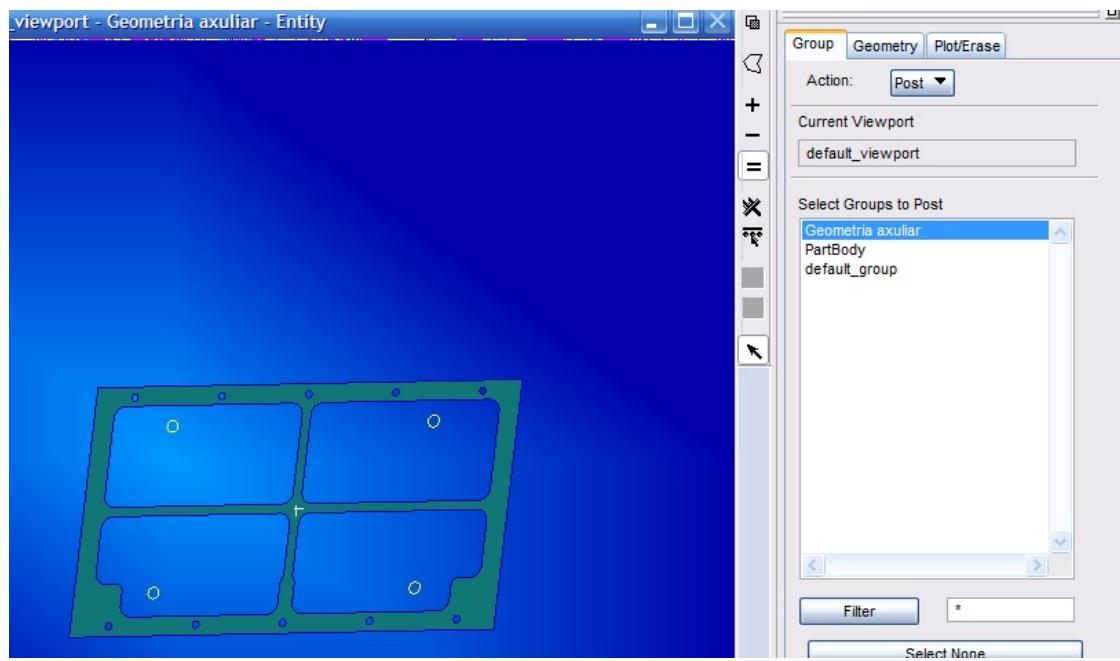


Figura 7-6: Superficie y curvas extraídas de la geometría importada

Llegados a este punto, la geometría importada no se va a usar más. A partir de aquí se va a crear las entidades geométricas restantes a partir de la geometría extraída (ver Figura 7-6).

Los siguientes pasos son:

- Crear las 4 superficies centrales a partir del contorno incluido en la superficie extraída.  
**‘Geometry / Create / Surface / Trimmed’**
- Proyectar las 4 circunferencias sobre cada superficie correspondiente.  
**‘Geometry / Create / Curve / Project’**
- Crear los agujeros correspondientes (ver Figura 7-7 y Figura 7-8) delimitados por las anteriores circunferencias.  
**‘Utilities / Geometry / Trimmed Surface Edit.../ Add Hole’**

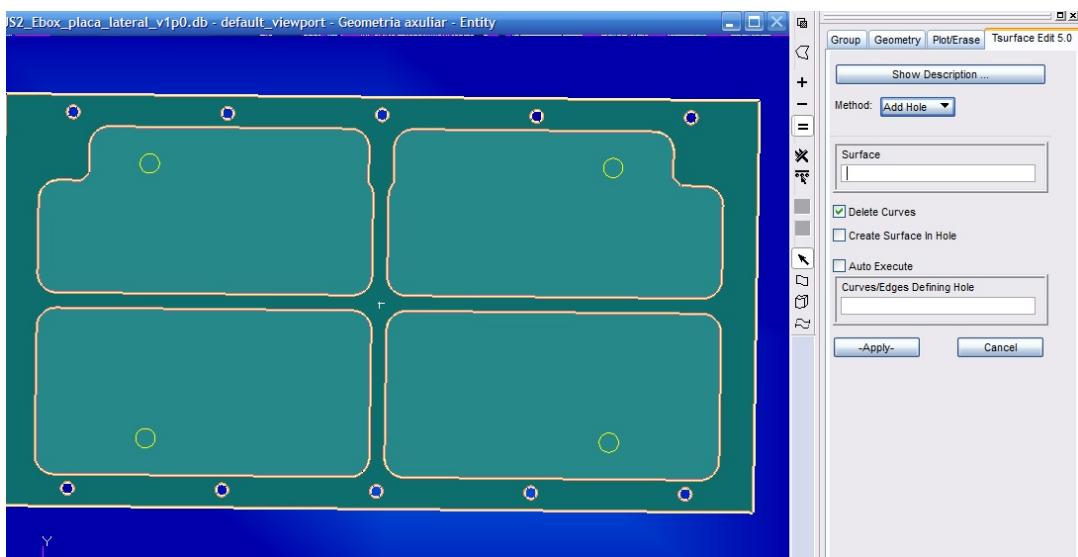
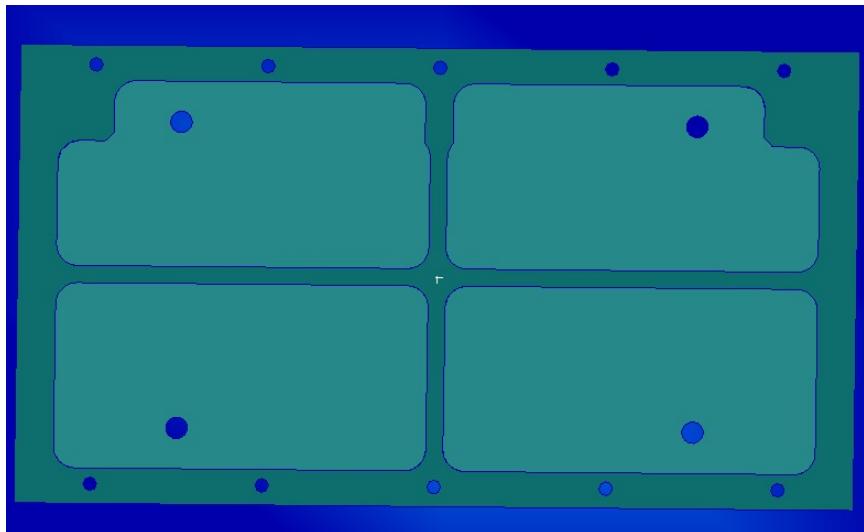


Figura 7-7: Creación de superficies interiores - proyección de circunferencias sobre las superficies y creación de agujeros



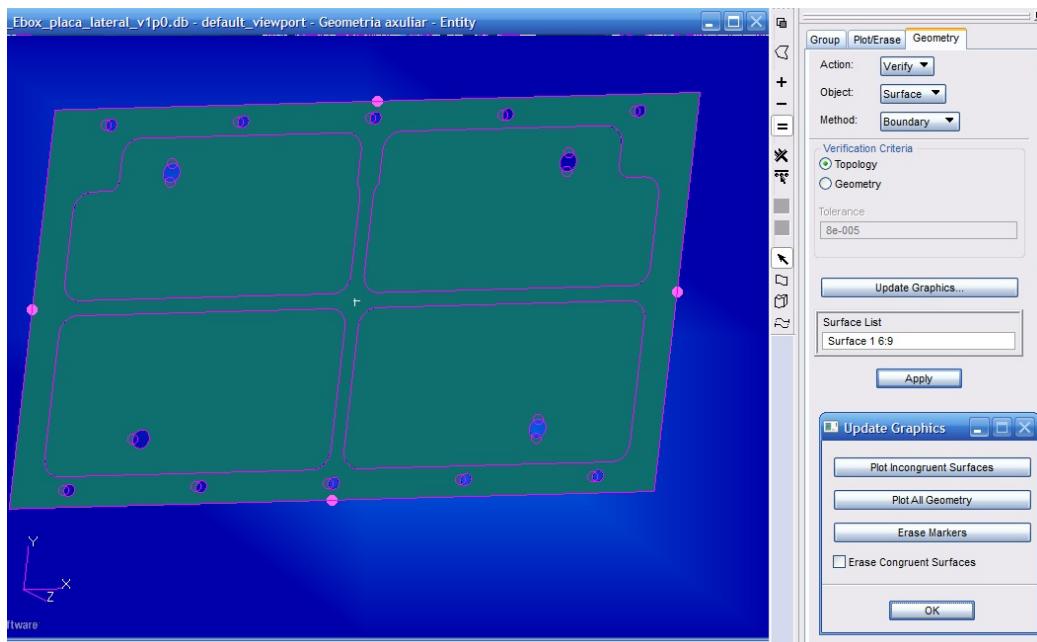
**Figura 7-8: Creación de agujeros finalizada**

Con estos sencillos pasos se acaba la creación de geometría que, como se puede observar en la Figura 7-8, consta de 5 superficies irregulares que incluyen todos los agujeros y presenta bordes redondeados. Esto impide que el mallado que se hará después sea regular. Pero como ventaja, la geometría es una representación más fiel de la realidad y se ha construido en menor tiempo.

## 7.4 Operaciones de verificación de geometría

Una vez finalizada la geometría, se debe verificar que está correctamente editada antes de comenzar con el proceso de mallado.

La verificación del contorno de superficies tiene como objetivo visualizar si las superficies están debidamente unidas y no presenta discontinuidades entre ellas. En este caso, se debe comprobar que las líneas que separan las superficies interiores de la exterior no presentan círculos ni circunferencias.



**Figura 7-9: Verificación del contorno de superficies**

La verificación de las direcciones normales tiene como objetivo comprobar si la dirección normal de las superficies coplanares apunta a la misma dirección. En este caso, una de las

superficies apunta en la dirección contraria y, por tanto, debe ser corregida (ver Figura 7-10, Figura 7-11 y Figura 7-12).

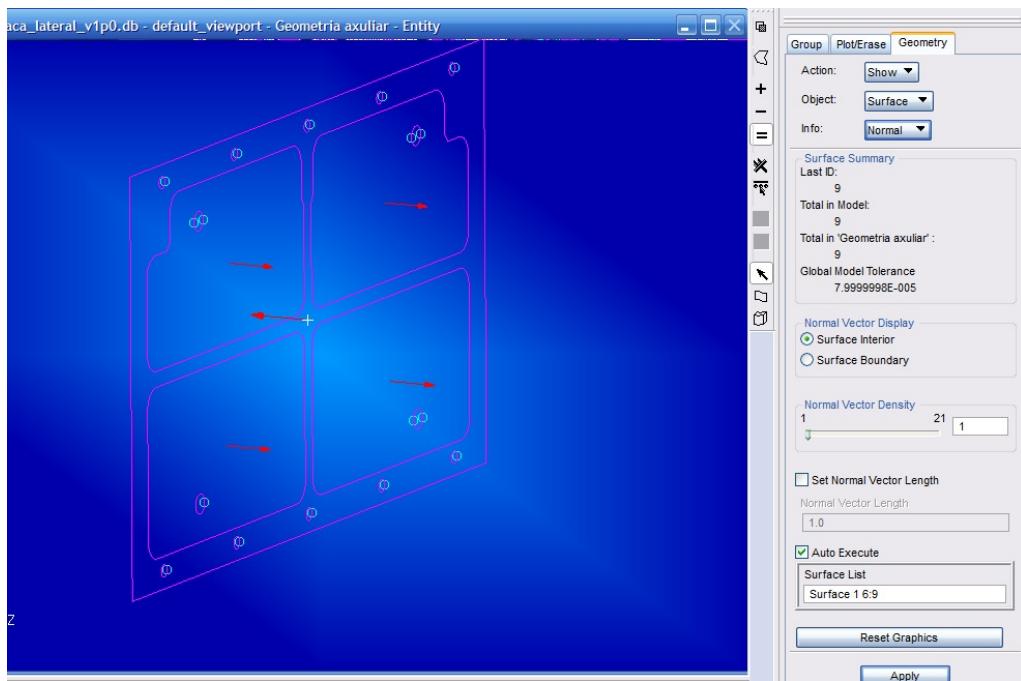


Figura 7-10: Verificación de las direcciones normales a las superficies

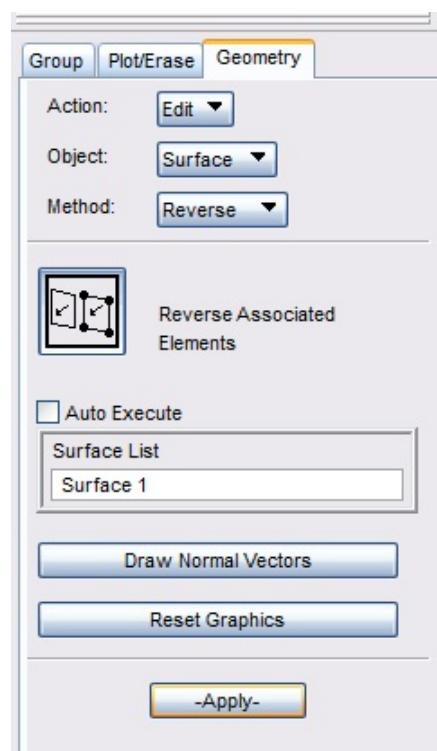


Figura 7-11: Corrección de las direcciones normales

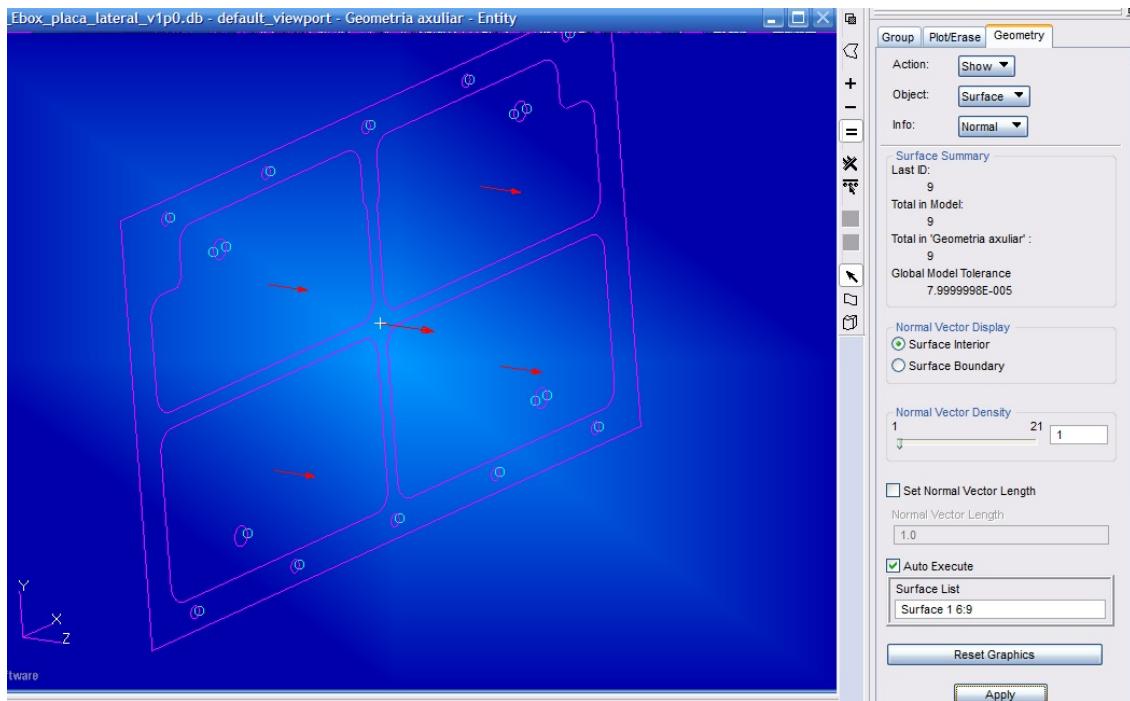


Figura 7-12: Direcciones normales corregidas

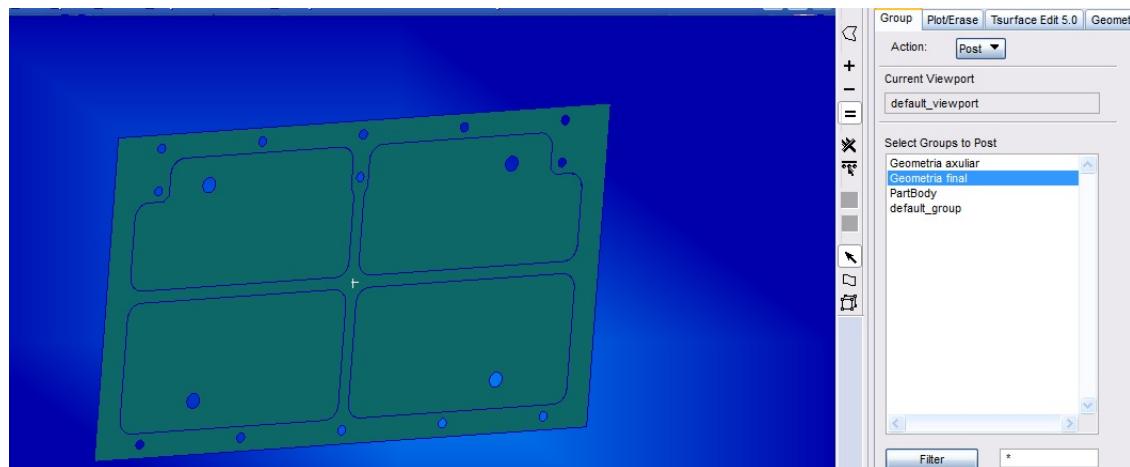


Figura 7-13: Geometría final verificada y corregida

## 7.5 Creación de materiales y propiedades

Una vez finalizada y verificada la geometría, el siguiente paso es crear los materiales y las propiedades que va a tener el modelo. Para este caso, todo el modelo presenta el mismo material y se van a crear dos propiedades 2D con los espesores correspondientes.

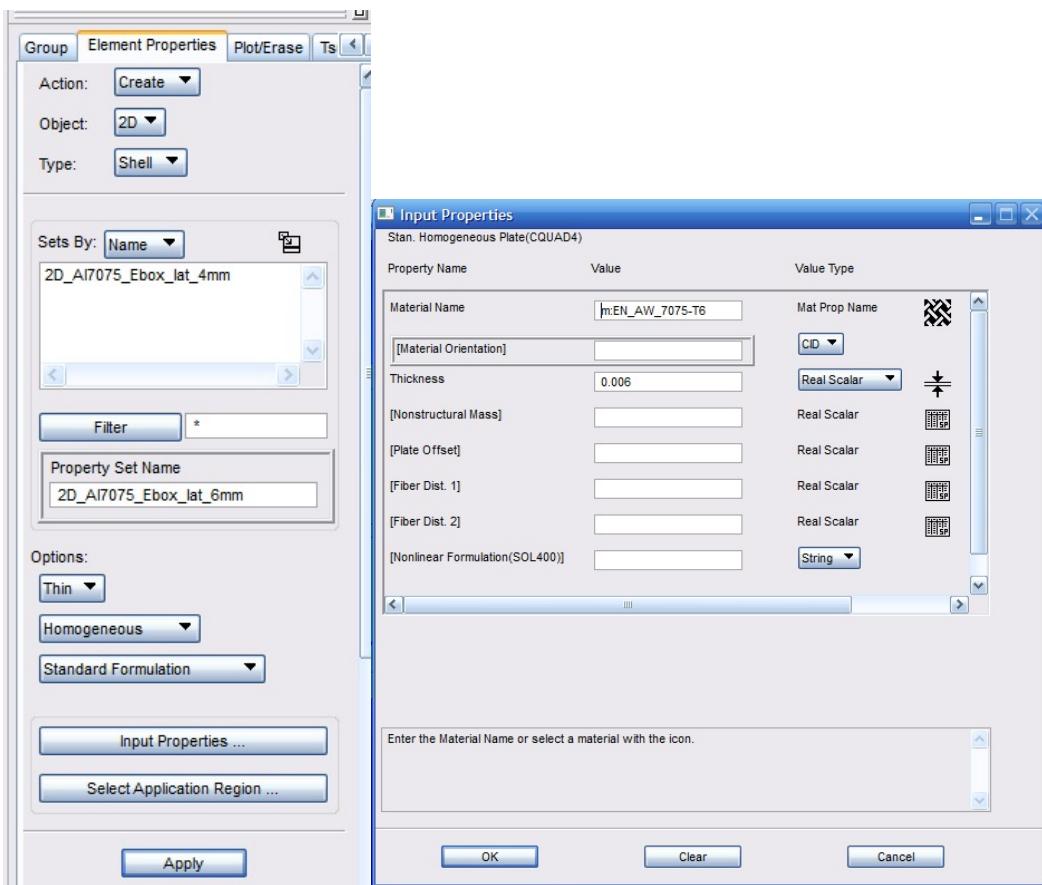


Figura 7-14: Creación de propiedades 2D

## 7.6 Creación del mallado

El primer paso para la creación de los elementos, es indicar el tamaño medio de estos o la cantidad que se va a crear. Para ello, se debe crear la semilla de malla o la premalla sobre las principales curvas del modelo. Para este modelo, la manera más sencilla es indicar el tamaño medio y seleccionar todo el conjunto de curvas implicadas. En este caso, sobre las curvas principales los elementos tienen un tamaño medio de 0.005 m, mientras que cerca de los agujeros conviene que los elementos sean más pequeños (0.001 m), ya que definen mejor el contorno del agujero y porque conviene tener un mallado más fino en zonas de altos gradientes de esfuerzos.

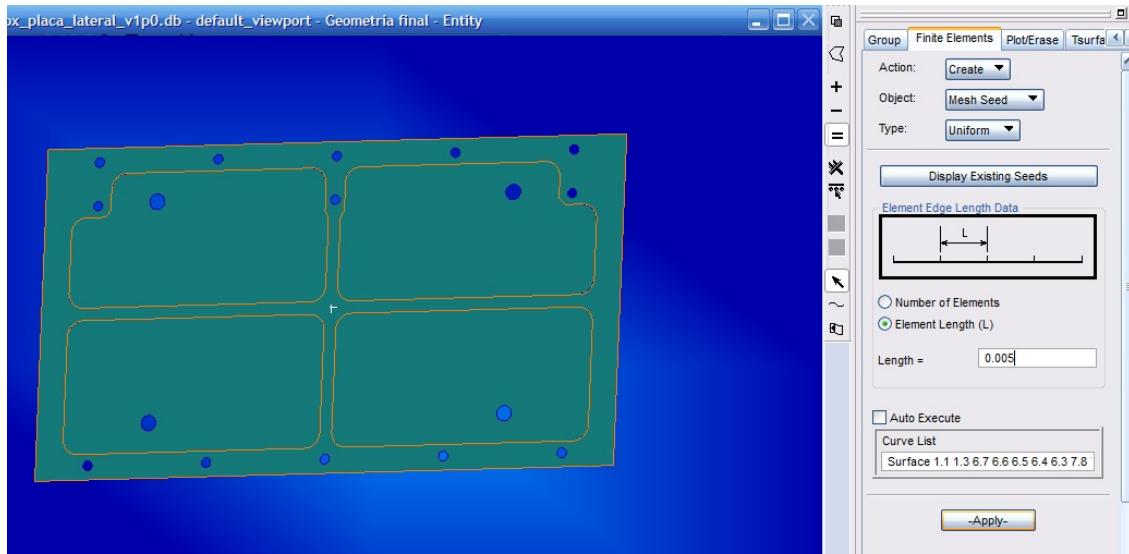


Figura 7-15: Creación de la semilla de malla o premalla

El siguiente paso es crear la malla 2D sobre las superficies. Debido a que son irregulares, las dos únicas opciones son realizar un mallado irregular (Paver) o un mallado semirregular (Hybrid). Hay que mallar las superficies asignando la propiedad 2D correspondiente en la casilla “Select Existing Prop...”.

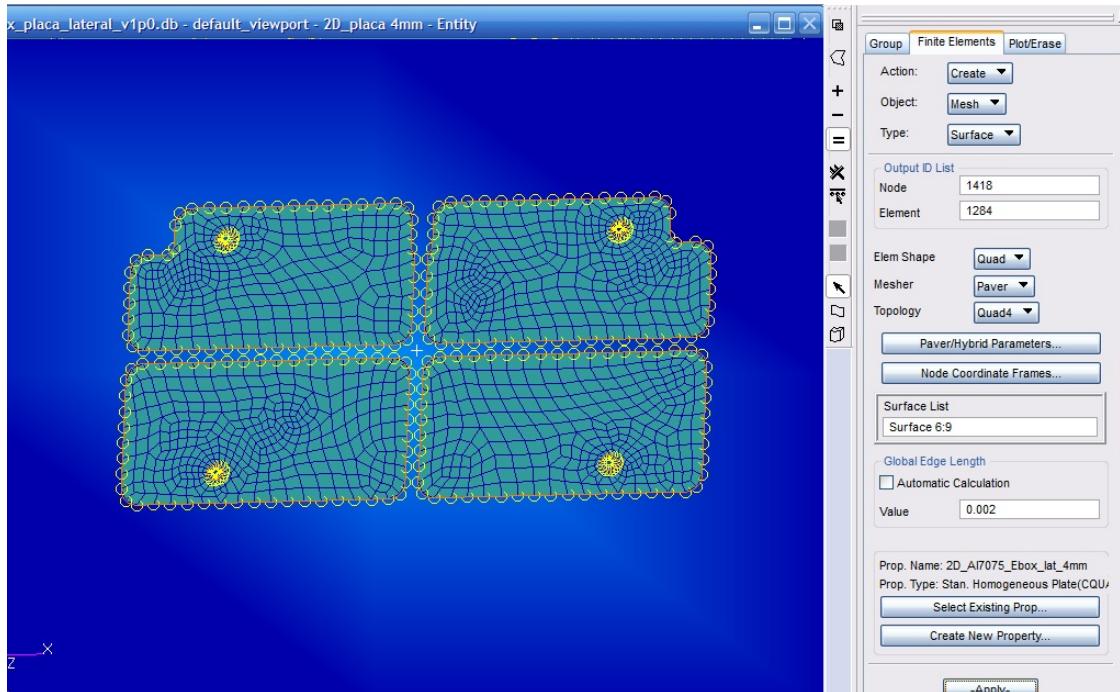


Figura 7-16: Creación de malla 2D

## 7.7 Operaciones de verificación del mallado y de los elementos

Cada vez que se realiza un mallado, conviene comprobar si presenta fallos como elementos erróneos o discontinuidades.

En este caso se encontraron 4 elementos QUAD que no superaron los test y que fueron corregidos por la manera habitual (división por la diagonal).

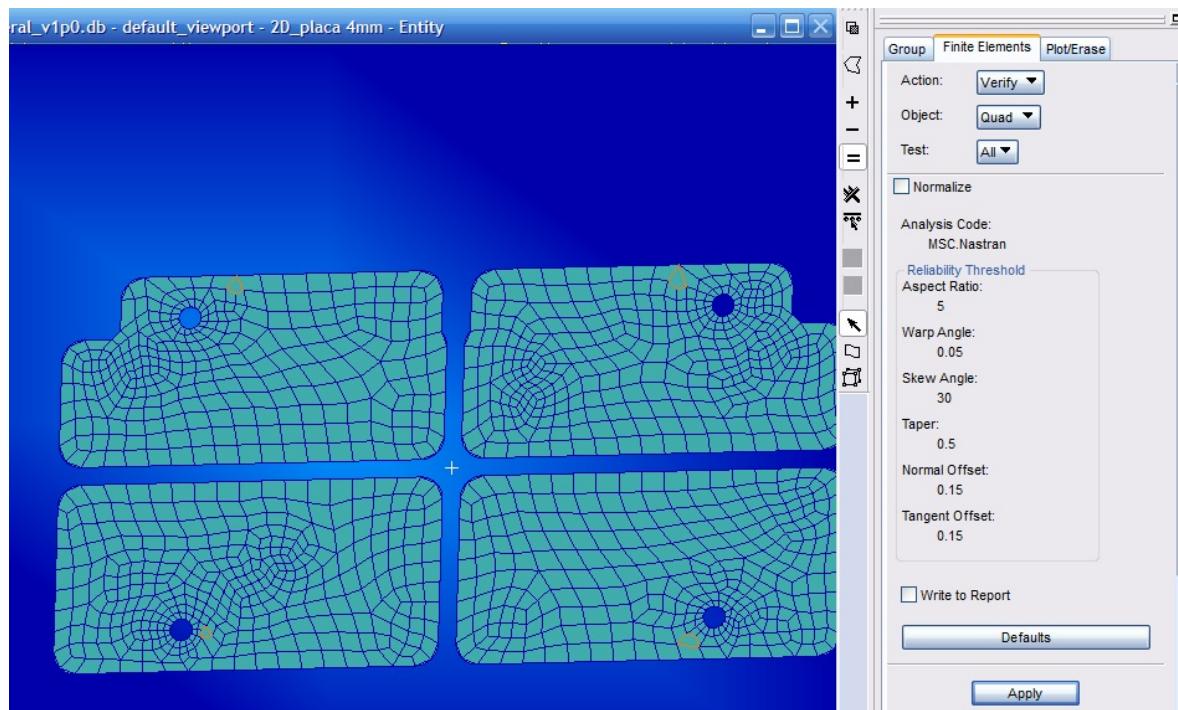


Figura 7-17: Verificación del mallado - Elementos QUAD

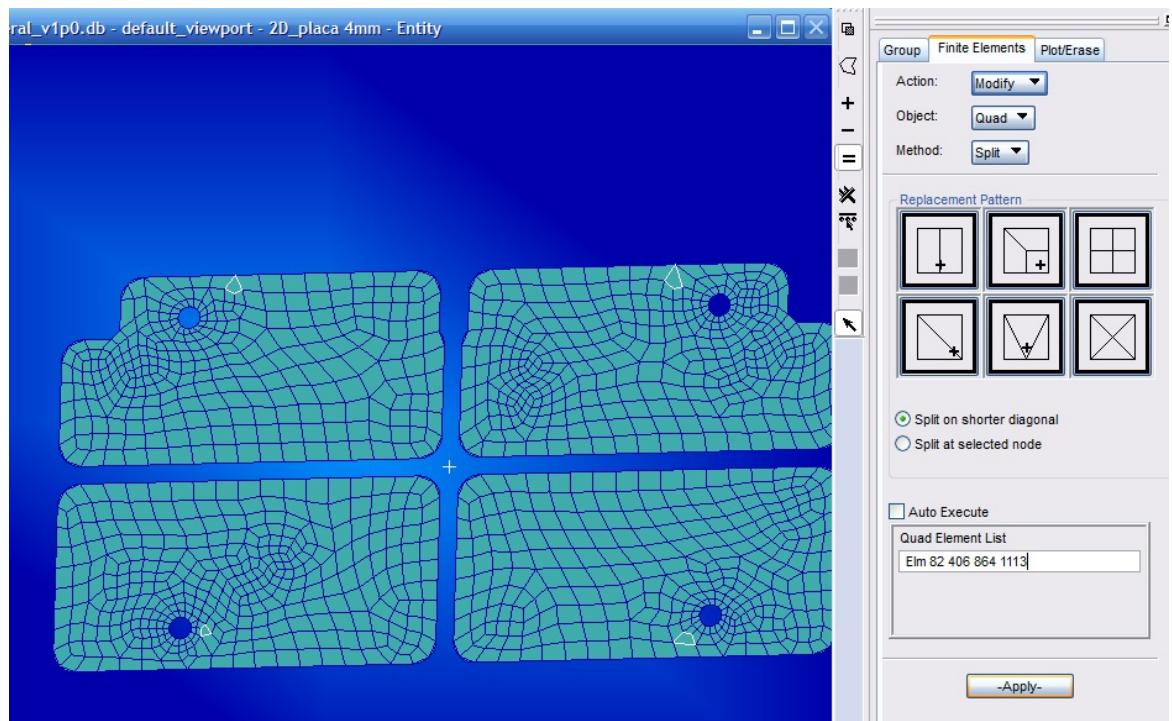


Figura 7-18: Corrección de elementos erróneos

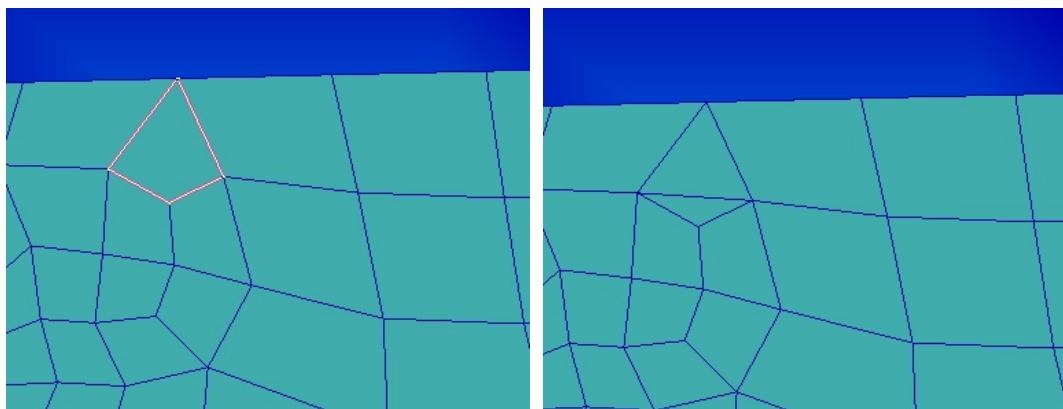


Figura 7-19: Elemento erróneo antes y después de la corrección

Cuando se haya hecho todos los mallados, conviene revisar que no haya discontinuidades entre superficies adyacentes. Para ello, se debe verificar el contorno y visualizar que los únicos contornos libres sean los agujeros y el borde exterior (ver Figura 7-20). En caso de que haya bordes libres indeseados, se debe revisar localmente el origen de la discontinuidad.

Generalmente se suelen corregir con equivalencia de nodos, pero hay que revisarlo caso por caso.

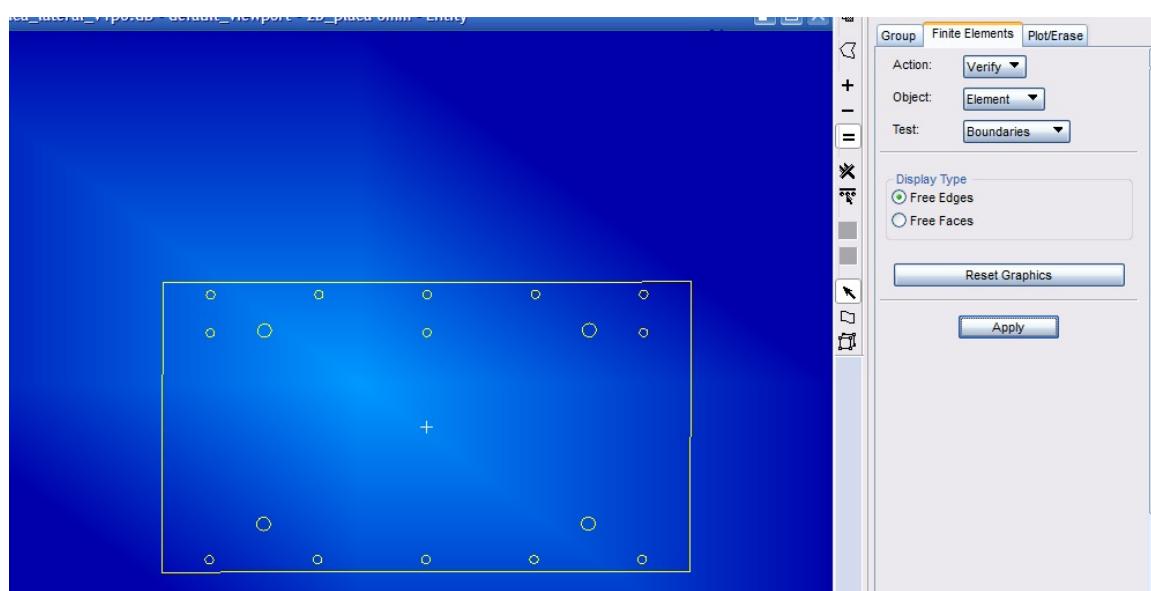


Figura 7-20: Verificación de contornos de los elementos

Otras verificaciones usuales son la visualización de las direcciones normales de los elementos (si se ha verificado correctamente las direcciones normales de las superficies asociadas, esta verificación debe mostrar que todos los elementos están correctos) y visualización de los espesores.

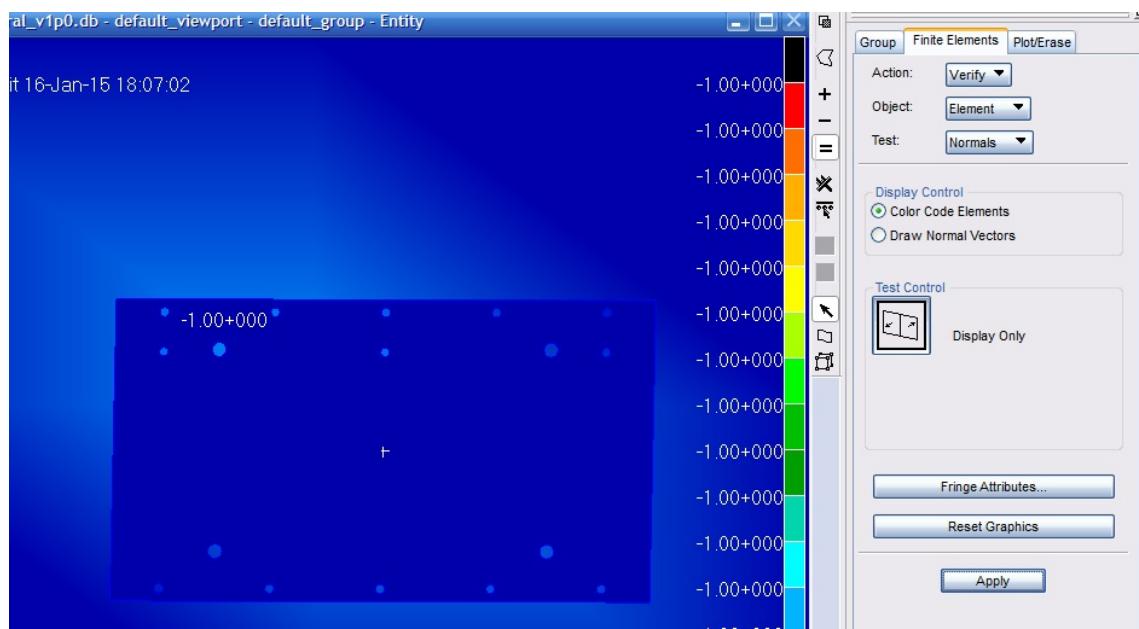


Figura 7-21: Verificación de las direcciones normales de los elementos

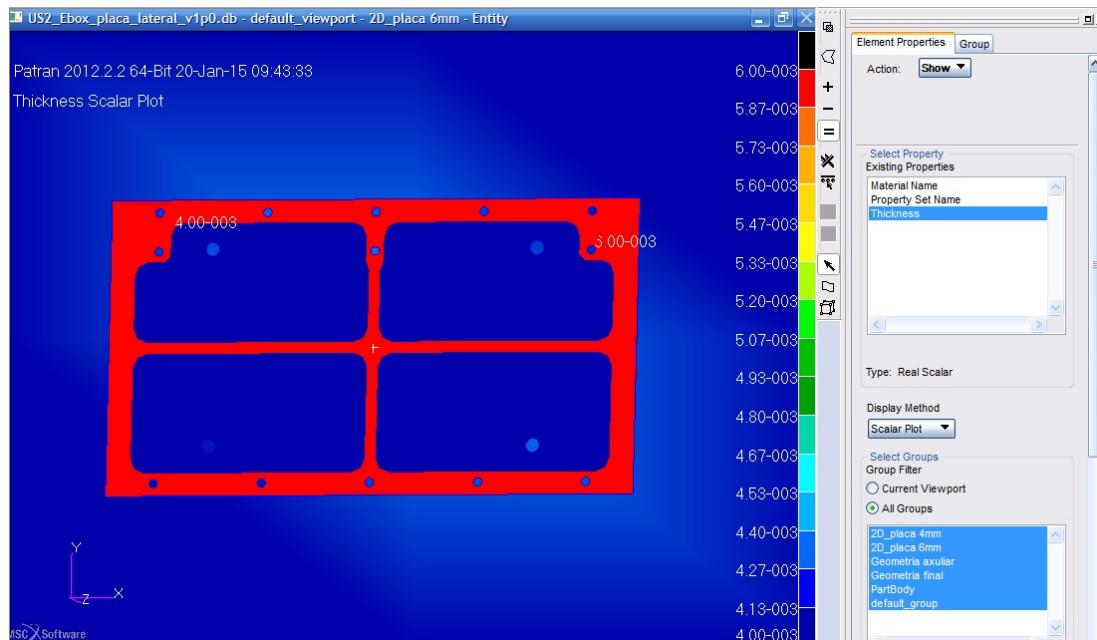


Figura 7-22: Visualización de espesores

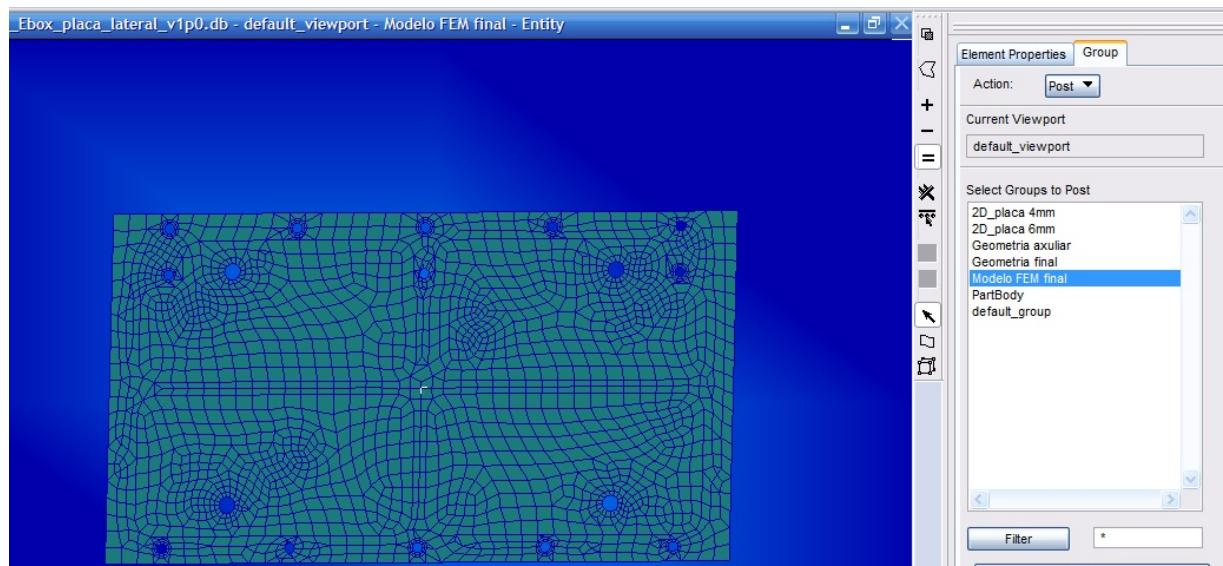
Una vez realizadas todas las verificaciones, el siguiente paso es renombrar los nodos y elementos según el rango de numeración asignado. Esto es conveniente hacerlo cuando hay seguridad de que no hace falta añadir o corregir elementos y el modelo FEM esté completamente verificado.



**Figura 7-23:** Renumeración de los nodos y elementos por zonas

Con esto finalizada la creación del modelo FEM de esta pieza.

## 7.8 Modelo final



**Figura 7-24:** Modelo FEM final de la placa lateral