

ANEXO: MODELO DE EF DEL CONJUNTO COMPLETO.

A.1.- INTRODUCCIÓN.

Este anexo tiene por objetivo explicar las incidencias derivadas del proceso de elaboración del modelo de EF del conjunto completo montado. Mediante este modelo se pretendían simular el resto de ensayos de vibración experimentales realizados en el INTA y referidos en el capítulo 5. No obstante, un error desconocido producido durante el proceso de mallado de la cama y que impedía que unos pocos sólidos fuesen mallados, impidió que éste fuera completado. En adelante se profundiza en el proceso de génesis del modelo así como los problemas que surgieron durante la misma y las soluciones consideradas en la creencia de que podría ser utilizado como base para futuras líneas de actuación.

A.2.- PARTES CONSTITUTIVAS DEL MODELO DEL CONJUNTO.

En el capítulo 2, se realizó una descripción del software utilizado en la creación de los modelos así como una breve mención acerca de los modelos de EF en general, su constitución, sus características, etc. De allí se extrae que un modelo se forma a partir de la definición de una geometría, un mallado (constituido por elementos) y el establecimiento de las condiciones de contorno y cargas, de forma que el conjunto recree de la forma más adecuada posible (que no la más fidedigna) la situación real objeto de estudio.

En este apartado se pretenden analizar cada una de las partes del modelo del conjunto y su relación con las distintas piezas que lo componen.

A.2.1.- Geometría.

A) CAMA.

Aunque el objetivo del ensayo sea analizar el comportamiento de la toma de aire AGU – NACA, que forma parte del avión comercial AIRBUS 380, ante una excitación vibratoria producida por el movimiento aleatorio de la base (ensayo RANDOM), en la introducción trató de dejarse patente que no era posible la

fijación directa de la pieza de material compuesto a la mesa encargada de la distribución homogénea de la excitación inducida en el *vibrador electrodinámico* o *excitador*, dada la heterogénea curvatura que presentaba la superficie inferior de la pieza.

Ante esta situación se diseñó el elemento denominado **cama** en el primer capítulo, el cual introducía una transición suave entre la superficie inferior de la toma AGU – NACA y la superficie superior de la mesa de vibración.

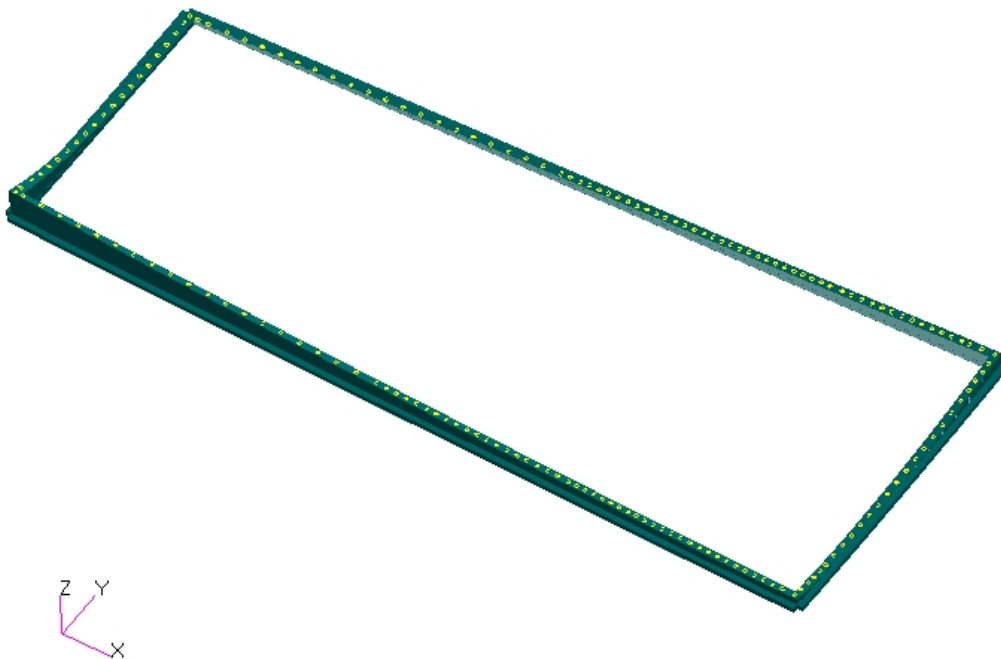


Fig. A.2.1.1.- Geometría de la cama generada para la construcción del modelo.

Para la consecución de dicha geometría se partió de la superficie inferior de la toma AGU – NACA, la cual fue recortada para conseguir la anchura de borde suficiente para la ubicación de los taladros (a lo largo de esa línea se dispondrían los tornillos que fijarían la toma AGU – NACA al elemento en construcción). Las **Fig. A.2.1.2** y **Fig. A.2.1.3** tratan de mostrar secuencialmente el proceso que se acaba de describir:

A continuación se realizó una *extrusión* (de cuantía superior a la mayor diferencia de alturas en la superficie) *en dirección z* y, acto seguido, se

procedió a cortar los sólidos obtenidos a una cota algo inferior a la del punto de menor cota (ver **Fig. A.2.1.4**).

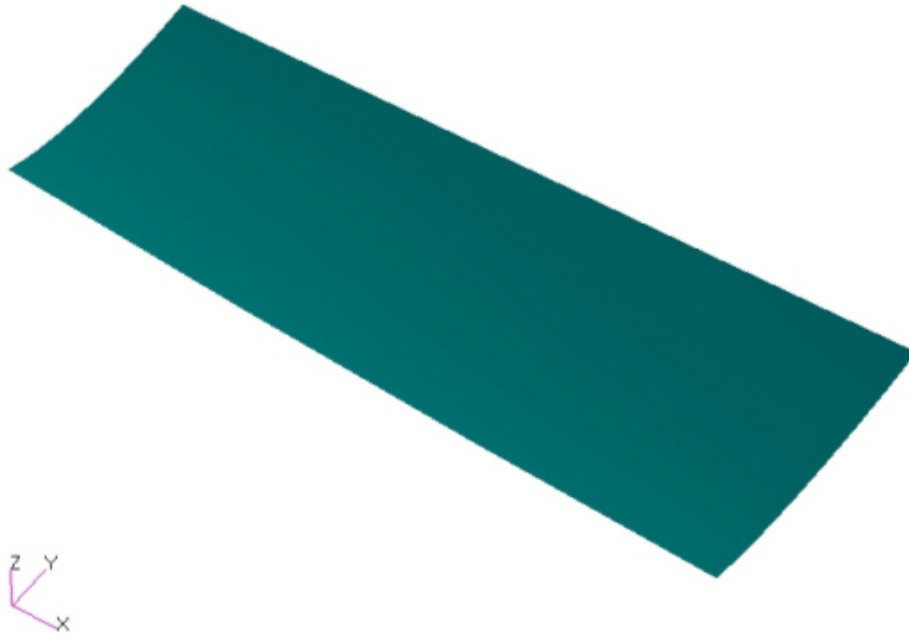


Fig. A.2.1.2.- Superficie inferior de la toma AGU – NACA.

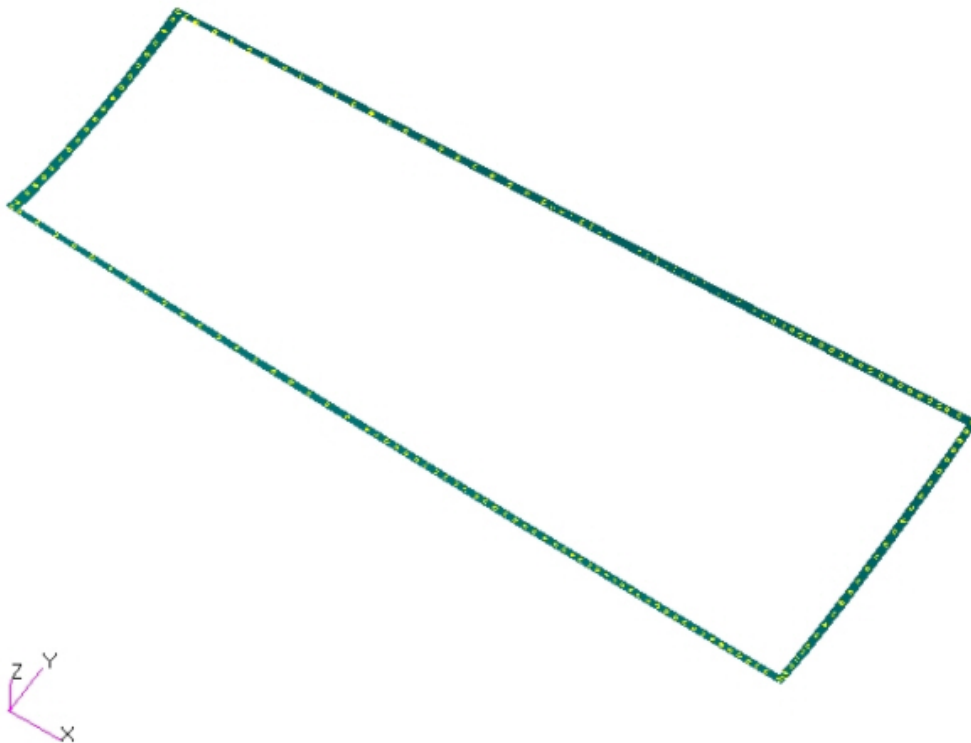


Fig. A.2.1.3.- Borde de anchura adecuada obtenido tras el recorte.

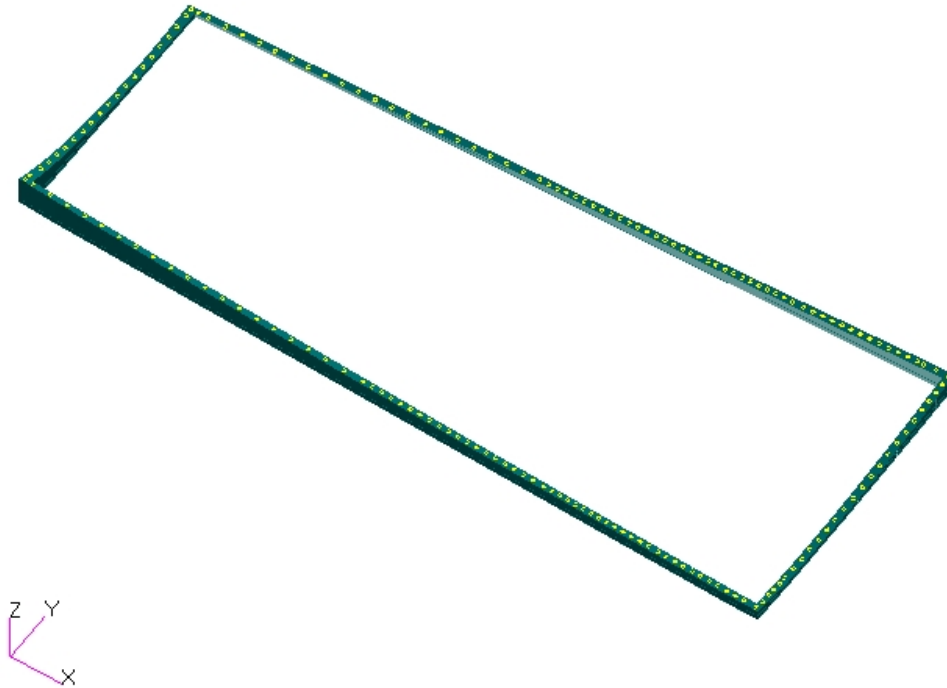


Fig. A.2.1.4.- Geometría de la cama tras la extrusión y la posterior consecución de la superficie inferior plana.

De esta forma, ya se había conseguido pasar de una superficie superior compatible con la curvatura de la toma AGU – NACA y una superficie inferior plana.

Ya sólo fue necesario añadir un reborde de 20 mm. de ancho por 10 mm. de alto que permitiese a la cama ser atornillada la mesa para obtener la disposición final de la cama ya mostrada en al ***Fig. A.2.1.1***

B) ÚTIL RIGIDIZADOR.

La geometría asociada al útil fue justificada y representada de forma suficientemente explícita en el capítulo 2, de forma que la breve mención que aquí se realizará se limitará a reseñar que la construcción de la misma se redujo a la construcción de un travesaño longitudinal y otro transversal y la repetición de los mismos considerando las traslaciones adecuadas. Así, la geometría asociada a cada travesaño fue obtenida a partir de la extrusión del perfil adecuado elaborado previamente. Tanto el primero de los travesaños

longitudinales como el primero de los transversales fueron aligerados de forma que al realizar las traslaciones, se obtenían ya los elementos definitivos.

Las figuras que se muestran a continuación tratan de ilustrar el procedimiento descrito anteriormente:

C) MESA DE VIBRACIÓN.

Aunque en un principio se convino en no introducir en el modelo la mesa de vibración, sustituyendo el efecto de las uniones atornilladas mediante condiciones de contorno oportunas, posteriormente se observó que su presencia era relevante, puesto que aportaba rigidez al conjunto y magnificaba, por tanto, los valores de frecuencia natural del mismo.

En este caso la geometría del modelo se simplificó a una forma rectangular respecto de la forma hexagonal que poseía la real. La **Fig. A.2.1.5** muestra la zona que corresponde a las dimensiones de la mesa modelada y la **Fig. A.2.1.6** presenta la geometría de la mesa considerada en el modelo.

Centrándonos ya en este modelo del conjunto útil – mesa de vibración, el objetivo era el de tratar de “simular” los ensayos experimentales llevados a cabo sobre el útil rigidizador. En concreto, el *ensayo sinusoidal*, en el que la excitación de entrada era constante en aceleración (ver **apartado 5.3** para más información).

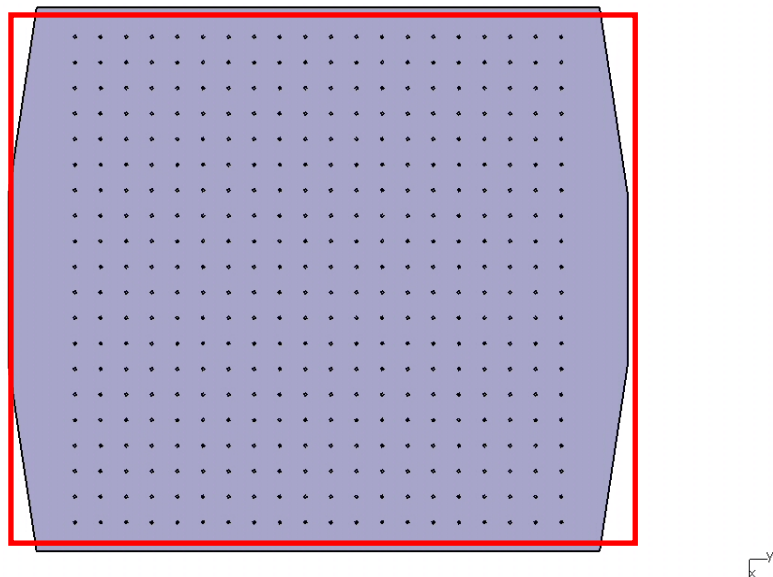


Fig. A.2.1.5.- Zona de la mesa real asociada a la mesa modelada.

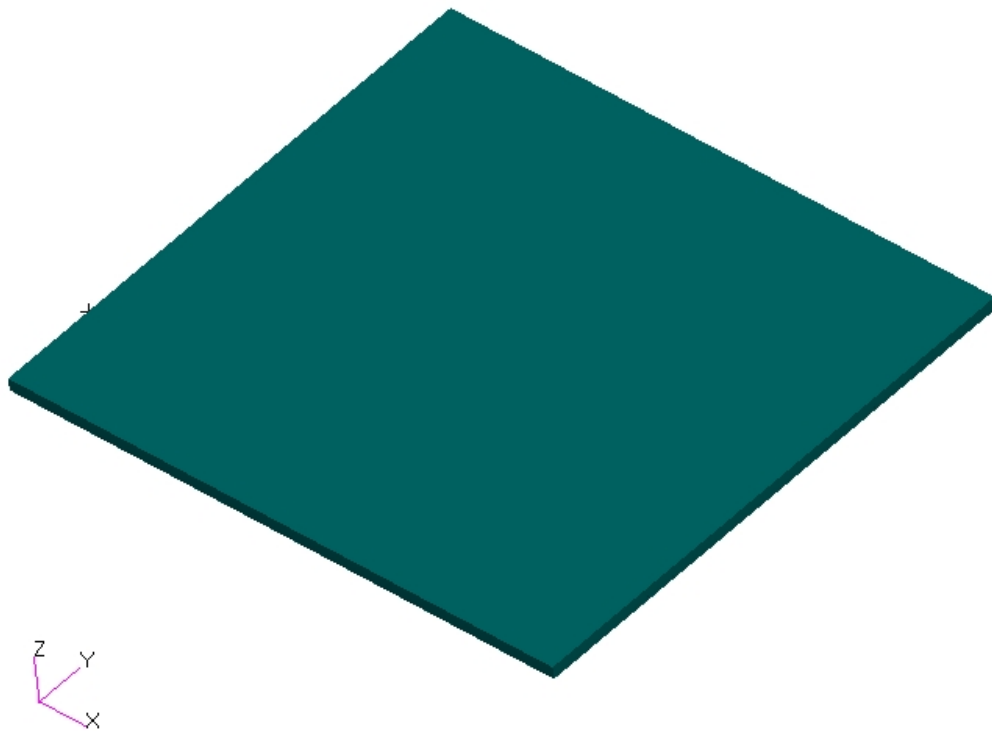


Fig. A.2.1.6.- Geometría de la mesa en el modelo.

A.2.2.- Mallado.

Como ya se ha comentado anteriormente, las distintas partes que componen el modelo tendrán una incidencia mayor o menor en función del cometido del mismo. Del mismo modo, la realidad que se trata de representar a través del modelo también tendrá una importancia mayúscula a la hora de determinar las dificultades que presenta. Así, unas veces lo difícil será estimar las condiciones de contorno, otras veces será la aplicación de la carga la que presentará problemas y en otras ocasiones, como en el caso del estudio de una grieta, será vital controlar el tamaño de elemento para evitar que los resultados obtenidos carezcan de un cierto sentido.

En el caso que nos ocupa existía, en principio, una gran dificultad: ¿Cómo modelar las uniones atornilladas? Existían diversas formas de hacerlo (unas más finas – y complicadas – que otras) pero, tanto las dimensiones del modelo, como la compleja geometría (sobre todo en el caso de la cama y la toma AGU – NACA), así como la gran cantidad de uniones que presentaba el ensayo, se optó por representar **la fijación entre los distintos elementos**

como si las superficies en contacto estuviesen solidariamente unidas.

Obsérvese que la aseveración anterior implica una simplificación importante, puesto que estamos sustituyendo uniones discontinuas (en la zonas anexas a las cabezas de los tornillos) por uniones continuas. No obstante, si se compara la magnitud de la separación entre uniones atornilladas con las dimensiones de las piezas a unir puede concluirse que, si bien la medida adoptada no recoge todas las particularidades de la situación real, puede llegar a representar de forma lo suficientemente aceptable la realidad objeto del análisis.

Como siempre, las consideraciones realizadas están incluidas dentro del marco de la realidad a modelar, que en este caso, al tratarse de un ensayo de vibración realizado a un conjunto de piezas de grandes dimensiones atornilladas entre sí en el que se va a estudiar la respuesta global del mismo, tienen sentido, pero que a lo mejor en otras situaciones no serían de recibo.

Para conseguir la compatibilidad en desplazamientos de los puntos asociados a 2 superficies en contacto era necesario que los nodos considerados por el modelo coincidiesen en ambas superficies, esto es, que la malla creada en ambas superficies fuese absolutamente coincidente. Es lo que se tiene en llamar un **mallado congruente**.

Así pues, en este caso, el tamaño de elemento no era un factor determinante y lo importante era que los nodos asociados a 2 superficies en contacto tuviesen la misma posición en ambas.

Ni que decir tiene que los intentos iniciales de conseguir el mallado requerido automáticamente para la **unión útil – cama** (simplemente ubicando las geometrías en la posición adecuada y seleccionando el conjunto para mallar) fueron totalmente infructuosos, como puede observarse en la **Fig. A.2.2.1**.

El programa mallaba cada geometría por separado puesto que no encontraba relación alguna entre ambas: **a)** cada geometría había sido creada en un archivo distinto y **b)** tenían formas muy distintas y, por tanto, no existía coincidencia alguna entre las aristas de los sólidos asociados a una geometría y a otra.

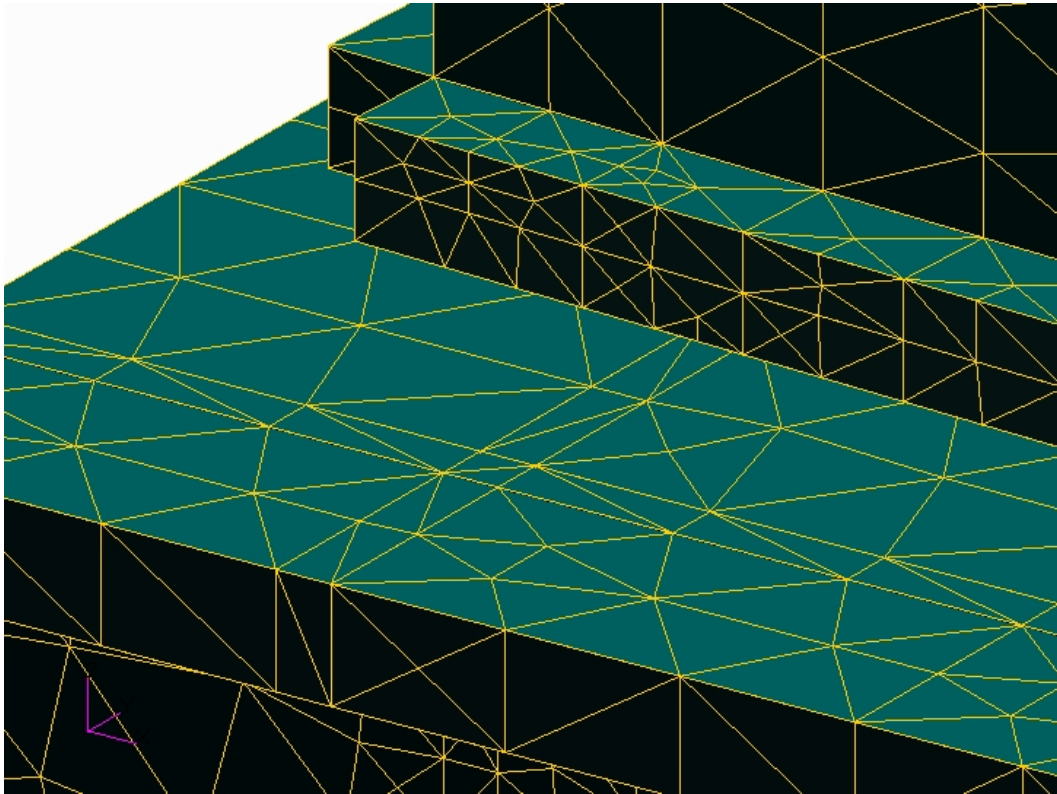


Fig. A.2.2.1.- Mallado no congruente entre el útil y la cama.

Puesto que ésta (interacción útil – cama) se presentaba como la zona más conflictiva en lo que a la consecución de un mallado congruente se refiere (dada la naturaleza curva de las aristas de la cama) se estimó conveniente resolver esta superficie para después extender ese mallado a hacia abajo, dado que la congruencia de la malla asociada a la superficie inferior del útil y a la superior de la mesa de vibración (al estar ambas geometrías constituidas por sólidos de caras rectas) era mucho más fácil de lograr.

Parecía claro que no era posible conseguir esa congruencia a través del mallado automático de los sólidos en contacto. La opción era entonces centrarse únicamente en la superficie en contacto. En este caso, tomando como referencia la superficie superior del útil, se pasó a proyectar sobre ella el conjunto de curvas que constitúan la superficie inferior de la cama. Es decir, teníamos el contorno de la cama, con todos sus puntos de intersección, proyectados sobre la otra superficie en discordia (ver **Fig. A.2.2.3**). Sin embargo el mallado automático seguía sin respetar los puntos y líneas

proyectados sobre la superficie superior del útil. Parecía como si no estuvieran. Era necesario algo más.

Después de un cierto tiempo buscando la pieza que faltaba para lograr el propósito, las pruebas realizadas sobre un modelo de menor complejidad dieron sus frutos. Faltaba asociar las curvas a las caras de los sólidos pertenecientes al útil sobre las que habían sido proyectadas. Hasta entonces se trataba de curvas sin relación alguna con esa superficie. La **Fig. A.2.2.2** muestra el cuadro de diálogo asociado al comando **Associate** – contenida en el botón **Geometry** – mediante el cual se informa al programa de que 2 entidades geométricas están asociadas y, por tanto relacionadas. Esto es, la curva ahora sí está impresa en la cara del sólido, unida indefectiblemente a ella de forma que no puede eliminarse la una sin eliminar la otra: ahora la curva pertenece a la cara a la que se asocia.

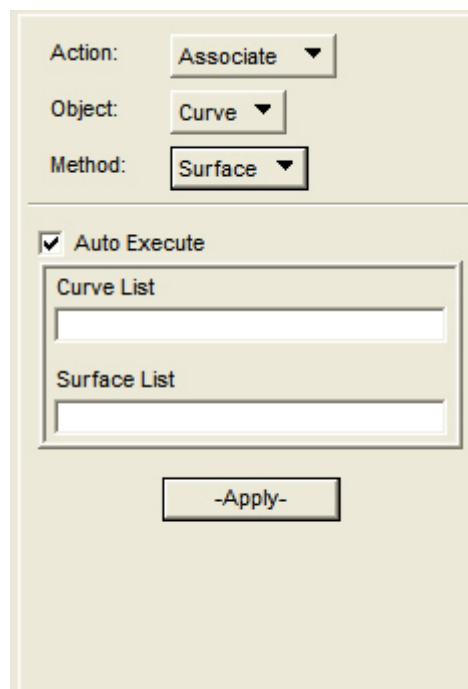


Fig. A.2.2.2.- Cuadro de diálogo de la orden “Associate”.

Parecía que todo estaba resuelto pero, aunque así era, en cierta medida, la orden daba algún problema cuando una curva se extendía a más de una cara (parte de la curva estaba proyectada sobre una superficie y parte sobre la otra) pues la orden sólo era capaz de asociarla a una de las 2 y al mallar después había ciertas anomalías en lo que a congruencia se refiere.

Así pues, fue necesario cortar las curvas proyectadas de forma que sólo estuviesen contenidas en una cara superficial. De esta forma cada curva estaba asociada a una única superficie, si bien ésta última podía contener más de una curva.

La **Fig. A.2.2.3** muestra la disposición del útil con las curvas procedentes de la proyección de las aristas de las caras pertenecientes a los sólidos inferiores de cuantos constituían la cama. Los triángulos amarillos indican la asociación de esas curvas, mientras que los triángulos azules concentrados en los puntos indican que éstos, al encontrarse asociada la curva a la que ellos definen, se encuentran también asociados a las superficies.

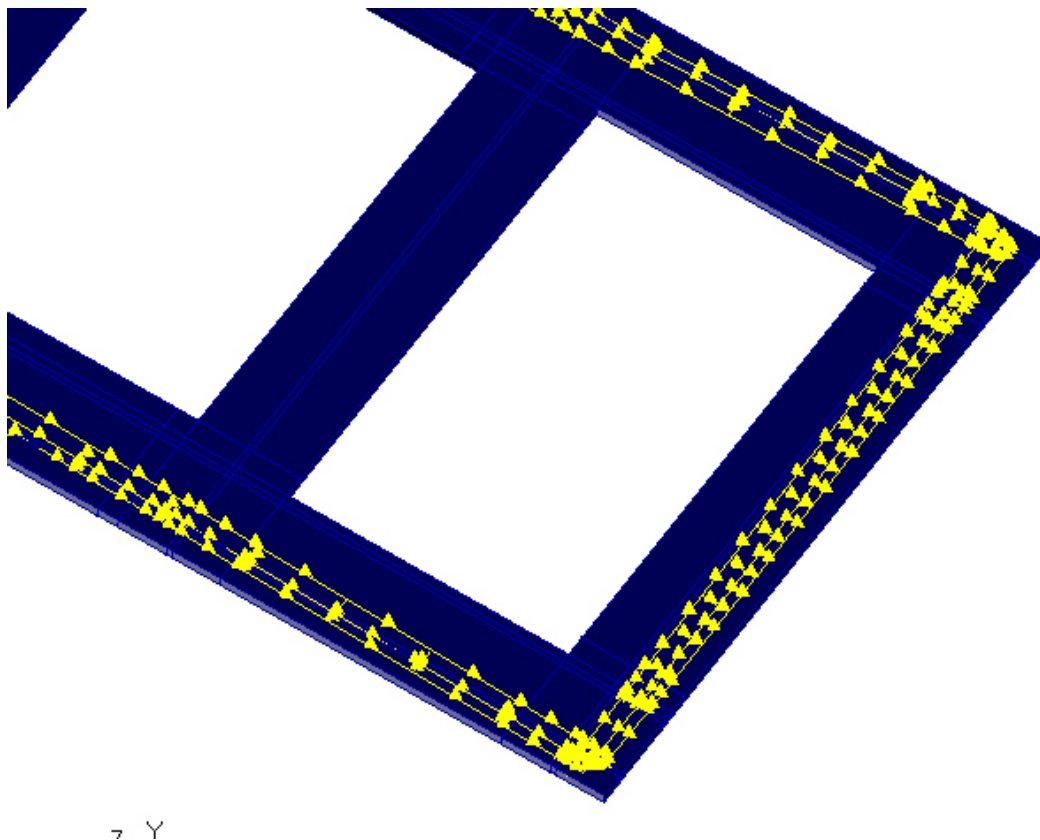


Fig. A.2.2.3.- Disposición que muestra las curvas proyectadas procedentes de la cama asociadas a la superficie superior del útil.

Dada la naturaleza de las intersecciones entre las aristas de los sólidos del útil y las curvas proyectadas a partir de la superficie inferior de la cama no era

posible mallar la superficie con otro tipo de elemento que no fuese el triangular (el programa no era capaz de hacerlo correctamente con el cuadrado). Se escogió el elemento de 3 nodos (1 en cada vértice) por ser el más sencillo de los posibles (*Tria3*).

Al no ser posible realizar un mallado homogéneo (*Isomesh*) – debido a la complejidad que entrañaba compatibilizar en el mallado todos los puntos y curvas incluidos en cada superficie – se utilizó el mallado no homogéneo (*Paver*). La **Fig. A.2.2.4** recoge el cuadro de diálogo asociado a la orden **Create Mesh** (Crear malla). En él se advierten los aspectos que es posible modificar.

Action: **Create** ▼

Object: **Mesh** ▼

Type: **Surface** ▼

Output ID List

Node: 73551

Element: 204255

Elem Shape: **Tria** ▼

Mesher: **Paver** ▼

Topology: **Tria3** ▼

Paver Parameters...

Node Coordinate Frames...

Surface List

Global Edge Length

☒ Automatic Calculation

Value: 0.1

Prop. Name: - None -

Prop. Type: - N/A -

Select Existing Prop...

Create New Property...

-Apply-

Fig. A.2.2.4.- Cuadro de diálogo asociado a la orden “Create Mesh”.

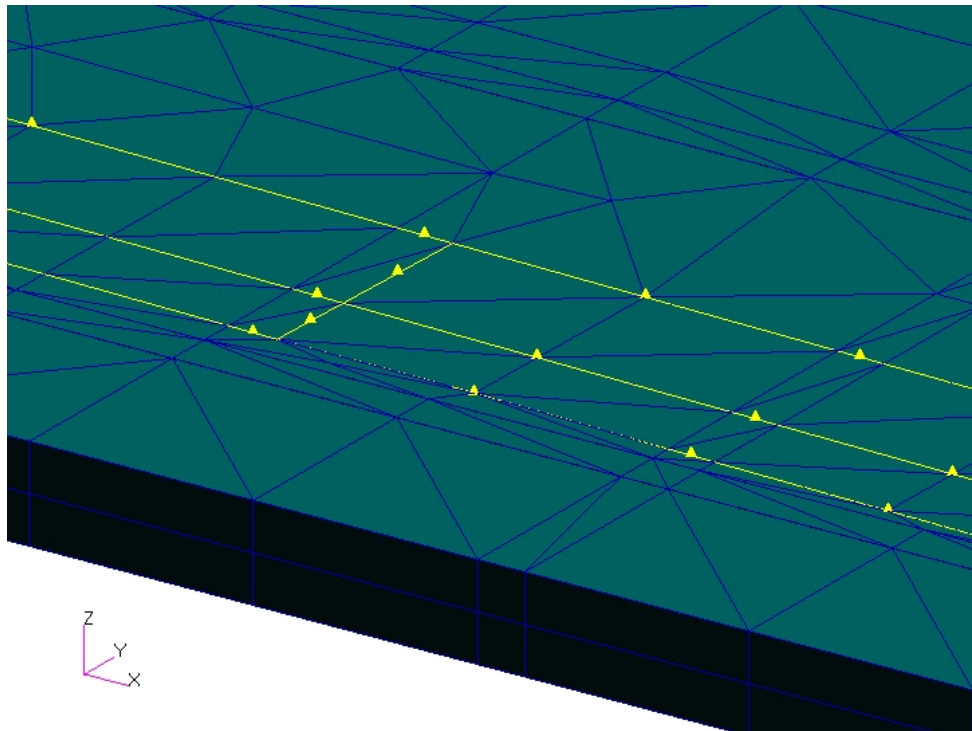


Fig. A.2.2.5.- Detalle de la congruencia del mallado.

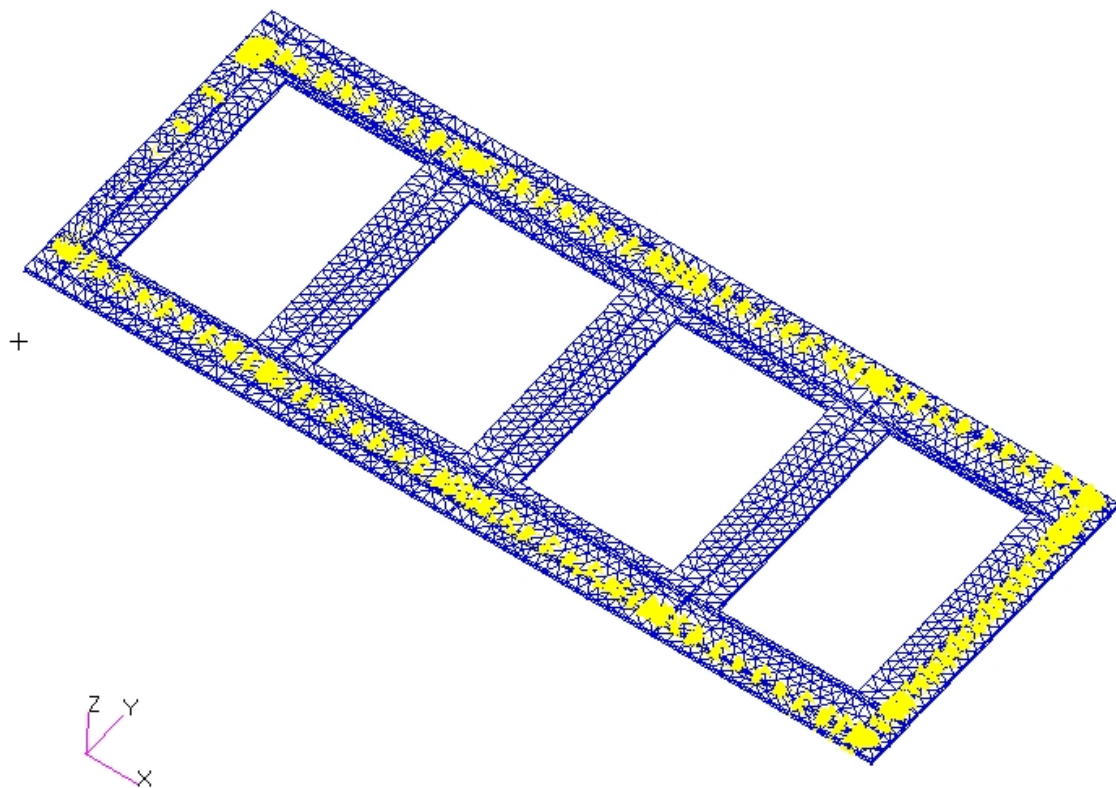


Fig. A.2.2.6.- Disposición general de la superficie superior del útil mallada de forma congruente con la superficie inferior de la cama.

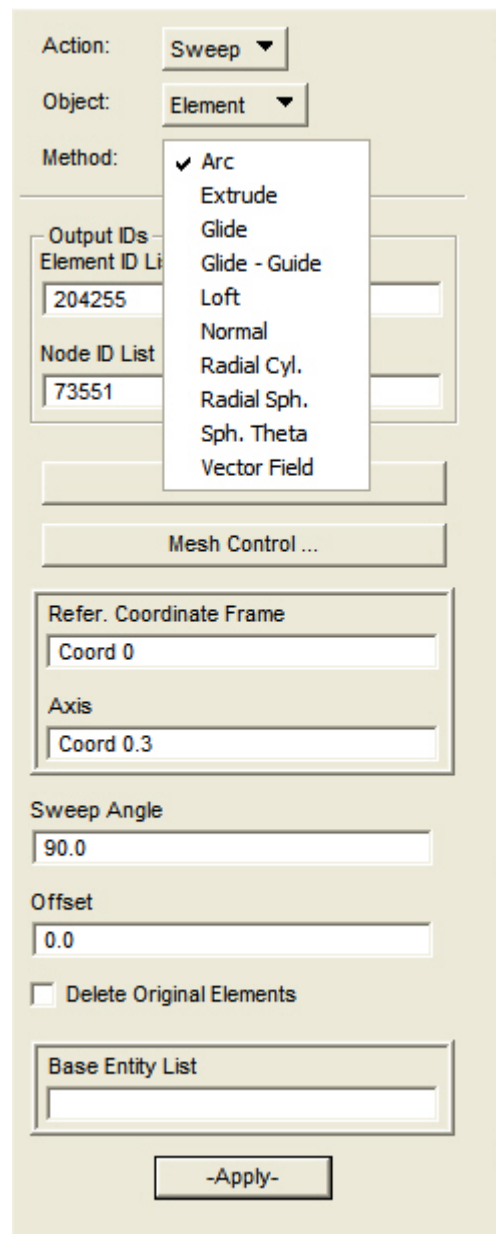


Fig. A.2.2.7.- Cuadro de diálogo de la orden “Sweep”.

Las figuras **Fig. A.2.2.5** y **Fig. A.2.2.6** muestran un detalle de la congruencia en el mallado lograda y una disposición general del mallado congruente de la superficie superior del útil.

Una vez que se había conseguido mallar la zona de contacto de mayor dificultad, se prosiguió con el mallado del resto del útil y, por extensión, la mesa de vibración. Este mallado posterior se realizó tomando como base el mallado superficial congruente anteriormente conseguido. Así, la orden **Sweep** (Barrer) – contenida en el botón **Elements** – ofrece distintas posibilidades para crear

mallas a partir del barrido de otras mallas. La **Fig. A.2.2.7** muestra el cuadro de diálogo asociado a la orden **Sweep** de forma que es posible advertir las opciones que permite.

De esta forma puede *mallarse una superficie por la extensión de una malla perteneciente a alguno de sus bordes* o bien *mallar un sólido a partir del mallado asociado a una de sus caras*. Puesto que la malla de la superficie superior del útil estaba constituida por elementos **Tria3** (ver pág.33), los elementos obtenidos por barrido de ese tipo de elemento serán prismas triangulares de 6 nodos – 1 en cada vértice – denominados en el programa **Wedge6**.

La **Fig. A.2.2.8** muestra un detalle del mallado de un sólido por barrido a partir del mallado triangular de una de sus caras, mientras que la **Fig. A.2.2.9** permite observar una disposición general del mallado del útil y la mesa de vibración.

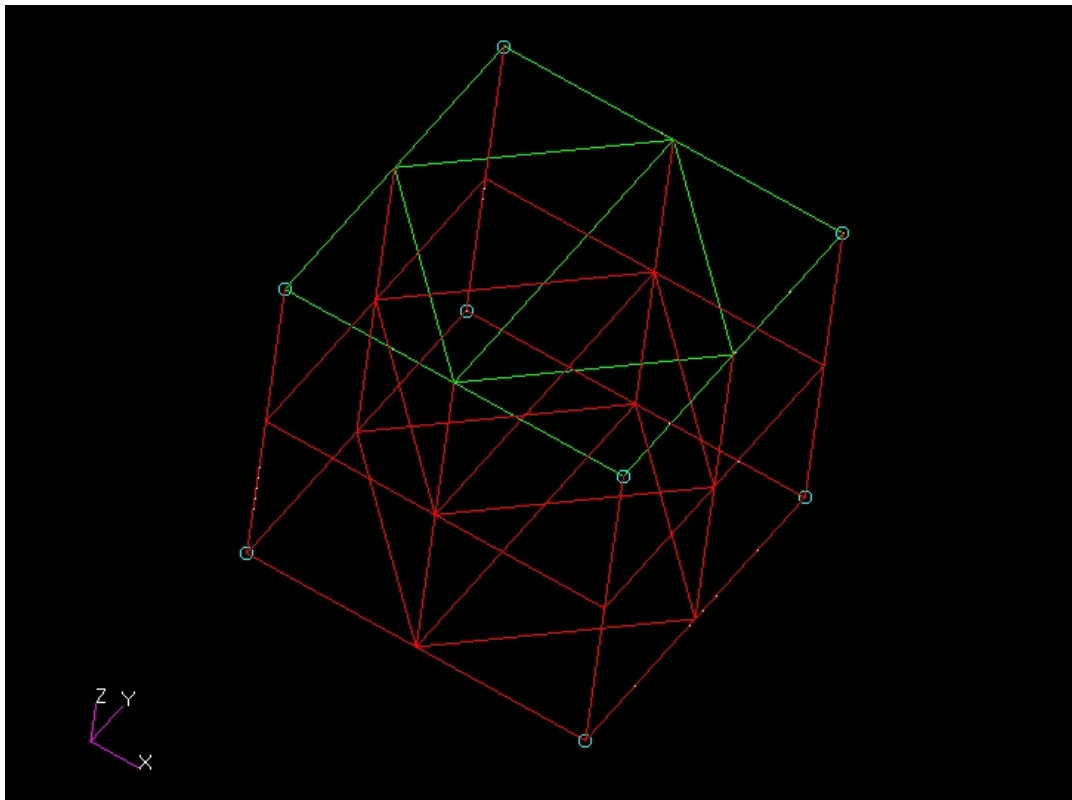


Fig. A.2.2.8.- *Mallado de un sólido a partir del mallado triangular de una de sus caras.*

En lo que respecta a la cama, los sólidos inferiores cuya geometría corresponde a prismas rectangulares fueron mallados también mediante la orden **Sweep**. Sin embargo, los sólidos superiores que poseen caras de curvatura más o menos pronunciada (según el caso), sólo pudieron ser mallados utilizando tetraedros de 4 nodos (**Tet4**) y controlando el tamaño de los elementos mediante la utilización de semillas de mallado (**Mesh Seed**).

La **Fig. A.2.2.10** muestra el detalle de algunos de los sólidos superiores pertenecientes a la cama en el que se observa también la ubicación de las semillas de mallado (círculos amarillos). En la **Fig. A.2.2.11** aparece una disposición general del conjunto mallado en el que aparecen la mesa de vibración, el útil y la cama.

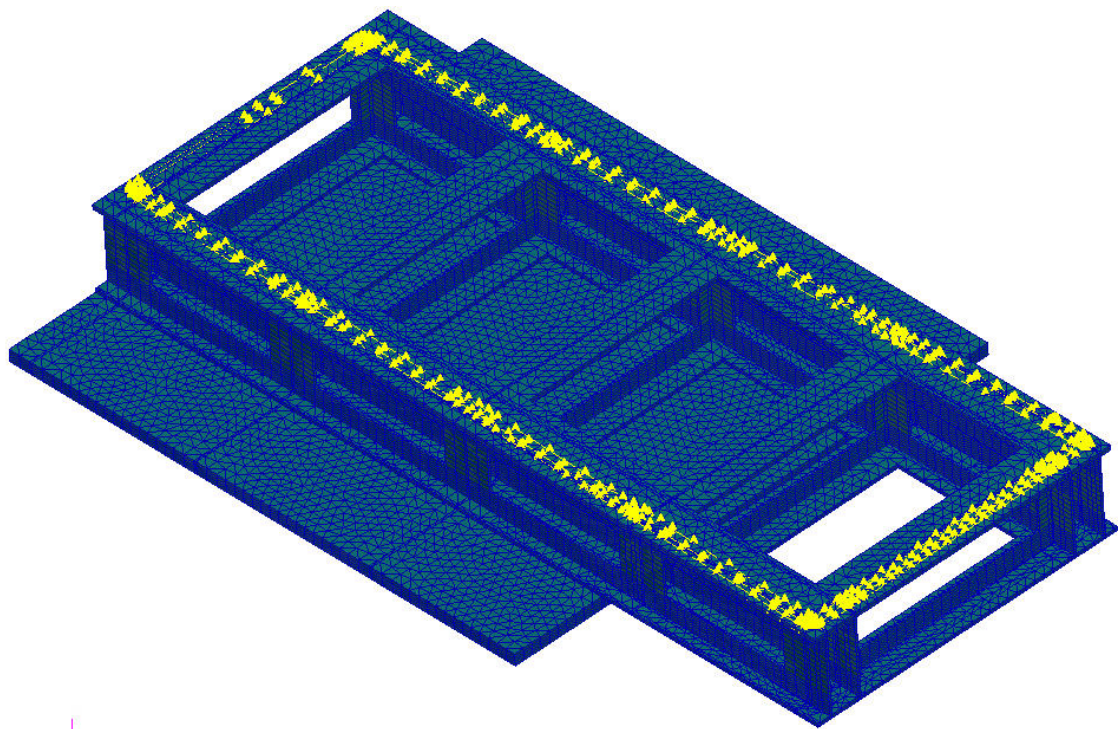


Fig. A.2.2.9.- Disposición general del mallado del útil y la mesa de vibración.

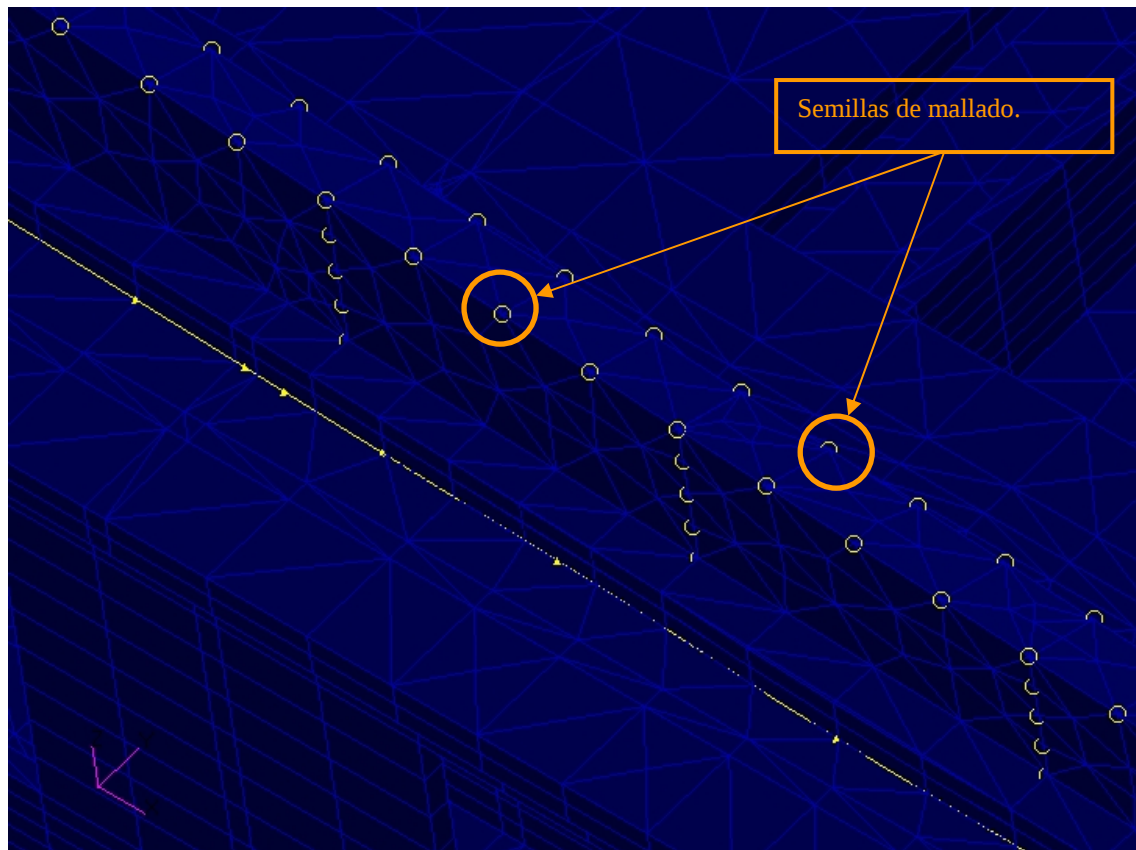


Fig. A.2.2.10.- Malla de uno de los sólidos superiores de la cama.

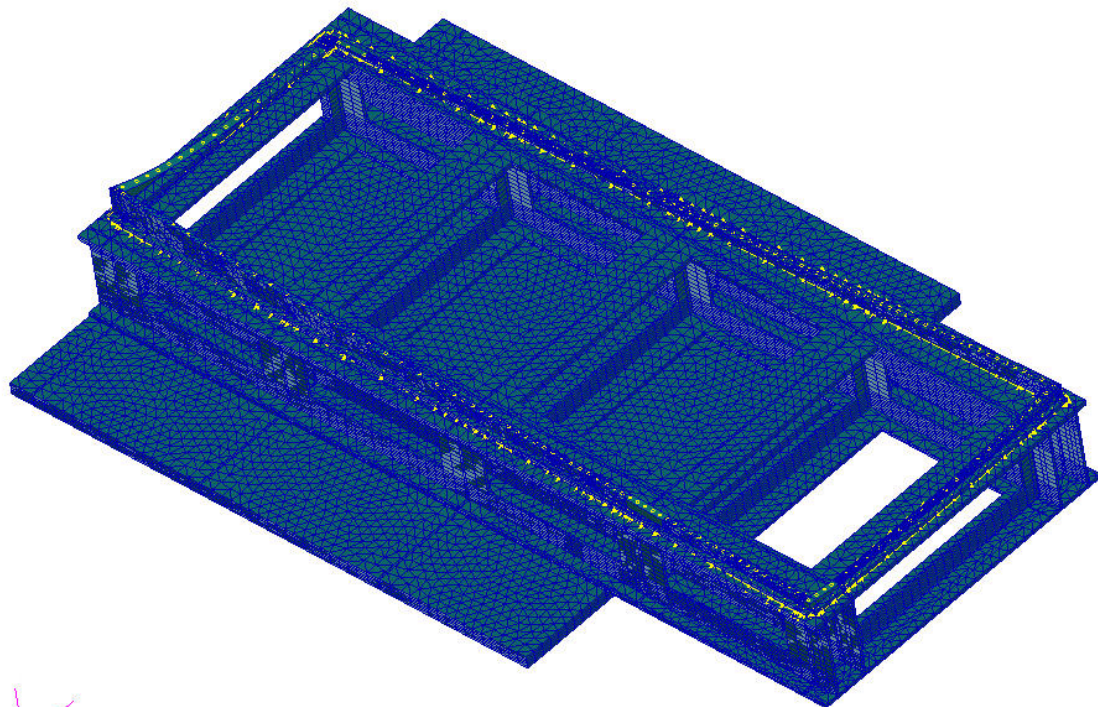


Fig. A.2.2.11.- Disposición general del conjunto mallado mesa-útil- cama.

A.2.3.- Propiedades, cargas y condiciones de contorno (CC).

Para que el modelo esté perfectamente determinado, ya sólo falta definir las propiedades de los materiales de los que han sido fabricadas las diferentes piezas que forman parte del conjunto a ensayar y unas condiciones de contorno que representen de forma aceptable las restricciones introducidas por sistemas de seguridad, uniones atornilladas, etc., sobre el conjunto mesa – útil – cama – AGU-NACA. Una vez más se recalca que no se trata de conseguir las condiciones de contorno que representen la realidad con la mayor fidelidad posible (pues pudiera ser que el coste de trabajo necesario para realizarlo fuese totalmente inaceptable) sino unas condiciones que funcionen lo suficientemente bien para el caso particular que se está analizando (en esta ocasión se trata de la respuesta del sistema frente a sollicitaciones de carácter vibratorio).

o **Propiedades.**

Teniendo en cuenta que las propiedades asociadas a la toma AGU – NACA venían dadas con el modelo, sólo se referirán en este apartado las asociadas al resto de los elementos constitutivos del modelo. Tanto la cama como el útil fueron fabricados con aleaciones de aluminio (concretamente el útil tenía Al 5083 en las placas de 20 mm. y Al 5754 en las placas de 10 mm.), mientras que la mesa de vibración era de Magnesio.

Puesto que la variación de las propiedades para un tipo de aleación u otro era ínfima, se tomaron unos valores asociados a un Aluminio estándar, comprobándose que los resultados obtenidos apenas se veían afectados. Lo mismo ocurría con la **mesa de vibración**. Aunque no se sabía exactamente la aleación de magnesio de la que estaba fabricada, se tomaron las propiedades asociadas al magnesio estándar. La **Tabla A.2.3.1** muestra los valores considerados:

	ALUMINIO	MAGNESIO
E (MPa)	71020	44000
ν	0.33	0.35
G (MPa)	26890	16300
ρ (Kg/m ³)	2796	1740

Tabla A.2.3.1.- Valores de las propiedades para el Al y el Mg.

o **Cargas.**

En lo que se refiere a las cargas, este apartado se limitará a señalar tipo de carga, el lugar de aplicación y cuantía de la misma, siendo justificados todos esos aspectos en el capítulo siguiente, dedicado al método utilizado para simular el ensayo de vibración mediante el programa de elementos finitos.

Así, los análisis realizados para determinar los modos de vibración y las frecuencias naturales (ver capítulo 2 donde se muestran los resultados obtenidos de dicho análisis para el útil durante su fase de diseño) no requerían de cargas aplicadas (sólo era necesario imponer las condiciones de contorno). Sin embargo, sí era necesario introducir cargas cuando se trataba de simular la sollicitación en frecuencia.

Las cargas aplicadas son de tipo **“Force”** cuya aplicación es puntual (serán aplicadas en los nodos asociados a la superficie inferior de la mesa de vibración) y la dirección viene determinada en cada caso por el movimiento oscilatorio que introduce la vibración (se realizaron ensayos de vibración sobre el conjunto en 3 direcciones perpendiculares). Así, si la excitación vibratoria mueve al conjunto en movimiento alternativo paralelo al eje x, la fuerza a aplicar en la simulación del ensayo tendrá esa misma dirección. *El valor de la fuerza aplicada será de $4.15 \cdot 10^9$ (N) en unidades congruentes con las utilizadas durante todo el análisis.*

Si bien en el capítulo 5 se mostrará información más detallada acerca de los distintos ensayos realizados y el procedimiento seguido, las

Fig. A.2.3.1 y **Fig. A.2.3.2** añaden información visual a la explicación realizada en el párrafo anterior, mostrando un detalle de las cargas aplicadas sobre la mesa de vibración (elemento inductor y transmisor de la excitación vibratoria).

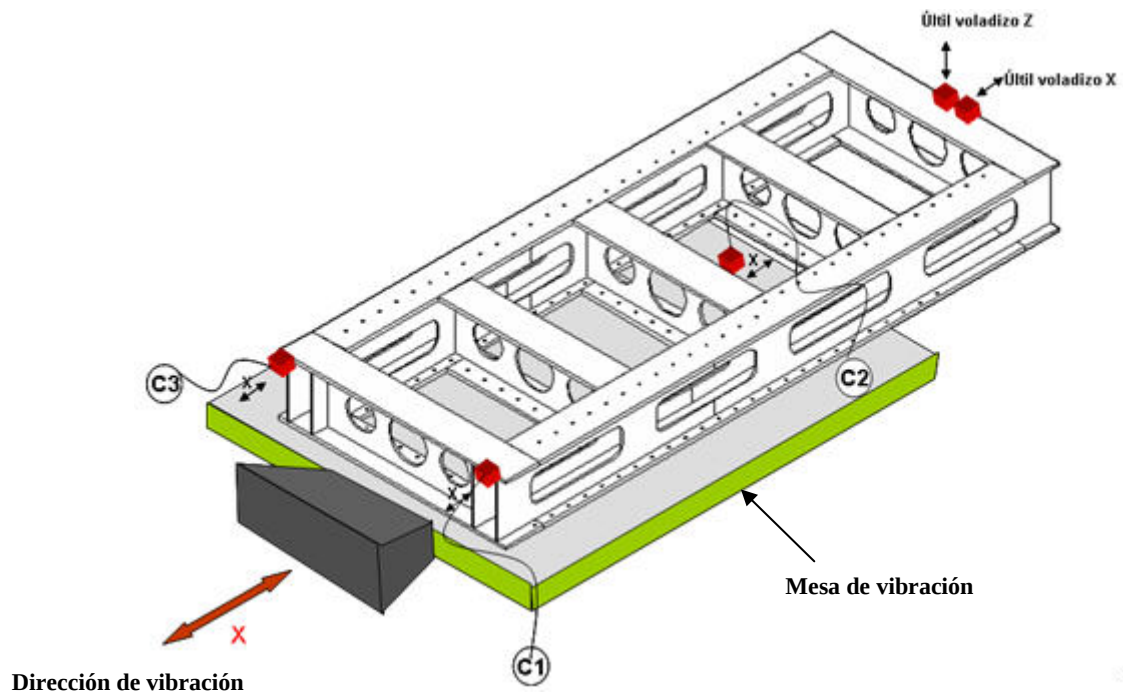


Fig. A.2.3.1.- Esquema de la disposición real del útil sobre la mesa.

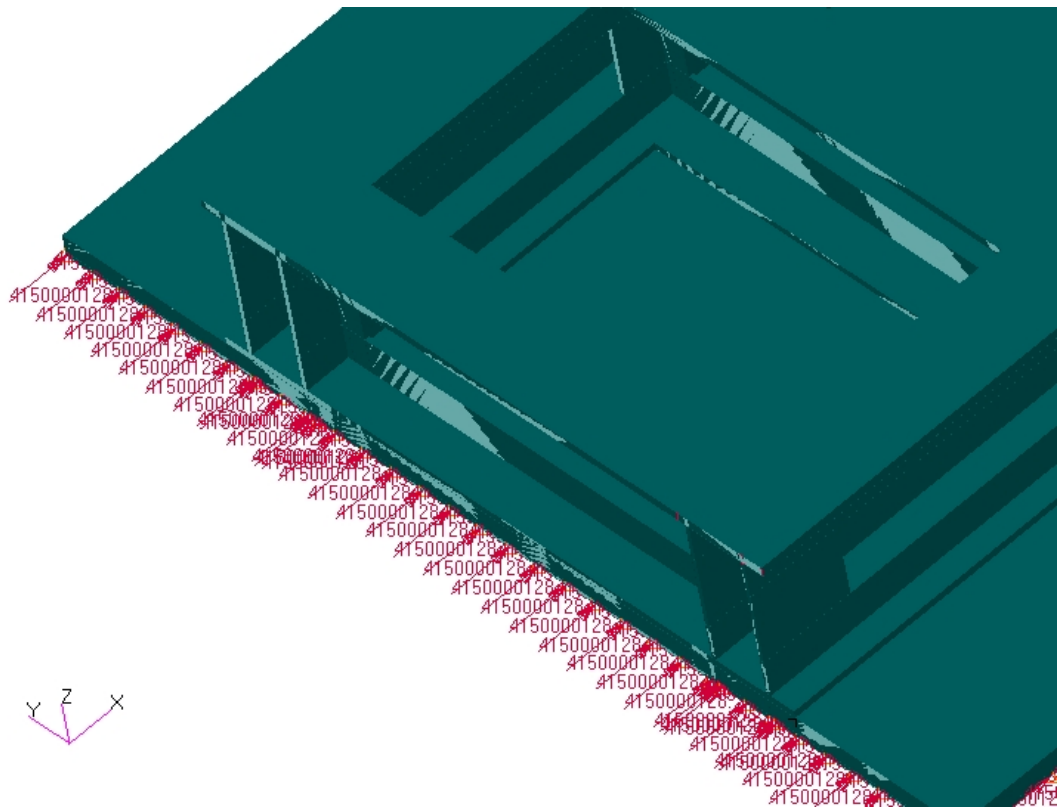


Fig. A.2.3.2.- Detalle de aplicación de las cargas en el modelo.

o **Condiciones de Contorno.**

Las condiciones de contorno también están determinadas por el método utilizado para realizar el análisis vibratorio y serán discutidas más adelante. Ahora, simplemente se indicará que las condiciones de contorno (aplicadas sobre los mismos nodos que las cargas) impedirán todos los desplazamientos y rotaciones excepto en la dirección de la excitación, en la que estos desplazamientos están permitidos.

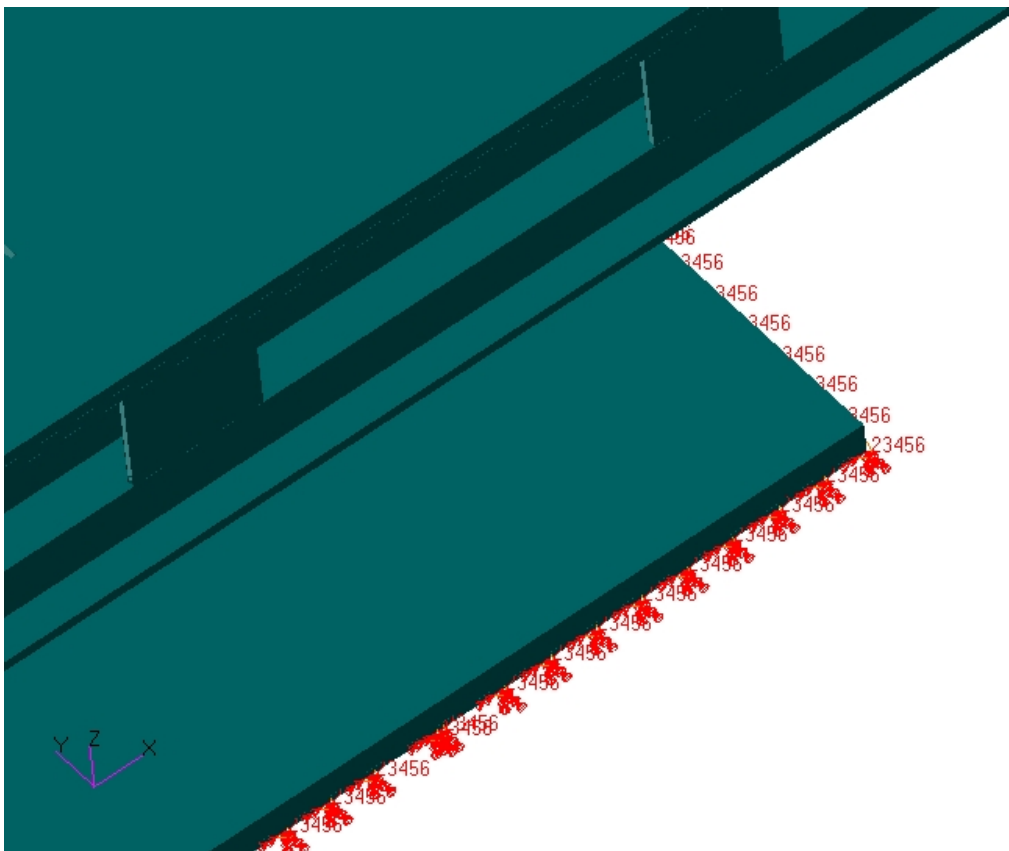


Fig. A.2.3.3.- Detalle de las condiciones de contorno.

Además, en todos los nodos asociados a la superficie inferior de la mesa de vibración, será necesario crear unos elementos puntuales de gran rigidez que estarán representados en el programa mediante triángulos naranjas (ver **Fig. A.2.3.4**).

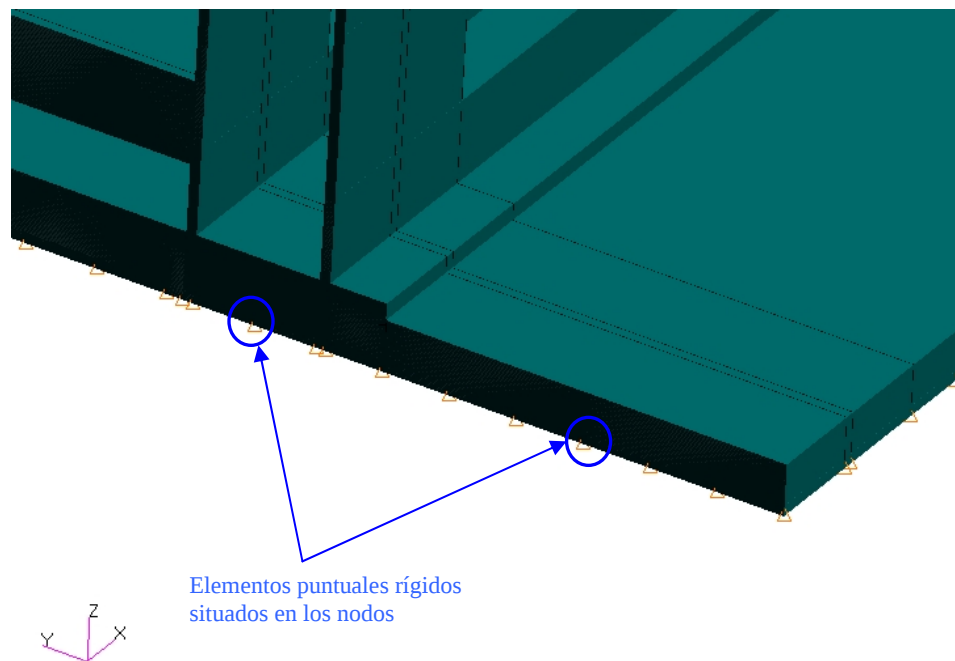


Fig. A.2.3.4.- Detalle de los elementos puntuales rígidos situados en los nodos de aplicación de las cargas (“large mass method”).

Para mayor información acerca de estos *elementos puntuales* y el *método de las grandes masas puntuales* en general puede consultarse el apartado 2.4 del presente proyecto.