



**Universidad**  
Zaragoza

# Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Industrial (ANEXOS)

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO 2D CON  
RESOLUCIÓN NANOMÉTRICA:

Optimización del diseño para la mejora de  
especificaciones

Autor  
**David Chueca Pablo**

Directora  
**Margarita Valenzuela Galván**

Ponente  
**José Antonio Yagüe Fabra**

Departamento de Ingeniería y Fabricación  
Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)  
**2013**

Repository of the University of Zaragoza – Zaguan

<http://zaguan.unizar.es>



## **INDICE DE CONTENIDO DE ANEXOS**

### **ANEXO I**

<b>I.1 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE POSICIONADO .....</b>	<b>47</b>
I.1.1 COMPONENTES COMERCIALES.....	47
I.1.1.1 Componentes comerciales de la parte fija inferior .....	49
I.1.1.2 Componentes comerciales de la parte móvil.....	52
I.1.2 COMPONENTES PARA FABRICACIÓN.....	54
I.1.2.1 Componentes para fabricación de la parte fija inferior .....	54
I.1.2.2 Componentes para fabricación de la parte móvil .....	58
I.1.2.3 Componentes para fabricación de la parte fija superior .....	62
<b>I.2 MODIFICACIONES REALIZADAS SOBRE EL DISEÑO ORIGINAL. DETALLES CONSTRUCTIVOS .....</b>	<b>65</b>
I.2.1 BASE.....	66
I.2.2 ACOPLAMIENTOS FLEXIBLES.....	67
I.2.3 MARCO METROLÓGICO INFERIOR.....	68
I.2.4 PLATAFORMA DE ALUMINIO DE LA PARTE MÓVIL .....	69
<b>I.3 MATERIALES UTILIZADOS.....</b>	<b>71</b>

### **ANEXO II**

<b>II.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) .....</b>	<b>75</b>
<b>II.2 INTERFAZ DE ANSYS WORKBENCH.....</b>	<b>77</b>
<b>II.3 ANÁLISIS MODAL. CONFIGURACIÓN Y SIMULACIONES .....</b>	<b>81</b>
II.3.1 CONFIGURACIÓN DE LA PARTE FIJA INFERIOR PARA EL ANÁLISIS MODAL .....	81
II.3.1.1 Cargas y apoyos en el análisis modal de la parte fija inferior.....	81
II.3.1.2 Mallado para la parte fija inferior en el análisis modal.....	84
II.3.2 CONFIGURACIÓN DE LA PLATAFORMA MÓVIL PARA EL ANÁLISIS MODAL .....	86

II.3.2.1	Cargas y apoyos en el análisis modal de la parte móvil .....	86
II.3.2.2	Mallado para la parte móvil en el análisis modal.....	88
II.3.3	RESUMEN DE CONFIGURACIÓN Y RESULTADOS.....	88
II.3.3.1	Imágenes de los resultados del análisis modal de la parte fija inferior .....	89
II.3.3.2	Imágenes de los resultados del análisis modal de la parte móvil .....	91
<b>II.4</b>	<b>ANÁLISIS ESTÁTICO. CONFIGURACIÓN Y SIMULACIONES .....</b>	<b>93</b>
II.4.1	CONFIGURACIÓN DEL ANÁLISIS ESTÁTICO .....	93
II.4.1.1	Cargas y apoyos en el análisis estático .....	94
II.4.1.2	Mallado en el análisis estático .....	95
II.4.2	RESUMEN DE CONFIGURACIÓN DEL ANÁLISIS ESTÁTICO .....	96
II.4.3	DATOS PARA EL CÁLCULO DEL ERROR DE POSICIONAMIENTO DEBIDO A DEFORMACIONES ESTRUCTURALES .....	96
II.4.3.1	Plataforma con 3 apoyos fijos: Datos obtenidos para el cálculo de errores....	97
II.4.3.2	Plataforma con toda la superficie inferior apoyada: Datos obtenidos para el cálculo de errores .....	98

## **ANEXO III**

<b>III.1</b>	<b>SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ÍNTEGRO .....</b>	<b>101</b>
<b>III.2</b>	<b>PARTE FIJA INFERIOR.....</b>	<b>103</b>
III.2.1	BASE .....	104
III.2.2	ACOPLAMIENTOS FLEXIBLES.....	105
III.2.3	MARCO METROLÓGICO INFERIOR .....	106
III.2.4	ACOPLAMIENTO DEL ACTUADOR .....	107
<b>III.3</b>	<b>PARTE MÓVIL .....</b>	<b>109</b>
III.3.1	PLATAFORMA DE ALUMINIO .....	110
III.3.2	TAPA DE ALUMINIO.....	111
III.3.3	MARCO METROLÓGICO SUPERIOR.....	112
<b>III.4</b>	<b>PARTE FIJA SUPERIOR .....</b>	<b>113</b>
III.4.1	ARMAZÓN SUPERIOR.....	114

## **ANEXO IV**

<b>IV.1 MONTAJE EN EL LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE LOS SENSORES CAPACITIVOS .....</b>	<b>117</b>
<b>IV.2 RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>	<b>119</b>
<b>IV.2.1 VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA .....</b>	<b>119</b>
<b>IV.2.2 PUESTA A TIERRA .....</b>	<b>121</b>
<b>IV.2.3 MEDICIÓN CON PELÍCULA DE AIRE.....</b>	<b>121</b>

## **FIGURAS DE ANEXOS**

### **ANEXO I**

<b>Figura I 1</b> Cabezal AFM de la empresa española Nanotec a integrar en el sistema de posicionamiento (8).....	47
<b>Figura I 2</b> Esquema de funcionamiento del AFM (9).....	48
<b>Figura I 3</b> Ampliación (x2300) del voladizo ( <i>cantilever</i> ) de un AFM (10) .....	48
<b>Figura I 4</b> Imagen amplificada de una muestra real obtenida con un AFM (11) .....	48
<b>Figura I 5</b> Parte fija inferior. (Componentes comerciales en rojo) .....	49
<b>Figura I 6</b> Cabezal láser. Vista 3D y planos (12).....	49
<b>Figura I 7</b> Sistema de procesamiento del sistema láser de medición (6) (12) .....	50
<b>Figura I 8</b> Acoplamiento de actuadores al marco metrológico inferior.....	50
<b>Figura I 9</b> Actuador vertical y características (13).....	51
<b>Figura I 10</b> Nano-posicionador y características (14) .....	51
<b>Figura I 11</b> Sensores capacitivos .....	51
<b>Figura I 12</b> Parte móvil. (Componentes comerciales en rojo) .....	52
<b>Figura I 13</b> <i>Air bearing</i> y vástago para acoplamiento del distribuidor “New Way” (15) .....	52
<b>Figura I 14</b> Esquema de configuración de los <i>air bearings</i> (15) .....	53
<b>Figura I 15</b> <i>Air bearing</i> en modelo CAD con el nuevo vástago diseñado .....	53
<b>Figura I 16</b> Parte fija inferior. (Componentes para fabricación en azul) .....	54
<b>Figura I 17</b> Base .....	55
<b>Figura I 18</b> Superficies de deslizamiento .....	55
<b>Figura I 19</b> Marco metrológico inferior y unión a la base con acoplamientos flexibles .....	56
<b>Figura I 20</b> Acoplamiento del actuador vertical .....	57
<b>Figura I 21</b> Parte móvil. (Componentes para fabricación en azul) .....	58
<b>Figura I 22</b> Plataforma de aluminio .....	59
<b>Figura I 23</b> Marco metrológico inferior .....	59
<b>Figura I 24</b> Vista inferior del marco metrológico superior con acoplamientos flexibles y espejos .....	59
<b>Figura I 25</b> Fuerzas que actúan sobre la matriz de imanes .....	60
<b>Figura I 26</b> Vista inferior de la carcasa de la matriz de imanes.....	60

<b>Figura I 27</b> Fuerzas actuantes sobre las matrices de imanes dispuestas sobre la plataforma de aluminio de la parte móvil.....	60
<b>Figura I 28</b> Placa de cobre .....	61
<b>Figura I 29</b> Fuerzas generadas .....	61
<b>Figura I 30</b> Sistema de amortiguación completo.....	61
<b>Figura I 31</b> Parte fija superior. (Componentes para fabricación en azul) .....	62
<b>Figura I 32</b> Bobinado del estator de los motores lineales .....	62
<b>Figura I 33</b> Adición de pegamento aglutinantes para el bobinado .....	62
<b>Figura I 34</b> Recubrimiento del bobinado.....	63
<b>Figura I 35</b> Parte posterior de los estatores.....	63
<b>Figura I 36</b> Parte de cara a los caminos magnéticos .....	63
<b>Figura I 37</b> Piezas fabricadas en Zerodur (16) .....	72

## ANEXO II

<b>Figura II 1</b> División del dominio para aplicación del MEF .....	75
<b>Figura II 2</b> Vista esquemática de las condiciones de contorno .....	75
<b>Figura II 3</b> Pantalla inicial de Ansys Workbench.....	77
<b>Figura II 4</b> Pantalla de nuevo proyecto. Vinculación archivos CAD .....	78
<b>Figura II 5</b> Pantalla de nuevo proyecto con archivo CAD vinculado.....	78
<b>Figura II 6</b> Interfaz de la pantalla de simulación de Ansys Workbench .....	79
<b>Figura II 7</b> Herramienta de actualización de geometría desde la pantalla de simulación .....	80
<b>Figura II 8</b> Mensaje de error en la solución debido a un mallado muy fino .....	81
<b>Figura II 9</b> Adición de un punto de masa .....	82
<b>Figura II 10</b> Cuadro de opciones del punto de masa que sustituye al acoplamiento del actuador vertical y el propio actuador (5 kg) .....	82
<b>Figura II 11</b> Referencia del punto de masa que sustituye al acoplamiento del actuador y al propio actuador (5 kg) .....	83
<b>Figura II 12</b> Cuadro de opciones del punto de masa que sustituye a la parte fija superior (40 kg).....	83
<b>Figura II 13</b> Referencia del punto de masa que sustituye a la parte fija superior (40 kg) ....	83
<b>Figura II 14</b> Apoyos fijos de la base (en azul).....	84
<b>Figura II 15</b> Estudio de validez del mallado .....	85

<b>Figura II 16</b> Detalle del aspecto del mallado de la parte fija inferior para análisis modal.....	86
<b>Figura II 17</b> Punto de masa de 1 kg representando al AFM. (Observar en rojo la superficie de referencia tomada).....	87
<b>Figura II 18</b> Apoyos para el análisis modal de la parte móvil .....	87
<b>Figura II 19</b> Aspecto del mallado de la parte móvil para análisis modal.....	88
<b>Figura II 20</b> Formas modales aparecidas para un espesor de la placa que hace de marco metrológico inferior de 10 mm. (Deformaciones x50000) .....	89
<b>Figura II 21</b> Formas modales aparecidas para un espesor de la placa que hace de marco metrológico inferior de 17 mm. (Deformaciones x50000) .....	90
<b>Figura II 22</b> Formas modales aparecida en la parte móvil original. (Deformaciones x50000).....	91
<b>Figura II 23</b> Formas modales aparecidas en la parte móvil modificada (Deformaciones x50000).....	92
<b>Figura II 24</b> Adición de peso sobre los <i>air bearings</i> (6).....	93
<b>Figura II 25</b> Pruebas de variación del módulo elástico del material asociado a la plaquita que simula el aire. (Valor medio del máximo descenso vertical en la base de los 3 <i>air bearings</i> ) .....	94
<b>Figura II 26</b> Tres apoyos fijos (en azul) .....	95
<b>Figura II 27</b> Toda la superficie fija (en azul).....	95

## ANEXO IV

<b>Figura IV 1</b> Configuración de los elementos (Vista inferior) .....	117
<b>Figura IV 2</b> Montaje preparado para el ensayo con conexión a tierra.....	117
<b>Figura IV 3</b> Esquema de la instalación neumática (6).....	117
<b>Figura IV 4</b> 10 000 datos por segundo .....	119
<b>Figura IV 5</b> 1 000 datos por segundo .....	119
<b>Figura IV 6</b> 100 datos por segundo .....	120
<b>Figura IV 7</b> 10 datos por segundo .....	120
<b>Figura IV 8</b> Datos con puesta a tierra (10 000 datos por segundo).....	121
<b>Figura IV 9</b> Datos con película de aire (10 000 datos por segundo y conexión a tierra)....	121

## **LISTA DE TABLAS DE ANEXOS**

### **ANEXO II**

<b>Tabla II 1</b> Resultados con la opción <i>Coarse</i> .....	85
<b>Tabla II 2</b> Resultados con la opción <i>Medium</i> .....	85
<b>Tabla II 3</b> Resultados según número de nodos.....	85
<b>Tabla II 4</b> Resumen de configuración del análisis modal .....	88
<b>Tabla II 5</b> Resumen De configuración del análisis estático .....	96
<b>Tabla II 6</b> Datos tomados en cada posición: Variación de posición de los puntos y distancia teórica entre cabezales láser y espejos. Tres apoyos .....	97
<b>Tabla II 7</b> Cálculo de los ángulos de inclinación de los espejos en cada posición. Tres apoyos .....	97
<b>Tabla II 8</b> Datos tomados en cada posición: Variación de posición de los puntos y distancia teórica entre cabezales láser y espejos. Superficie inferior fija.....	98
<b>Tabla II 9</b> Cálculo de los ángulos de inclinación de los espejos en cada posición. Superficie inferior fija .....	98

## BIBLIOGRAFIA

1. **Fesperman, RR.** A multi-scale alignment and positioning system: [MAPS]. *Doctoral Thesis*. Charlotte, Carolina del Norte, EE.UU.: University of North Carolina, 2006.
2. **Ozturk, O.** Multi-scale alignment and positioning system II. *Doctoral Thesis*. Charlotte, Carolina del Norte, EE.UU.: University of North Carolina, 2008.
3. **Holmes, ML.** Analysis and design of a long range scanning stage. *Doctoral thesis*. Charlotte, Carolina del Norte, EE.UU.: University of North Carolina, 1998.
4. **Muñío, S.** Desarrollo de una posicionadora 2D en levitación para aplicaciones en nanotecnología. *Proyecto Fin de Carrera*. Zaragoza, España: Departamento de Ingeniería y Fabricación, Universidad de Zaragoza, 2010.
5. **Torralba, M.** Diseño de una posicionadora 2D para su integración con sistemas de medición nanométricos. *Proyecto Fin de Carrera*. Zaragoza, España: Departamento de Ingeniería y Fabricación, Universidad de Zaragoza, 2010.
6. **Torralba, M.** Diseño de un sistema de posicionado bidimensional con resolución nanométrica y de la estrategia para su calibración. *Trabajo Fin de Máster*. Zaragoza, España: Departamento de Ingeniería y Fabricación, Universidad de Zaragoza, 2011.
7. **Precisionballs.** <http://www.precisionballs.com/Flexures.html>.
8. **Nanotec.** [www.nanotec.es](http://www.nanotec.es).
9. **www3.physik.uni-greifswald.de.** [www3.physik.uni-greifswald.de/method/afm/eafm.htm](http://www3.physik.uni-greifswald.de/method/afm/eafm.htm).
10. **Xintek.** <http://www.xintek.com/products/afm/index.htm>.
11. **pharm.virginia.edu/AFM.html.**
12. **Renishaw.** <http://www.renishaw.com/en/plane-mirror-systems--6483#tocTarget6>.
13. **www.physikinstrumente.com**
14. **N-Point.** [www.npoint.com](http://www.npoint.com)
15. **NewWayAirBearings.** [www.newwayairbearings.com](http://www.newwayairbearings.com)
16. **Inc., SCHOTT North America.** *Zerodur. Zero Expansion Glass Ceramic*.
17. **Carnicero, A.** Introducción al método de los elementos finitos: Instituto de Investigación Tecnológica.

---

**ANEXO I**

**Descripción de**

**componentes del sistema**

**de posicionado**



# I.1 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE POSICIONADO

En este capítulo del **ANEXO I** se describen los diferentes componentes que forman el sistema de posicionado. Para ello, se han dividido en dos grupos: los comerciales y los que deben fabricarse. Algunos de éstos, como los motores lineales, se están fabricando por un grupo de investigación de la Universidad de Carolina del Norte (EE.UU.) en colaboración con el Departamento de Ingeniería y Fabricación de la Universidad de Zaragoza.

## I.1.1 COMPONENTES COMERCIALES

Se detallan a continuación los componentes comerciales, algunos de los cuales ya han sido adquiridos y están pendientes de ser ensayados para comprobar sus especificaciones, forma de uso y, quizás, incorporar en ellos algún tipo de modificación.

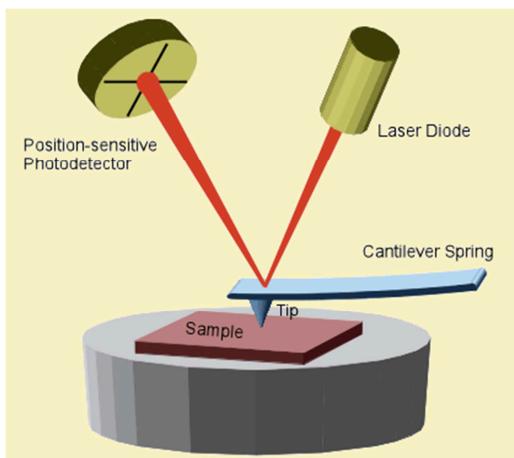
### **Microscopio de Fuerzas Atómicas (*Atomic Force Microscope - AFM*)**

El AFM es el elemento para el cual se ha diseñado el sistema de posicionamiento de este proyecto (véase **Figura I 1**). La compañía española Nanotec es la encargada de su fabricación y distribución. Este microscopio permite caracterizar superficies de muestras de materiales a nivel atómico con gran precisión. El motivo de este proyecto es el de otorgarle un mayor rango de movimiento que los sistemas dispuesto actualmente. Para ello, se integrará en el marco metrológico superior de la parte móvil del sistema desarrollado que se presenta en este trabajo.

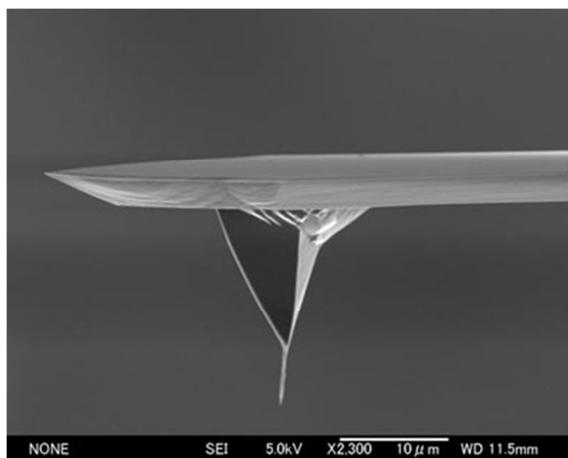


**Figura I 1** Cabezal AFM de la empresa española Nanotec a integrar en el sistema de posicionamiento (8)

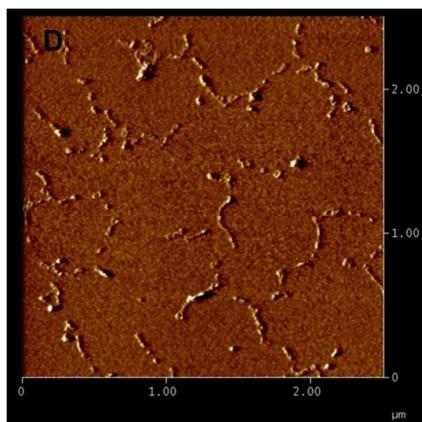
Su principio de funcionamiento se basa en la interacción entre una pequeña punta en voladizo (habitualmente de silicio) y la superficie de la muestra a analizar. La punta tiene un radio de curvatura en torno a 5 nm. Así, se emite un haz láser sobre la superficie de un voladizo (*cantilever*) que contiene la punta del microscopio. Al variar la rugosidad de la superficie, dicho voladizo sufre una deflexión que da lugar al cambio de trayectoria del haz láser reflejado. Un fotodiodo capta estas variaciones y se procesan en una unidad de control que caracteriza la superficie atendiendo a las señales recibidas (véase **Figura I 2** y **Figura I 3**).



**Figura I 2** Esquema de funcionamiento del AFM (9)



**Figura I 3** Ampliación (x2300) del voladizo (*cantilever*) de un AFM (10)



**Figura I 4** Imagen amplificada de una muestra real obtenida con un AFM (11)

### I.1.1.1 Componentes comerciales de la parte fija inferior

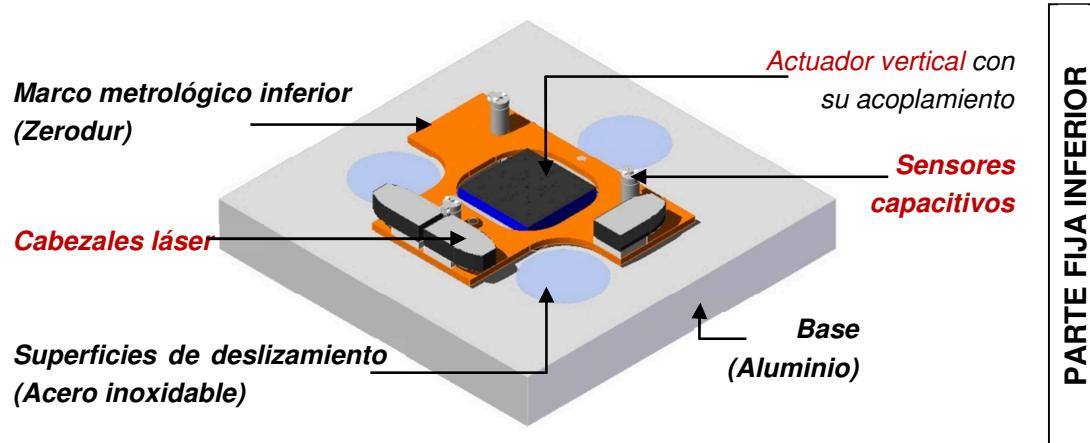


Figura I 5 Parte fija inferior. (Componentes comerciales en rojo)

### Cabezales láser

La medición del desplazamiento de la plataforma, y por tanto de la posición de la parte móvil con el AFM una vez esté integrado, se va a realizar mediante un sistema de cabezales láser y espejos. Dispondremos de 2 cabezales para medir el movimiento en Y (con la medición de dos puntos podremos obtener posibles giros de la plataforma a corregir cuando se realicen los trabajos de control) y un cabezal para medir la posición X.

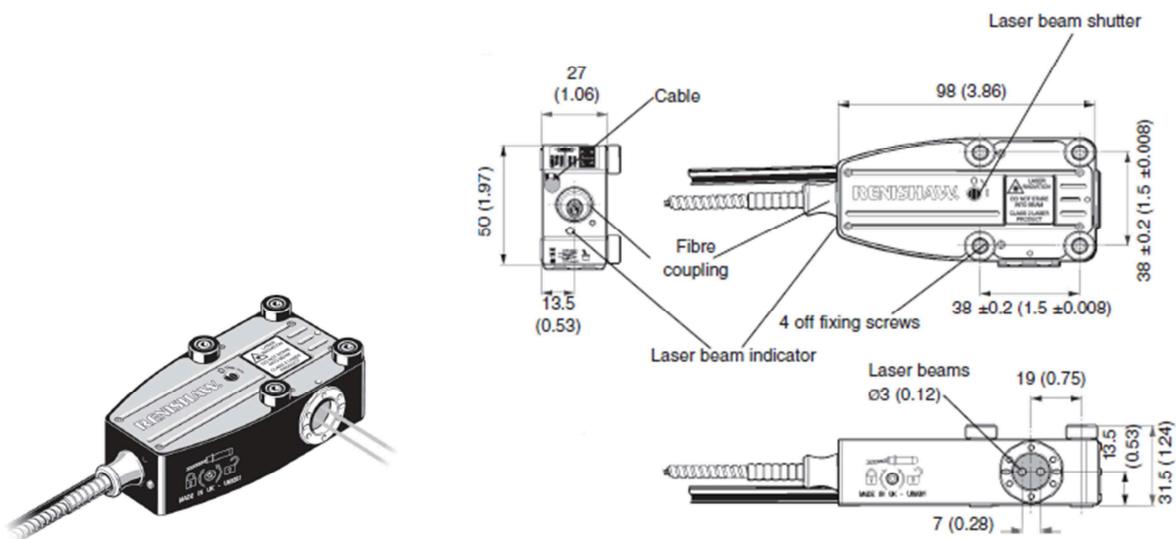
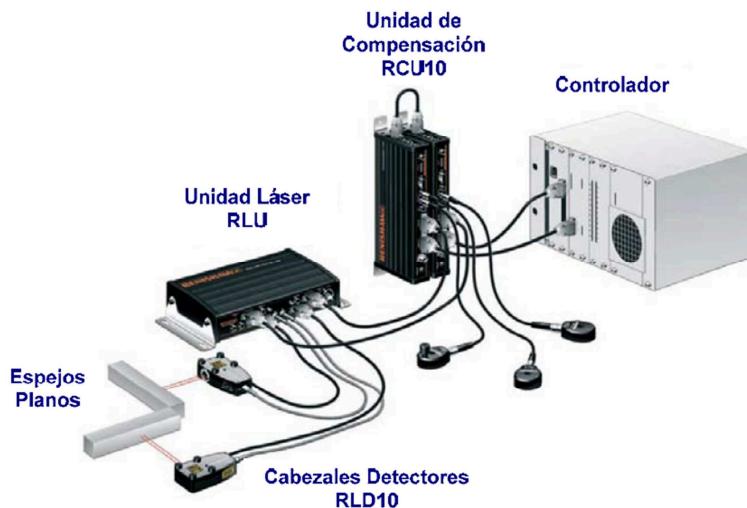


Figura I 6 Cabezal láser. Vista 3D y planos (12)

Los cabezales láser son detectores del haz láser reflejado de modo que, conectados a una unidad de procesamiento, tendremos la longitud de cada uno de los haces en su recorrido de ida y vuelta a los espejos planos dispuestos apropiadamente para ello (véase **Figura I 7**).

Estos espejos son de un material de bajo coeficiente de dilatación térmica (Zerodur).

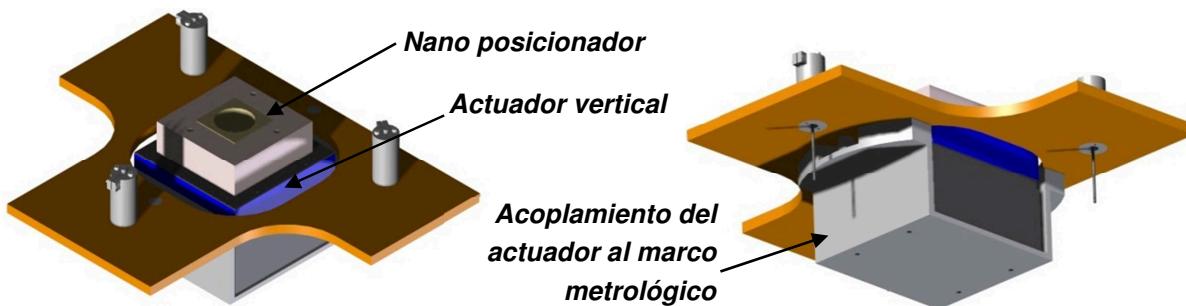


**Figura I 7** Sistema de procesamiento del sistema láser de medición (6) (12)

La unidad láser RLU es el componente principal donde se encuentra la fuente láser y la electrónica necesaria para el procesamiento de la señal. Por otro lado, la unidad de compensación RCU 10 lleva a cabo correcciones de humedad temperatura y presión (observar los 3 detectores conectados a ella), mejorando la precisión y la repetibilidad del equipo. Por último, el controlador permite tratar los resultados obtenidos en la medición.

### Actuador vertical

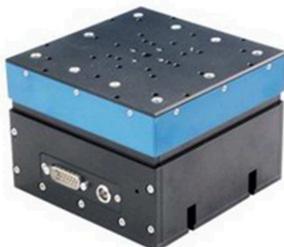
La función del actuador vertical será posicionar la muestra a la altura del haz láser. El AFM analizará la muestra a esa cota Z y se minimiza el error de Abbe que aparece por deformaciones estructurales al medir elementos en diferentes planos. Sobre este actuador, se colocará un nano-posicionador y, por último, la muestra. Así, se tiene en Z un movimiento baste (actuador) y un movimiento fino (Nano posicionador) que colocará precisamente la muestra bajo el voladizo del AFM encargado de caracterizar la superficie (véase **Figura I 8**).



**Figura I 8** Acoplamiento de actuadores al marco metrológico inferior

**Technical Data**

Model	M-501.1PD	M-501.1DG	Units
Active axes	Z	Z	
<b>Motion and positioning</b>			
Travel range	12.5	12.5	mm
Integrated sensor	Rotary encoder	Rotary encoder	
Sensor resolution	40,960	2048	Cts./rev.
Design resolution	0.024	0.005	µm
Min. incremental motion	<0.1	<0.1	µm
Unidirectional repeatability	0.1	0.1	µm
Pitch/Yaw	±15	±15	µrad
Max. velocity	3	0.7	mm/s
Origin repeatability	1	1	µm



**Figura I 9** Actuador vertical y características (13)



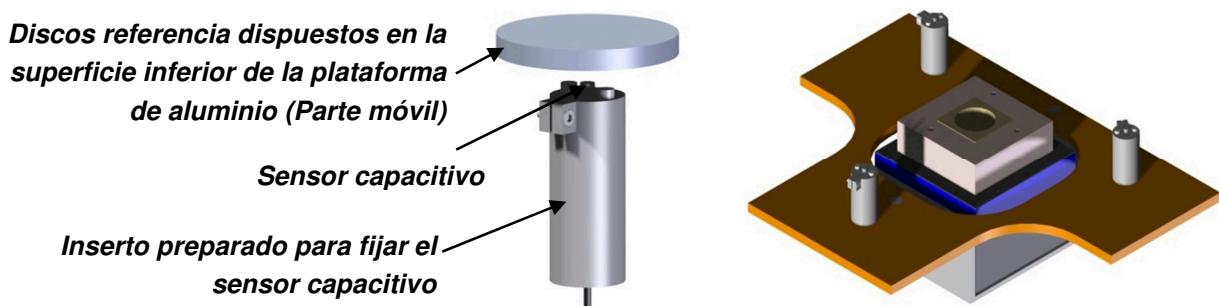
<b>Part Number:</b>	3715102
<b>Footprint:</b>	100mm W x 100mm D x 35mm H
<b>Aperture:</b>	38mm Ø
<b>Material:</b>	Aluminum
<b>Maximum Load:</b>	1 kg
<b>Axes:</b>	X Y Z
<b>Travel Range:</b>	100µm 100µm 25µm
<b>Position Noise:</b>	0.3nm 0.3nm 0.1nm

Ultra-precise XYZ stage developed for metrology applications.

**Figura I 10** Nano-posicionador y características (14)

### Sensores capacitivos

Con estos sensores determinaremos la posición en Z de la parte móvil. De esta forma se controla el espesor de la película de aire creada por los *air bearings*, con lo que sabremos la “altura de vuelo” de unas pocas micras de esta parte.



**Figura I 11** Sensores capacitivos

### I.1.1.2 Componentes comerciales de la parte móvil

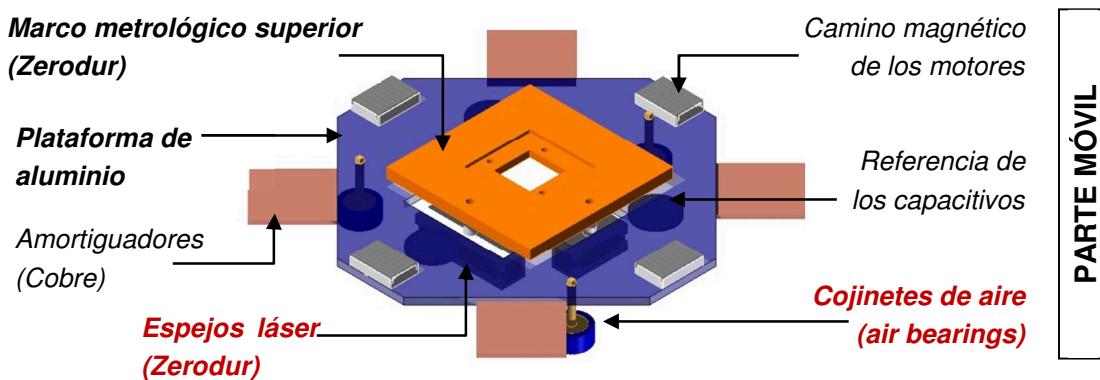


Figura I 12 Parte móvil. (Componentes comerciales en rojo)

#### Cojinetes de aire (*air bearings*)

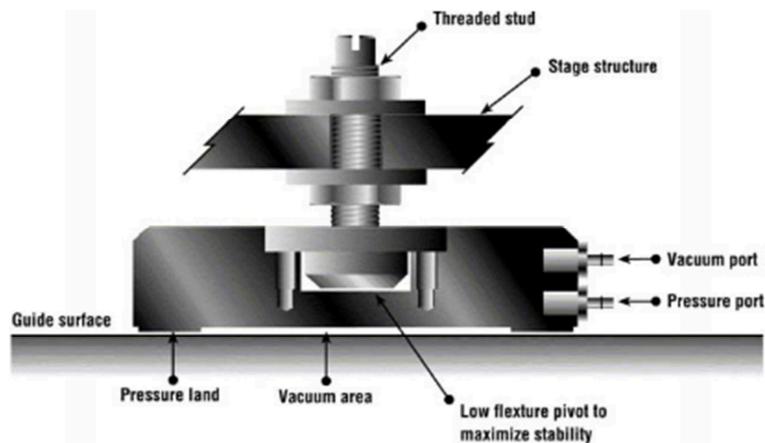
Los *air bearings* constituyen un elemento fundamental y una de las principales ideas sobre las que se sostiene este proyecto. El hecho de incorporar este elemento, supone disponer de un sistema de levitación para la parte móvil que hace posible su movimiento en el plano con fricción prácticamente nula. Estos cojinetes cumplen así dos funciones: conseguir fricción nula y servir de sustentación de toda la parte móvil. Todo ello se logra disponiendo 3 *air bearings* simétricamente triangulados sobre los que se coloca la parte móvil.

Existen diversos tipos *air bearings* en el mercado. Entre ellos, se ha optado por los denominados VPL (*Vacuum Preloaded Air Bearings*) (véase Figura I 13), cuya superficie inferior dispone de dos partes diferenciadas: Una parte de presión y otra parte de vacío. Además, vienen distribuidos con los elementos propios para montar el circuito de la alimentación neumática. El vástago utilizado para el acoplamiento de elementos a ellos también puede adquirirse por separado.



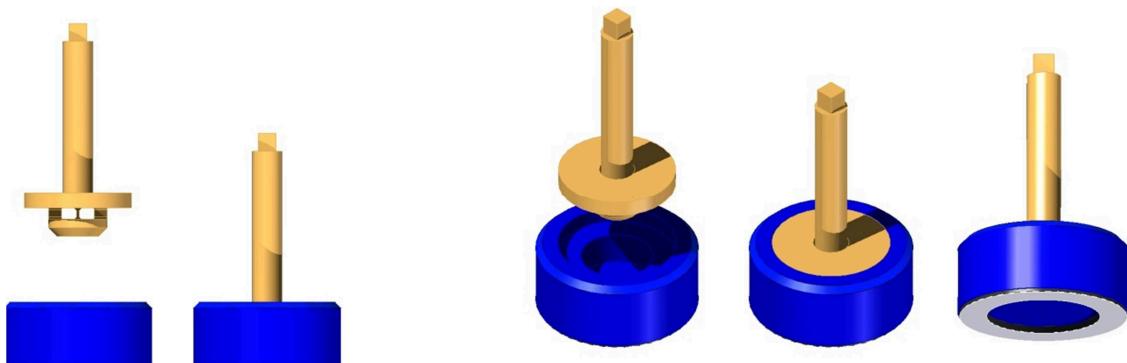
Figura I 13 *Air bearing* y vástago para acoplamiento del distribuidor “New Way” (15)

La parte de presión es la que hace levitar la parte sustentada por los cojinetes empujando a la misma en sentido contrario a la superficie en la que se encuentra. Por otro lado, con la parte de vacío, se ejerce una presión negativa que tiende a adherir el cojinete a la superficie (véase **Figura I 14**).



**Figura I 14** Esquema de configuración de los *air bearings* (15)

Para los análisis realizados con Ansys ha sido preciso el diseño riguroso del vástago del cojinete (véase **Figura I 15**). En diseños previos se disponía de un diseño más simplificado que no representaba con fidelidad el comportamiento del vástago distribuido por el fabricante.

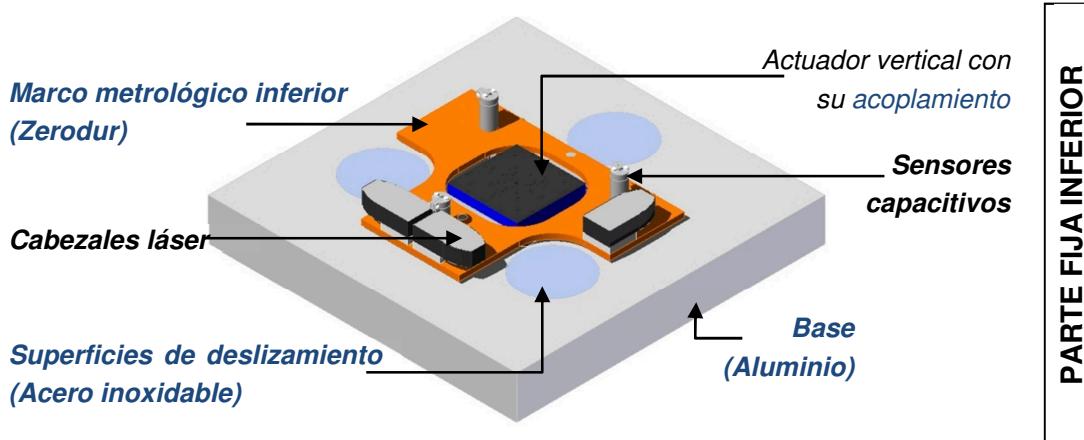


**Figura I 15** *Air bearing* en modelo CAD con el nuevo vástago diseñado

## I.1.2 COMPONENTES PARA FABRICACIÓN

En esta sección se tratan los componentes que deberán fabricarse y las características y funcionalidad de los mismos. Para ello, se tratan por separado según pertenecen a cada una de las tres partes que conforman el sistema.

### I.1.2.1 Componentes para fabricación de la parte fija inferior



**Figura I 16** Parte fija inferior. (Componentes para fabricación en azul)

En esta parte del sistema encontramos el marco metrológico inferior como principal elemento ya que sobre él se localizan los cabezales láser. El mismo, se acopla a la base por medio de los acoplamientos flexibles diseñados apropiadamente para ello y dispone de un agujero central para el actuador vertical.

Además, deberá fabricarse el acoplamiento que permita la incorporación de dicho actuador.

La base servirá de sustento de todos estos elementos. Sobre ella, se sitúan las superficies de deslizamiento sobre las que crearemos la película de aire y sobre las que se producirá el movimiento de la plataforma con los cojinetes de aire.

#### Base (Aluminio)

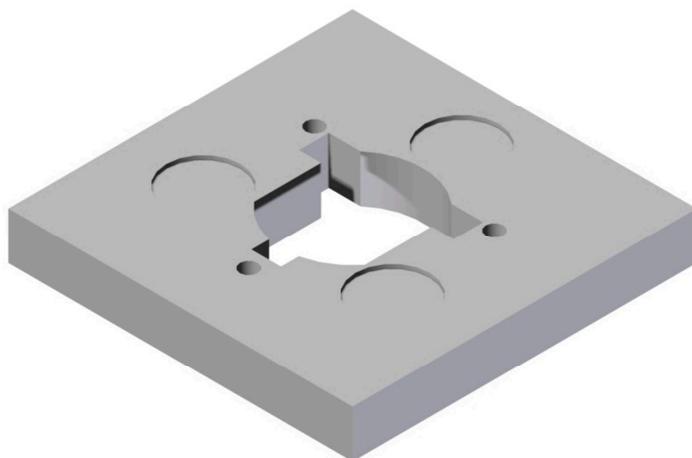
La base se fabricará en aluminio y sobre ella se dispondrán los espacios necesarios para incorporar el actuador vertical (agujero central) y superficies de deslizamiento.

Los espacios circulares para las mismas, deberán estar triangulados a 120º para lograr la simetría necesaria que permita movimientos con la mayor precisión posible en todo el recorrido.

Además, en este trabajo se determinan los vaciados a realizarle para que su peso no resulte excesivo y también, se determina la forma de apoyo.

Esta base, irá acoplada a una mesa anti-vibración para que el sistema se vea lo más mínimamente afectado resonancias a bajas frecuencias.

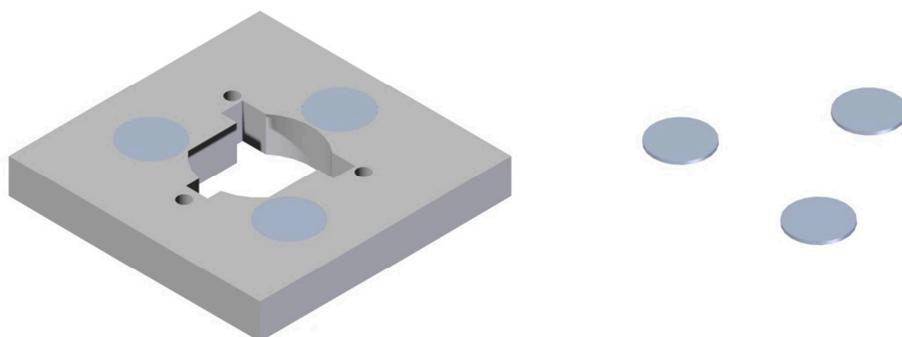
En el **capítulo 3** de este **ANEXO I** puede verse el detalle constructivo con las medidas y las modificaciones introducidas durante este trabajo (vaciados, agujeros para apoyos, etc.). Aquí, simplemente se describe el sistema tal cual fue diseñado en los trabajos previos.



**Figura I 17** Base

#### Superficies de deslizamiento (Acero inoxidable)

Sobre estos discos se situarán los cojinetes de aire; y en consecuencia, toda la parte móvil. Serán fabricados en acero inoxidable para evitar el desgaste y la corrosión de los mismos y, además, irán rectificados con muela de diamante para conseguir una superficie lo más uniforme posible.



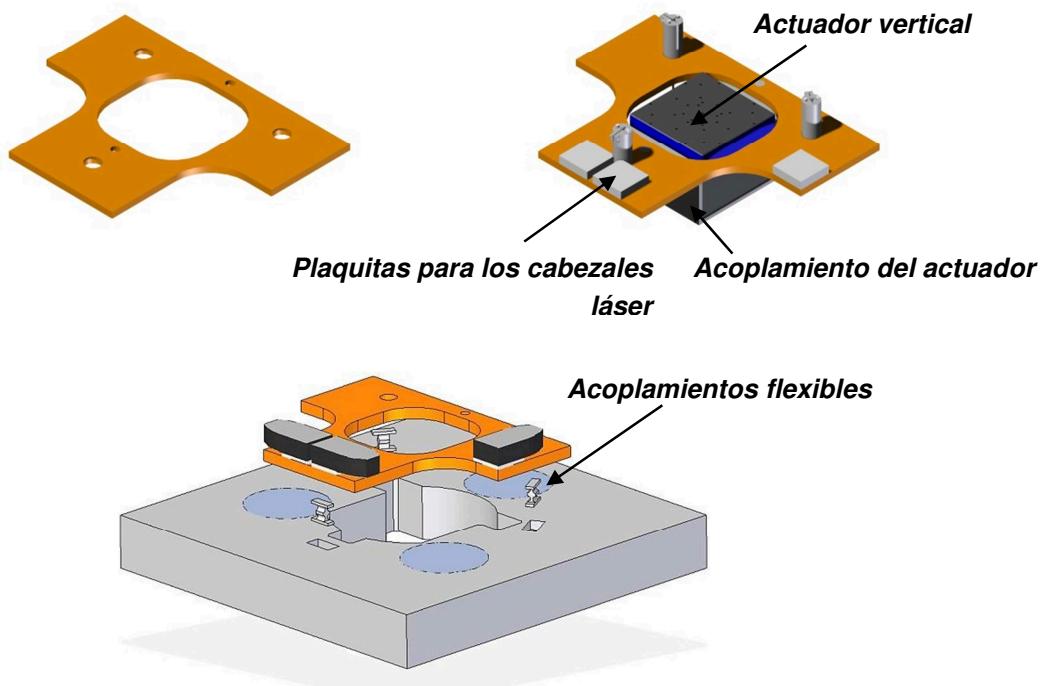
**Figura I 18** Superficies de deslizamiento

### Marco metrológico inferior (Zerodur)

Se trata de un elemento fundamental, puesto sobre él se sitúan los cabezales láser encargados de medir el movimiento y, por lo tanto, determinar la posición de la parte móvil.

Es fundamental minimizar el efecto que tiene sobre él las dilataciones por variación de la temperatura. Por ello, será fabricado en Zerodur, material que posee un muy bajo coeficiente de dilatación térmica. Además, irá unido a la base con sus correspondientes acoplamientos flexibles que permitan movimiento relativo entre el Zerodur y el aluminio cuando se produzcan cambios térmicos.

Por último, servirá de elemento de soporte del actuador que contiene la muestra. Así, el agujero central servirá para dejar espacio para ello y se dispondrán los agujeros necesarios para el acoplamiento del actuador.

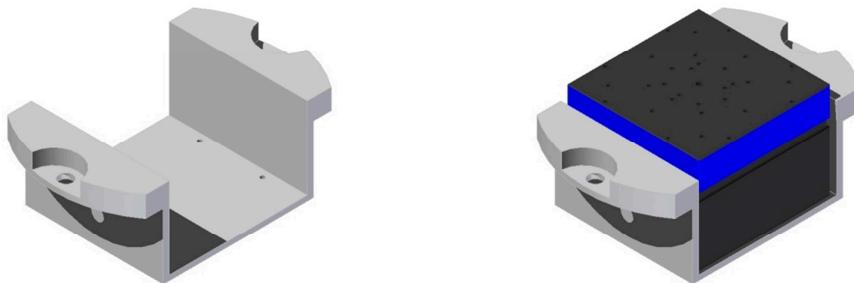


**Figura I 19** Marco metrológico inferior y unión a la base con acoplamientos flexibles

**Acoplamiento del actuador (Aluminio)**

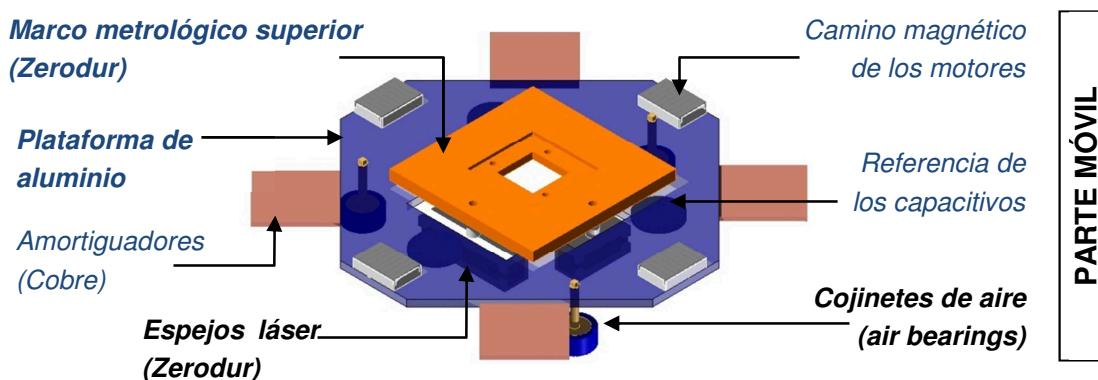
La muestra irá colocada sobre dos posicionadores: uno de ajuste grueso (actuador vertical) y sobre él, otro de ajuste fino (nano-posicionador) que aproximará la superficie de la muestra a la punta del AFM.

Estos actuadores van unidos al marco metrológico inferior gracias a un acoplamiento de aluminio diseñado para ello (véase **Figura I 20**).



**Figura I 20** Acoplamiento del actuador vertical

### I.1.2.2 Componentes para fabricación de la parte móvil



**Figura I 21** Parte móvil. (Componentes para fabricación en azul)

La parte móvil es donde se transporta el AFM y, por tanto, la encargada de su posicionamiento. Toda ella, es movida gracias a los motores lineales que ejercen fuerzas sobre los elementos que hacen de camino magnético.

Esta fuerza no debe ser muy grande, pues el desplazamiento es posible con rozamiento prácticamente nulo gracias a la película de aire que crean los cojinetes de aire.

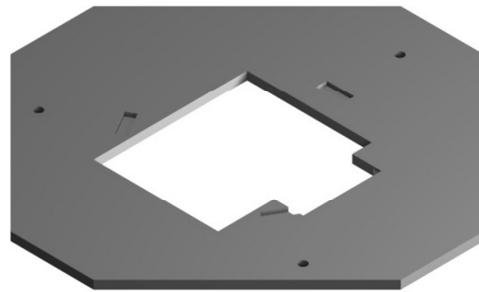
Por último, cabe decir que se han incorporado unos amortiguadores utilizando el mismo concepto y diseño que en la tesis [MAPS] (1) desarrollada por la Universidad de Carolina del Norte. No obstante, y visto el comportamiento estructural estudiado en este trabajo, disponer esas placas de cobre en voladizo suponen disminuir la rigidez del sistema de forma considerable, por lo que se estudiarán otras formas de disponer de amortiguar el movimiento. Para ello, será necesario disponer de los motores desarrollados que están siendo fabricados y comprobar su funcionamiento y posibilidades.

#### Plataforma de aluminio

La plataforma de aluminio, es elemento soporte de la parte móvil. A ella van acoplados los cojinetes de aire y sirve de apoyo del marco metrológico superior, camino magnético de los motores sobre los que actúa la fuerza encargada del movimiento y los amortiguadores.

Será fabricada en aluminio y se le realizarán los agujeros necesarios para disponer los elementos necesarios.

En trabajo desarrollado durante este PFC se observa que debe ser rigidizada y se propone un nuevo diseño para la misma. No obstante, en este apartado se exponen los elementos, tal cual han sido recibidos del diseño original (véase **Figura I 22**).

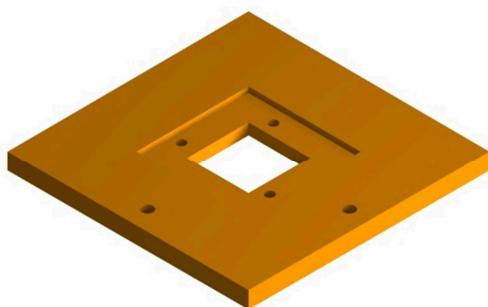


**Figura I 22** Plataforma de aluminio

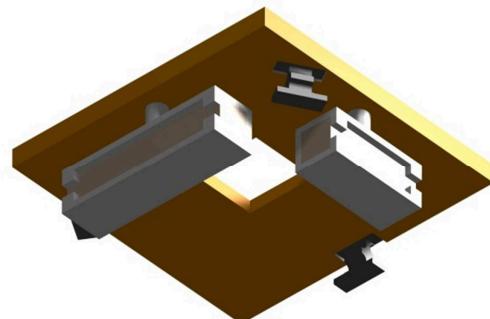
#### Marco metrológico superior (Zerodur)

Éste es el elemento sobre el que se colocará el AFM y, en consecuencia, es fundamental para el correcto funcionamiento del sistema. Tendrá incorporados, además, los espejos del sistema láser de medición y al estar fabricado en Zerodur, irá unido a la plataforma de aluminio con los mismos acoplamientos flexibles que el marco inferior.

En este trabajo, se estudian el cambio de posición relativo de los espejos en el rango de movimiento de la parte móvil. Es por ello, que la deformación de este elemento, influye directamente en la precisión del posicionamiento y de la medición de los láseres.



**Figura I 23** Marco metrológico inferior

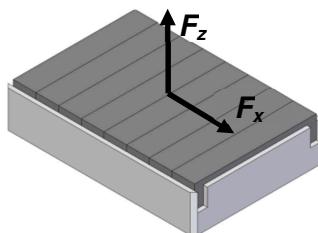


**Figura I 24** Vista inferior del marco metrológico superior con acoplamientos flexibles y espejos

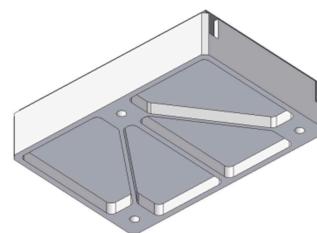
### Camino magnético de los motores

Los motores lineales, son un tipo de servo-motor síncrono sin escobillas. Trabajan como motores rotativos, pero abiertos y desenrollados a lo largo de una superficie. Así, mediante la interacción electromagnética de la parte primaria (bobina) y la secundaria (imanes permanentes), se convierte la energía eléctrica en energía mecánica lineal con un alto nivel de eficiencia (6).

Estos motores son capaces de generar fuerzas duales: una fuerza horizontal en el eje de desplazamiento y otra perpendicular a la superficie. Por ello, son muy apropiados para utilizar en sistemas que emplean partes en levitación con aire. La incorporación de una matriz de imanes Halbach posibilita la creación de las citadas fuerzas, así como la concentración del flujo magnético en un único lado de la matriz (véanse **Figura I 25** y **Figura I 26**) (1) (6).

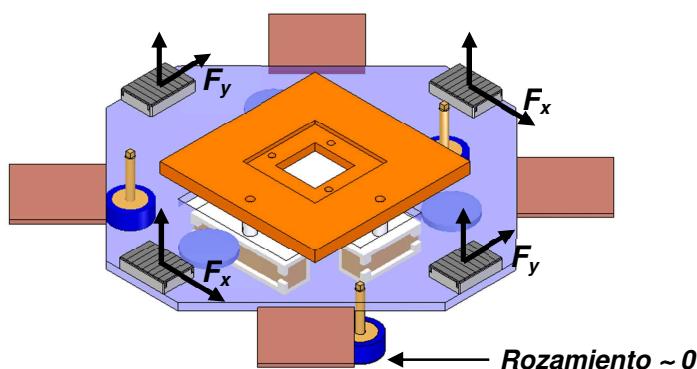


**Figura I 25** Fuerzas que actúan sobre la matriz de imanes



**Figura I 26** Vista inferior de la carcasa de la matriz de imanes

Así, disponiendo esta matriz de imanes sobre la parte móvil (véase **Figura I 27**) y la parte fija encargada de generar el campo magnético en la parte fija superior, se consigue unas fuerzas sobre la parte móvil que permiten el movimiento relativo.



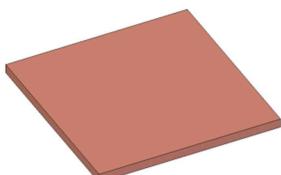
**Figura I 27** Fuerzas actuantes sobre las matrices de imanes dispuestas sobre la plataforma de aluminio de la parte móvil

La parte del estator (bobinado), es decir, la parte del motor fija que no se mueve, se describe en el apartado **Anexo I.1.2.3 - Componentes para fabricación de la parte fija superior**.

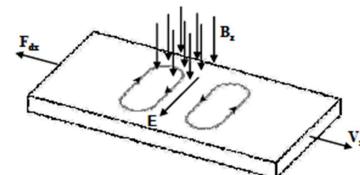
### Amortiguadores (cobre). (Principio de funcionamiento de la amortiguación)

Los amortiguadores serán aquellos elementos que generen fuerzas que se opongan al movimiento. Debido a que no se tiene rozamiento en la parte móvil, es necesaria la incorporación de elementos que permitan alcanzar el equilibrio de fuerzas y conseguir movimiento uniforme. Es obvio que, en caso de no disponer de amortiguación ni rozamiento, tendríamos una aceleración continua al aplicar una fuerza y este movimiento nunca se detendría.

Para un primer diseño, se tomó la misma idea y con la misma configuración y dimensiones que el sistema de la tesis [MAPS] (1). El principio de funcionamiento consiste en la aparición de corrientes de Foucault sobre una placa de cobre que se mueve en un campo magnético fijo y perpendicular a la superficie principal de la placa de cobre. De este modo, dichas corrientes generan una fuerza en sentido contrario al movimiento, y que es proporcional a la velocidad del movimiento (véase **Figura I 29**), así como a las características geométricas de la placa de cobre y al cuadrado del campo magnético perpendicular a ella.

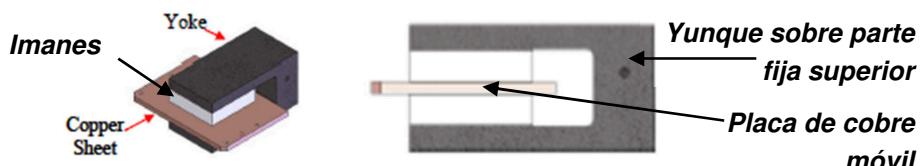


**Figura I 28** Placa de cobre



**Figura I 29** Fuerzas generadas

Para generar el campo magnético se dispone de unos imanes sobre la parte fija, colocados en un yunque de hierro para dirigir el flujo y lograr que sea lo más perpendicular posible.

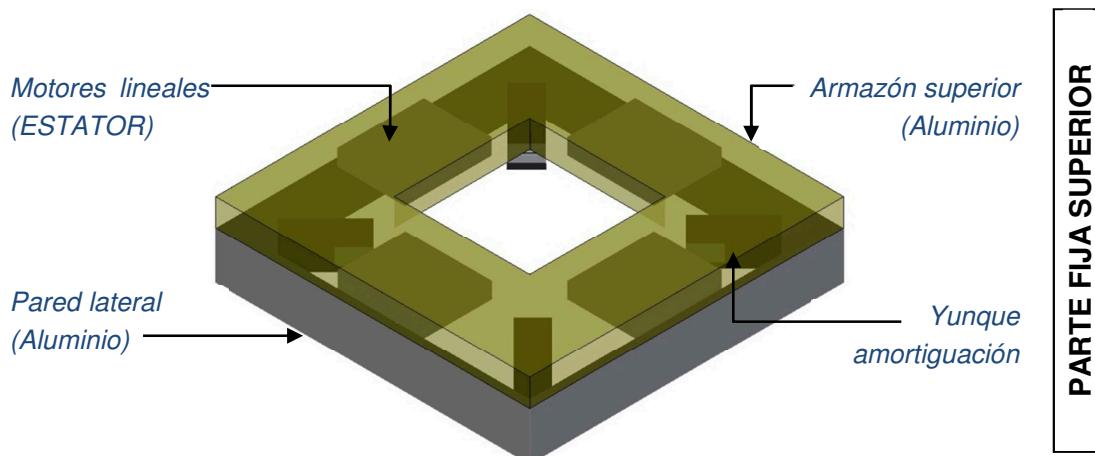


**Figura I 30** Sistema de amortiguación completo

Sin embargo, los motores lineales introducidos en nuestro sistema permiten amortiguar el movimiento. Así, será necesario diseñar este elemento después de que sean recibidos dichos motores y se prueben en el laboratorio todas sus posibilidades. Por lo tanto, es de esperar que la amortiguación sufra importantes variaciones en el modelo final, pues según se ha visto en los análisis realizados en este PFC, resulta un elemento problemático que repercute muy negativamente en la rigidez del sistema.

Además, en el nuevo diseño propuesto, se ha optado por eliminar estas placas de cobre, consiguiendo un modelo más compacto. La amortiguación se tratará de conseguir con los propios motores lineales si es posible o mediante placas de cobre integrados de forma más compacta en la parte móvil.

### I.1.2.3 Componentes para fabricación de la parte fija superior



**Figura I 31** Parte fija superior. (Componentes para fabricación en azul)

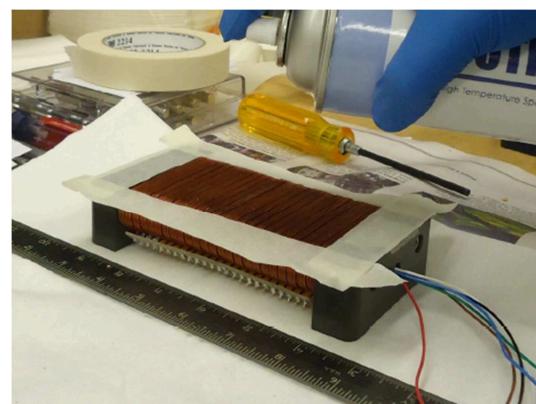
En la parte fija superior; el armazón, que será fabricado en aluminio, servirá de elemento estructural para albergar la parte fija de los motores lineales, así como los elementos fijos correspondientes a la amortiguación. Así pues, se podría decir que contiene los elementos fijos de los sistemas necesarios para el movimiento.

El yunque para la amortiguación ya se ha descrito en la parte anterior cuando se ha descrito su correspondiente parte móvil (las placas de cobre).

En cuanto a los motores lineales, no obstante, solo se ha descrito la parte móvil (los caminos magnéticos). Así, la parte del estator de los motores lineales que es la parte que va a esta parte fija superior, será la encargada de generar el campo magnético que genere las fuerzas en la matriz de imanes. Estos elementos han sido mandados a fabricar por parte de la Universidad de Carolina del Norte. A pesar, de no haber sido recibidos a la finalización de este PFC, sí se disponen de imágenes del proceso de fabricación que han sido enviadas por dicha Universidad.



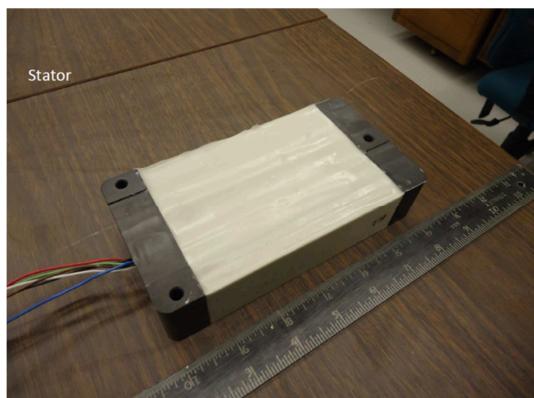
**Figura I 32** Bobinado del estator de los motores lineales



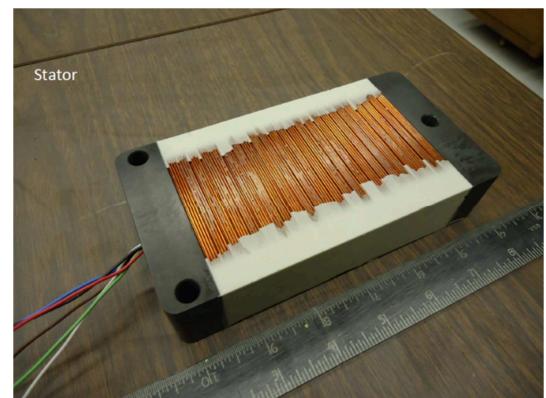
**Figura I 33** Adición de pegamento aglutinantes para el bobinado



**Figura I 34** Recubrimiento del bobinado



**Figura I 35** Parte posterior de los estatores



**Figura I 36** Parte de cara a los caminos magnéticos

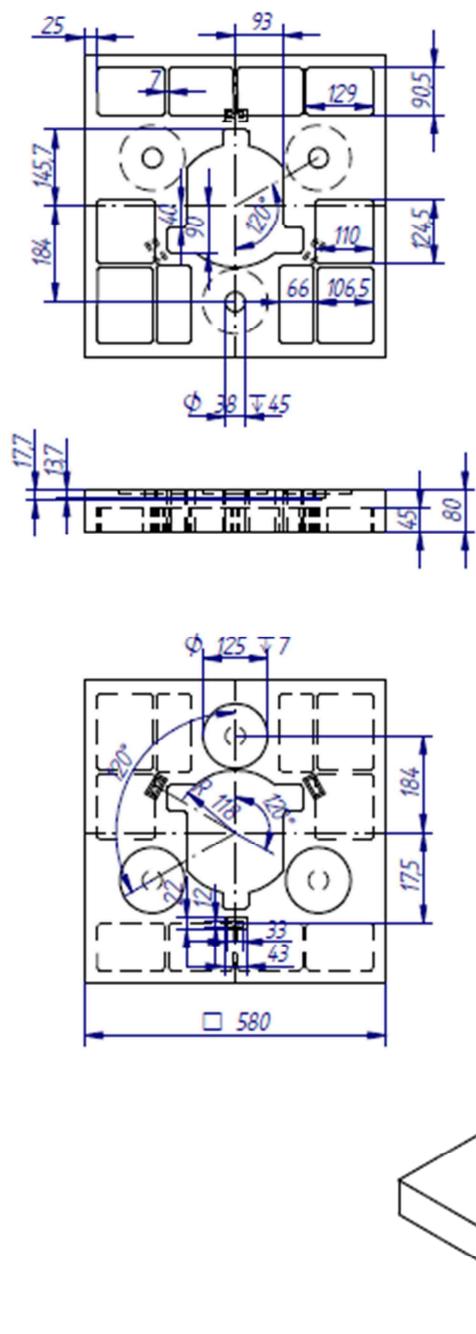


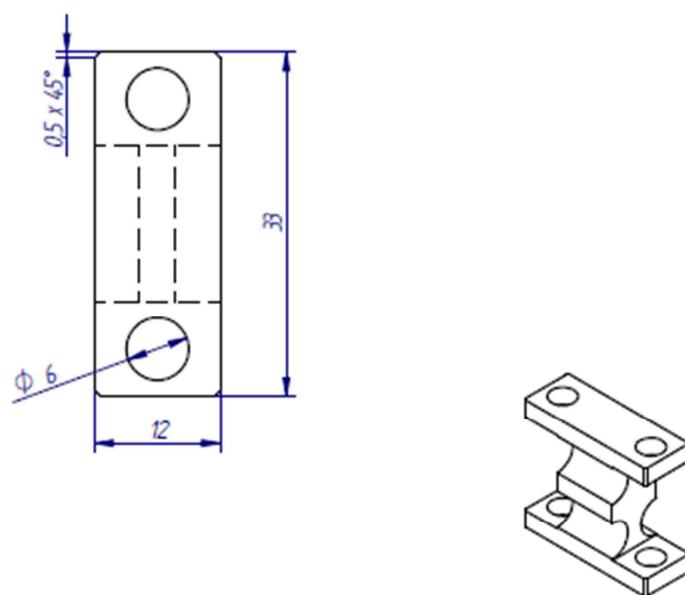
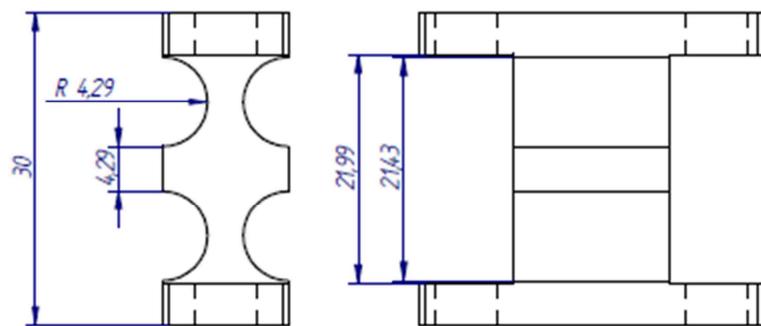
## I.2 MODIFICACIONES REALIZADAS SOBRE EL DISEÑO ORIGINAL. DETALLES CONSTRUCTIVOS

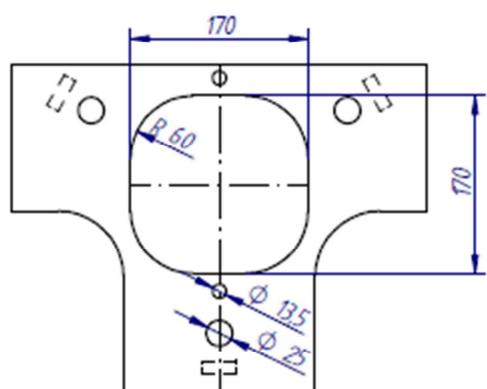
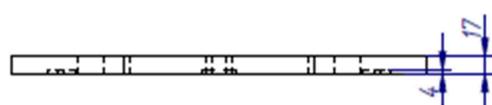
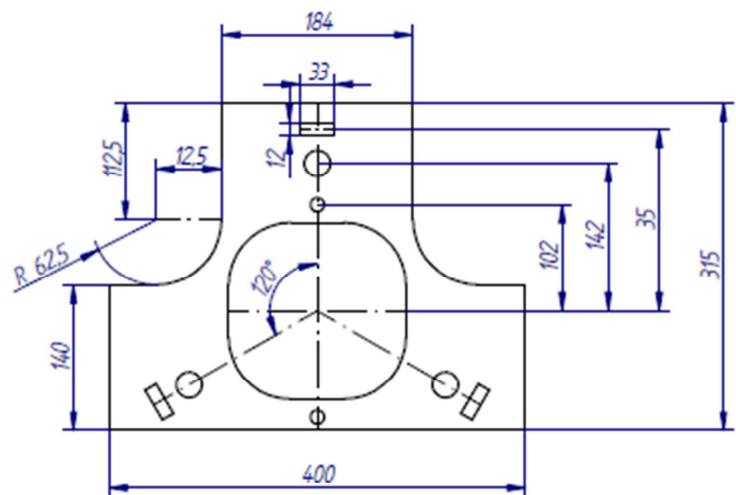
En el anterior capítulo de este **ANEXO I** se han descrito los principales elementos que conforman la plataforma. Sin embargo, a lo largo de este trabajo, se han realizado las modificaciones necesarias en algunos de ellos para el correcto comportamiento en servicio de la estructura del sistema.

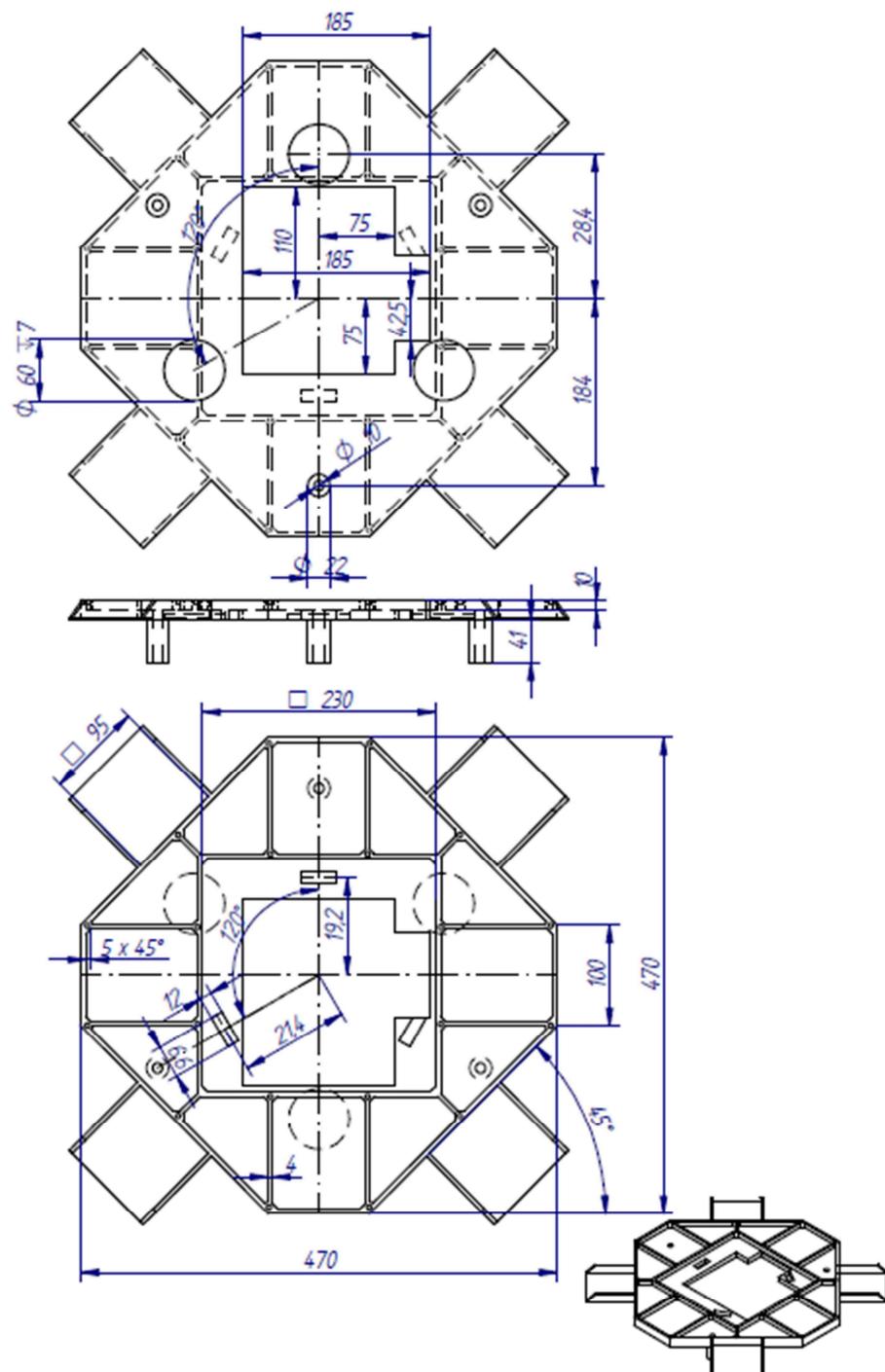
Es por ello que, en este apartado, se incluye el detalle constructivo de estas modificaciones realizadas. Se ha obviado el detalle constructivo de los elementos no modificados, puesto que ya fueron realizados en el trabajo predecesor (6).

Además, se ha determinado la forma en la que los marcos metrológicos se unen a sus respectivos soportes de aluminio mediante unos acoplamientos flexibles fabricados en acero inoxidable. Como ya se ha comentado, la función de estos acoplamientos es la de permitir el movimiento relativo entre piezas con diferente coeficiente de dilatación térmica.

**I.2.1 BASE**

**I.2.2 ACOPLAMIENTOS FLEXIBLES**

**I.2.3 MARCO METROLÓGICO INFERIOR**

**I.2.4 PLATAFORMA DE ALUMINIO DE LA PARTE MÓVIL**



## I.3 MATERIALES UTILIZADOS

En este tipo de aplicaciones para ingeniería de precisión es importante que los materiales utilizados reúnan una serie de condiciones dependiendo del elemento del que se trate.

Dejando a un lado los elementos comerciales, aquellas piezas que deben fabricarse pueden dividirse en cuatro grandes grupos.

Por un lado, tenemos los elementos que sirven de bancadas o soporte de otros elementos que requieren una mayor dedicación, tanto en la fabricación, como en los requisitos de material. Todos estos “elementos soporte” serán fabricados en un metal de bajo peso específico pues suelen ser de grandes dimensiones y, en otro caso, se vería incrementado notablemente el peso del conjunto. El material a utilizar será aluminio para elementos como la base, plataforma soporte de la parte móvil o el armazón superior de la parte fija superior

Las principales características del aluminio son:

Densidad: 2.7 g / cm<sup>3</sup>

Módulo elástico (E): 69 GPa

Coeficiente de dilatación térmica ( $\alpha$ ): 23.6  $\mu\text{m} / \text{m } ^\circ\text{C}$

Por otro lado, tenemos los elementos de gran importancia estructural, pero no son demasiado grandes. A pesar de ello, deformaciones de los mismos e imprecisiones en su fabricación, podría dar lugar a importantes problemas de rigidez y pérdida de precisión del sistema, de modo que se deberán fabricar en un material con gran módulo elástico y resistencia. Es por ello, que se utilizará acero inoxidable para elementos como los acoplamientos flexibles o las superficies de deslizamiento. Además, se tratarán adecuadamente para lograr un gran acabado superficial.

Se pueden encontrar numerosos tipos de aceros con numerosos tratamientos, no obstante como valores referencia de sus características se pueden tomar los siguientes valores:

Densidad: 8 g / cm<sup>3</sup>

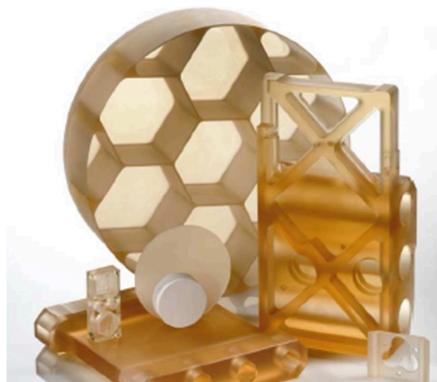
Módulo elástico (E): 200 GPa

Coeficiente de dilatación térmica ( $\alpha$ ): 17.3  $\mu\text{m} / \text{m } ^\circ\text{C}$

Además de estos, otros materiales serán utilizados en menor medida. Por ejemplo, cobre para las placas de la amortiguación o un material altamente ferromagnético pero sin grandes

propiedades mecánicas como el hierro para los imanes que forman el camino magnético de los motores.

Por último, y como material más característico de este tipo de aplicaciones, tenemos aquellos elementos que deben fabricarse con un material de muy bajo coeficiente de dilatación térmica. Existen diversas soluciones para ello, como el Invar o el Carburo de Silicio. Sin embargo, el Invar posee un excesivo peso específico (similar al acero) y el Carburo de Silicio todavía no está muy asentado en el mercado. Es por ello, que se ha elegido el Zerodur (véase **Figura I 37**) como material de fabricación de estos elementos que son, básicamente, los marcos metrológicos.



**Figura I 37** Piezas fabricadas en Zerodur (16)

El Zerodur, se comporta a rotura como un vidrio (fractura frágil), lo cual implica que no posee un límite elástico concreto. Su fractura dependerá de cómo haya sido tratado y el desgaste superficial que haya sufrido cada pieza de este material en concreto.

Así, una pieza de Zerodur con araños o mecanizada de una determinada forma, puede sufrir rotura frágil con unos esfuerzos muy inferiores a los de otra pieza del mismo material pero con un desgaste diferente.

No obstante, se puede considerar como norma general una tensión máxima de 10 MPa para asegurar la no rotura del material en servicio. Tomaremos pues este valor como referencia para los análisis de resistencia realizados.

En cuanto a las características térmicas y mecánicas, se consideran los siguientes valores (16):

Densidad: 2.53 g / cm<sup>3</sup>

Módulo elástico (E): 91 GPa

Coeficiente de dilatación térmica ( $\alpha$ ): 0.05  $\mu\text{m} / \text{m } ^\circ\text{C}$

---

**ANEXO II**

**Ansys Workbench como  
herramienta de cálculo  
por elementos finitos**



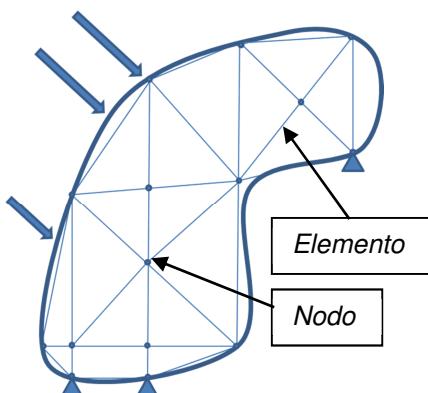
## II.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

El software empleado en la simulación para la validación estructural del sistema se trata de Ansys Workbench, el cual emplea el método de elementos finitos (MEF).

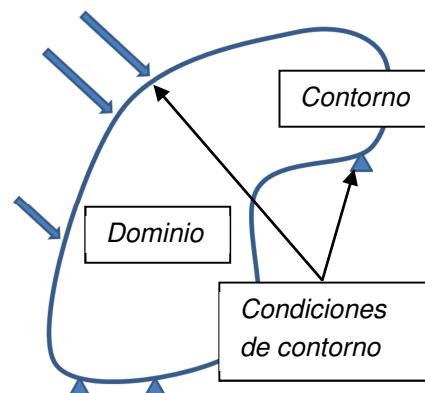
Este método permite conocer el comportamiento estructural (en cuanto a deformaciones, frecuencias de resonancia, resistencia, etc.) de las piezas que componen el sistema objeto de estudio. Su aplicación ingenieril ha tenido un gran desarrollo e implantación en los últimos años, pudiendo predecir la validez de lo que se va a fabricar de forma próxima a la realidad aunque nunca de manera exacta.

La idea general consiste en la división de un espacio continuo en pequeños elementos interconectados por una serie de puntos denominados nodos (véase **Figura II 1**). Las ecuaciones que explican el comportamiento del espacio continuo, se aplicarán entonces a cada uno de los elementos que lo conforman. De este modo, pasamos de un modelo matemático con infinitas incógnitas a un sistema de ecuaciones con  $n$  ecuaciones y  $n$  incógnitas, siendo  $n$ , a su vez el número de nodos. De este modo, conociendo el estado (de tensión, deformación, temperatura, etc.) de un nodo, podemos, conocer aplicando las ecuaciones correspondientes, el estado de los nodos contiguos al mismo (17).

Es aquí donde toma importancia el concepto de condiciones de contorno. Es decir, tenemos que definir un estado conocido para algunos de estos nodos, de modo que a partir del conocimiento de los mismos, se pueda determinar el estado de todos los demás aplicando las ecuaciones. Estas condiciones, serán aquellas que, conocidas de inicio, determinarán el comportamiento del sistema. Entre ellas, se encuentran condiciones de temperatura, desplazamiento de alguno de los nodos, fuerzas externas, etc. (véase **Figura II 2**). El número de condiciones de contorno conocidas de inicio debe ser tal que permita la solución del sistema de ecuaciones planteado.



**Figura II 1** División del dominio para aplicación del MEF



**Figura II 2** Vista esquemática de las condiciones de contorno

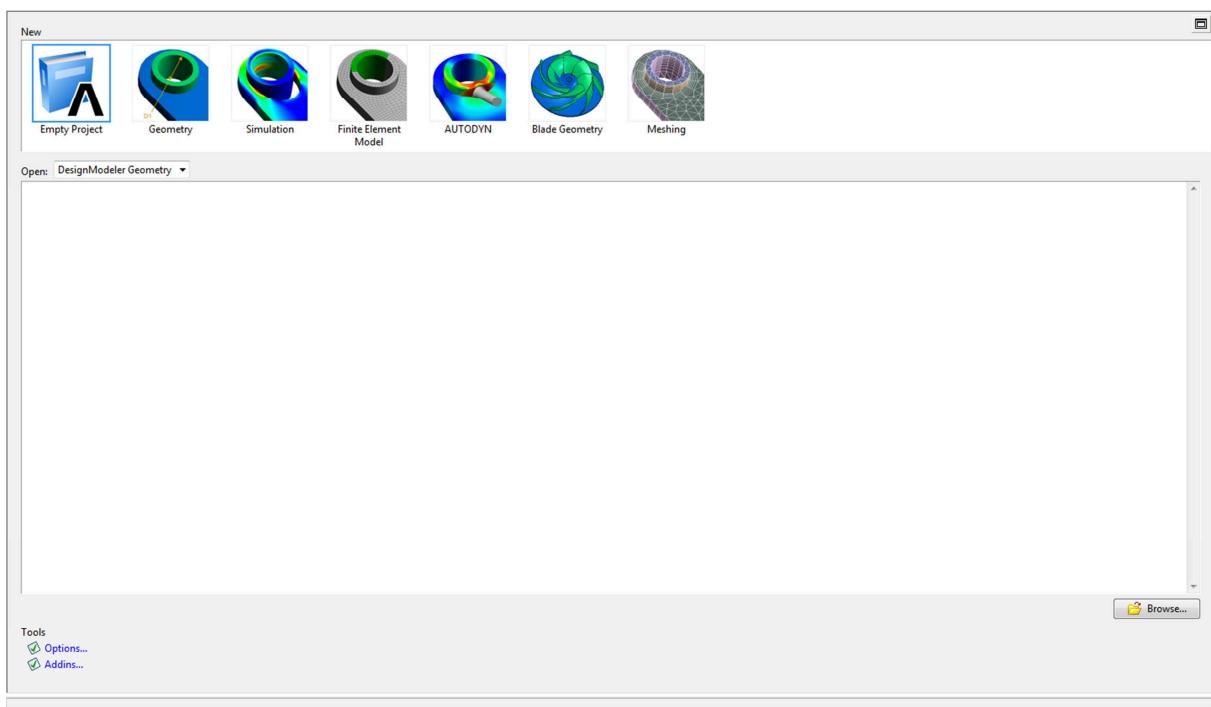
Por otra parte, se denomina mallado a la división del dominio en distintos elementos. Cuanto mayor sea el número de elementos (menor tamaño de los mismos), más exacta será la solución obtenida, pues la malla se aproxima mejor a la geometría del sistema. Sin embargo, es obvio que el coste computacional puede aumentar considerablemente al aumentar el número de ecuaciones e incógnitas. Es por ello necesario llegar al compromiso adecuado entre exactitud de los resultados y complejidad del modelo matemático a resolver.

En los siguientes capítulos de este anexo, se detalla cómo se aplican todos estos conceptos al sistema objeto de análisis de este trabajo. Además, se ofrece una descripción de la interfaz del software Ansys Workbench y de cómo se configura y tiene lugar en el mismo la simulación por elementos finitos.

## II.2 INTERFAZ DE ANSYS WORKBENCH

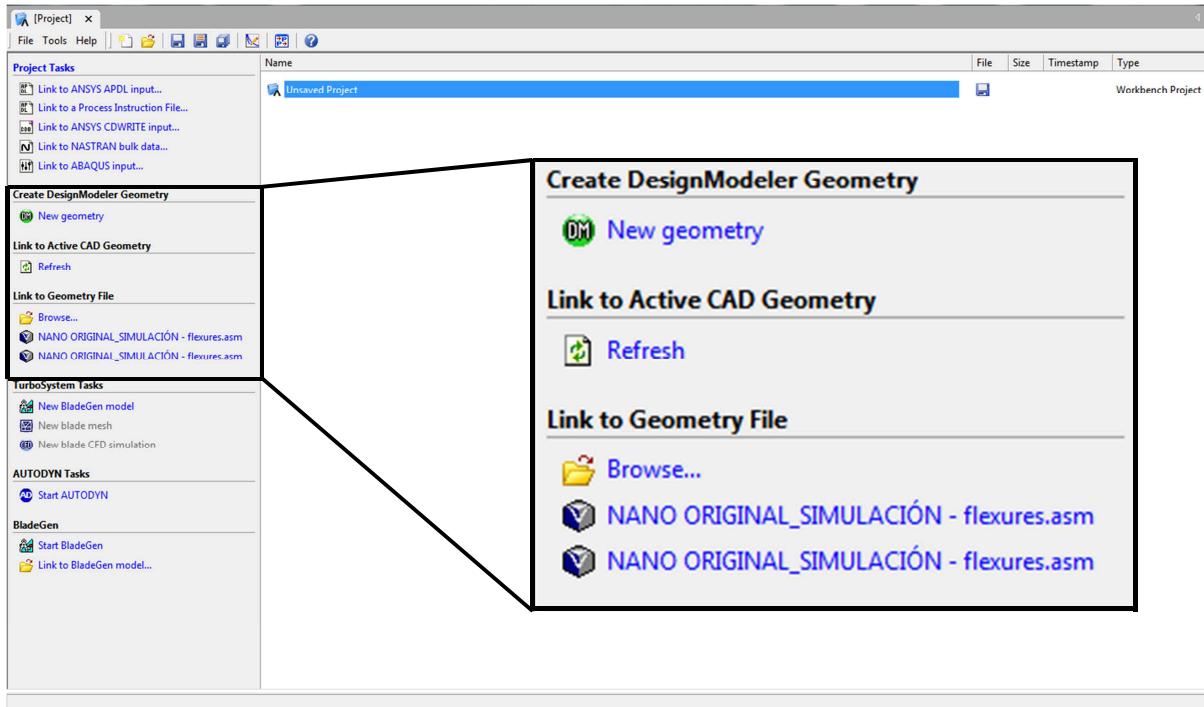
En este capítulo se describe la interfaz de Ansys Workbench y cómo configurar las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo. Existen muchas opciones que no son tratadas en este anexo puesto que lo que se pretende no es realizar un manual exhaustivo del software, sino exponer aquellos aspectos de utilidad en los análisis realizados. Además, servirá para aclarar determinados aspectos relacionados con simplificaciones, suposiciones, etc. De este modo, se tiene la posibilidad de usar las mismas condiciones o similares en futuras simulaciones.

Al abrir el programa nos encontramos con la pantalla de inicio (véase **Figura II 3**). En ella, se tiene la opción de comenzar un nuevo proyecto (“Empty Project”).



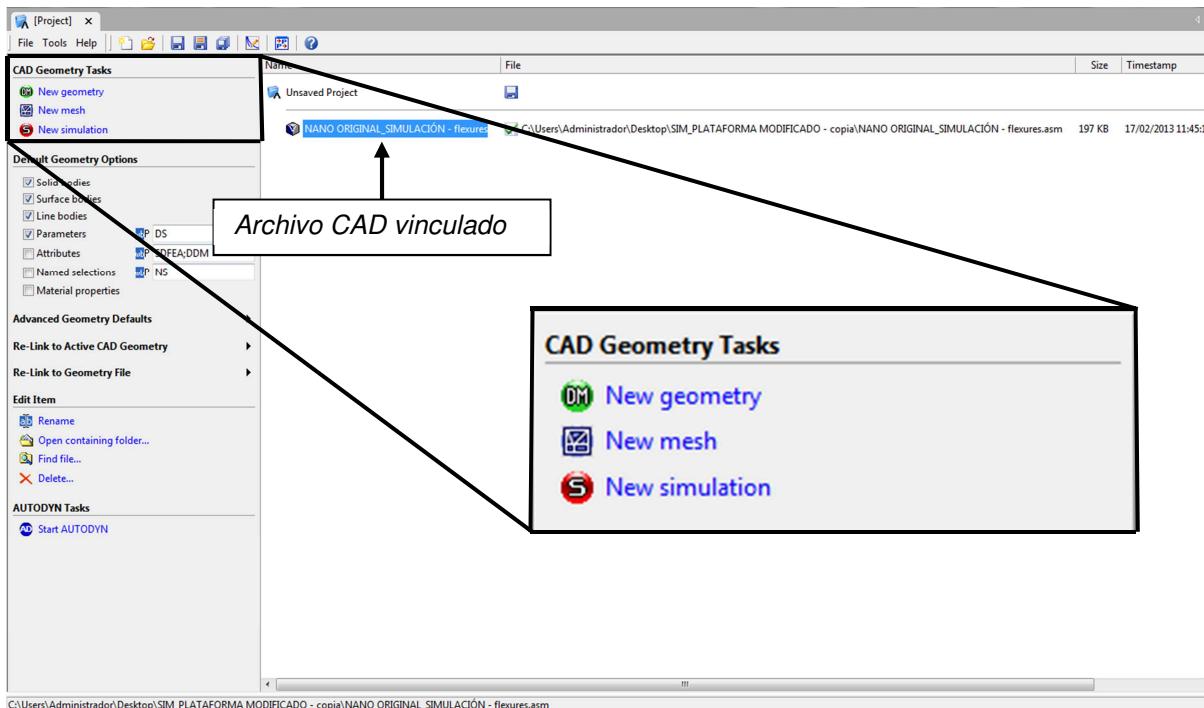
**Figura II 3** Pantalla inicial de Ansys Workbench

Una vez en la siguiente pantalla (véase **Figura II 4**), se encuentra la posibilidad de realizar una geometría 3D desde el mismo Ansys (esta opción ya estaba disponible en la pantalla inicial). Sin embargo, se pretende vincular un modelo 3D realizado directamente en un programa CAD (en este caso Solid Edge). Para ello, se utiliza el menú “*Link to Geometry File*” a la izquierda de la pantalla y se busca el fichero deseado. Una vez hecho esto, cualquier modificación en el fichero CAD, podrá ser reflejada en Ansys con tan solo seleccionar “*Refresh*” en el menú “*Link to Active CAD Geometry*”.



**Figura II 4** Pantalla de nuevo proyecto. Vinculación archivos CAD

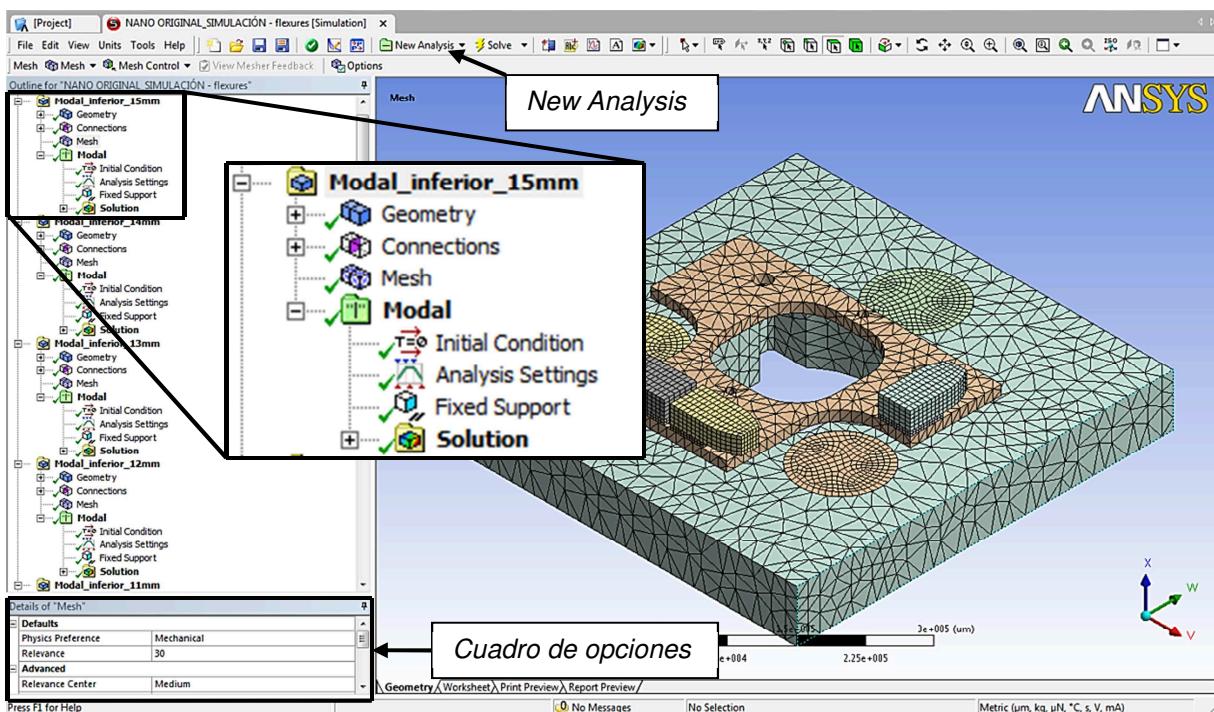
Cuando se vincula un archivo CAD, aparece la opción de “*New simulation*” (véase **Figura II 5**).



**Figura II 5** Pantalla de nuevo proyecto con archivo CAD vinculado

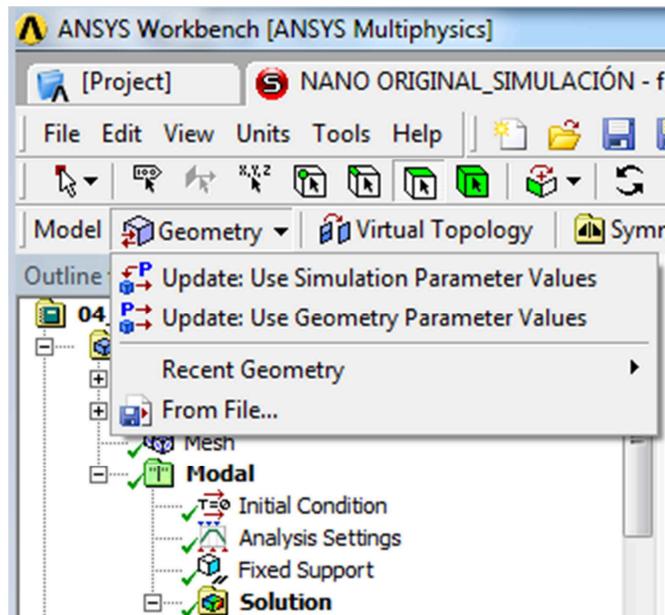
Una vez en la pantalla de simulación, aparece una vista 3D del modelo objeto de estudio. En la parte superior, se encuentran las barras de herramientas donde podemos seleccionar un nuevo análisis a realizar (modal, estático, térmico, etc.). Cada simulación aparece a la izquierda de la pantalla un explorador con sus condiciones de geometría (“*Geometry*”), uniones entre cuerpos (“*Connections*”), mallado (“*Mesh*”) y análisis realizado (para cada simulación se pueden realizar varios análisis; por ejemplo: modal y estático).

En relación a la nomenclatura utilizada en este anexo, se ha de aclarar que con simulación se refiere a la carpeta del explorador que contiene cada geometría con uno o varios análisis en ella (que pueden ser modal, estático, térmico, etc.); es decir, en este caso una simulación con un análisis modal correspondería al zoom realizado en la **Figura II 6**. Se observa que se han añadido varias simulaciones, de modo que cada una corresponde con un espesor de la placa de Zerodur (marco metrológico inferior).



**Figura II 6** Interfaz de la pantalla de simulación de Ansys Workbench

Además, si entre las diferentes simulaciones, existen pocas diferencias, se puede copiar y pegar una a continuación de otra y variar solo aquello en lo que difieran. Por ejemplo; en este caso, se ha variado el espesor del marco metrológico. Para ello, se han copiado y pegado la carpeta de simulación varias veces actualizando únicamente la geometría (véase **Figura II 7**).



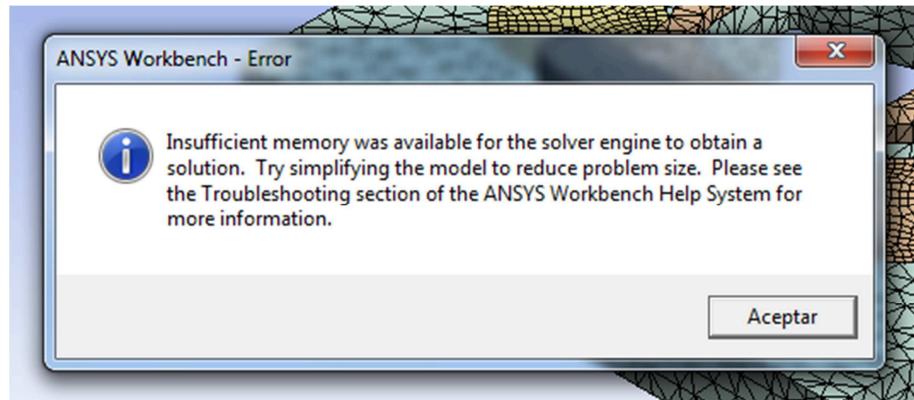
**Figura II 7** Herramienta de actualización de geometría desde la pantalla de simulación

Por supuesto, una vez cargada la geometría, se debe asociar un material a cada pieza. Para ello, se despliega la carpeta Geometry del explorador y se selecciona el material para cada pieza en el cuadro de opciones. Se puede elegir un material de la biblioteca de piezas o crear uno nuevo con las propiedades deseadas.

En los siguientes capítulos del manual realizado en este anexo se explican las diferentes opciones de configuración para los análisis llevados a cabo. En ellos, se entra en detalle, en el mallado y las cargas y apoyos considerados.

## II.3 ANÁLISIS MODAL. CONFIGURACIÓN Y SIMULACIONES

En el análisis modal, encontramos el problema del gran coste computacional que supone. Esto nos da el problema de que mallas muy finas que aportarían resultados muy precisos derivan en tiempos muy elevados de simulación, e incluso incapacidad del sistema utilizado para su resolución (véase **Figura II 8**).



**Figura II 8** Mensaje de error en la solución debido a un mallado muy fino

Por ello, en las opciones de mallado para este análisis modal, se ha seleccionado “Relevance: 30” y “Relevance Center: Medium”. Estos valores fueron los que daban lugar a un mallado más fino sin el mensaje de error y con un buen tiempo de resolución.

### II.3.1 CONFIGURACIÓN DE LA PARTE FIJA INFERIOR PARA EL ANÁLISIS MODAL

Se detalla aquí, las consideraciones que se han tenido para el análisis modal de la parte fija inferior. Se muestra como se han elegido los apoyos y otras condiciones de contorno, así como el mallado realizado.

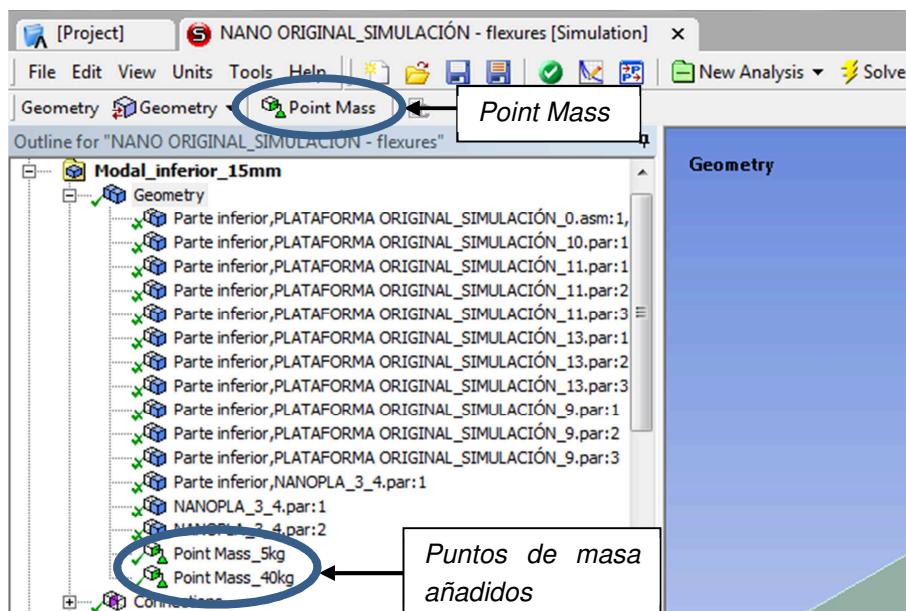
Por último se muestran todas las formas modales en imágenes para las diferentes frecuencias de resonancia.

#### II.3.1.1 Cargas y apoyos en el análisis modal de la parte fija inferior

En cuanto a las cargas a introducir. Se puede observar como en el modelo 3D se han eliminado algunos elementos. Éstos son la parte fija superior que apoya en la base por las paredes laterales y el acoplamiento con el actuador en z que va unido al marco metrológico infe-

rior. Con ello, conseguimos reducir el coste computacional al reducir el número de cuerpos en la simulación. Sin embargo, no podemos obviar su presencia y por eso, han sido colocados en su lugar los denominados puntos de masa (*Point Mass*), opción que ofrece Ansys Workbench para este tipo de simplificaciones. Para la elección de la masa, se ha estimado cual es la masa de los elementos que han sido sustituidos por el punto de masa. En este caso, 5 kg para el acoplamiento del actuador vertical y el propio actuador; así como 40 kg sobre la pared lateral de la base que representan la parte fija superior.

Para la selección de los puntos de masa, se debe abrir la pestaña de geometría (“*Geometry*”) y una vez ahí seleccionar “*Point Mass*” en la barra de herramientas (véase **Figura II 9**).

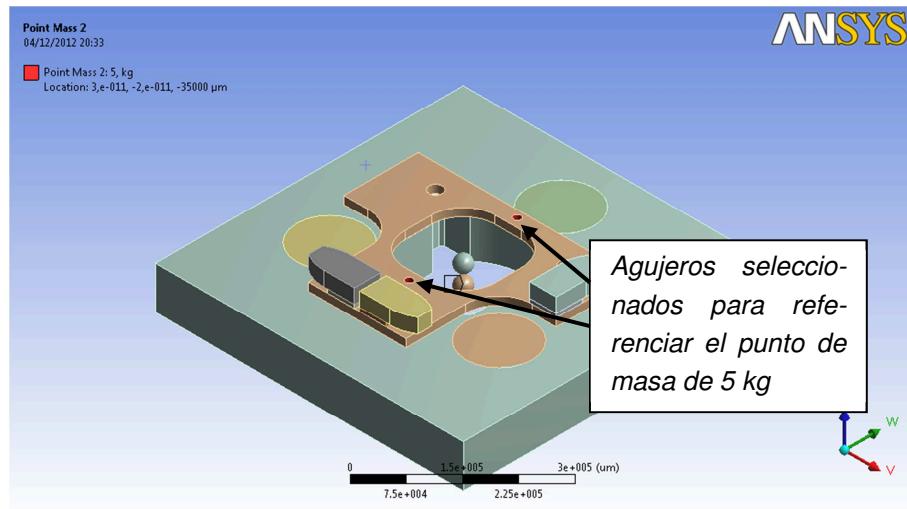


**Figura II 9** Adición de un punto de masa

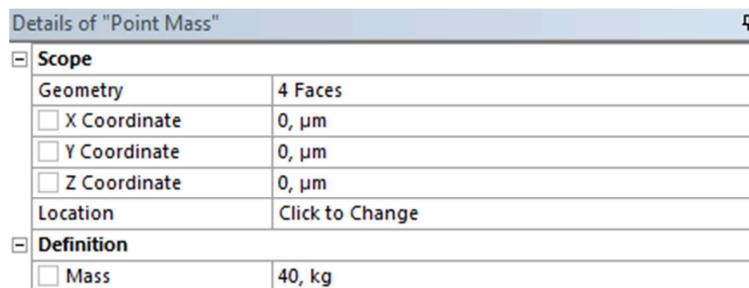
En cuanto a las opciones de configuración que ofrece el punto de masa encontramos que se requiere una geometría sobre la que asentar la masa añadida. Esta geometría será aquellas superficies donde vayan asentados o aquellos agujeros donde vayan atornillados los elementos sustituidos (véase **Figura II 10**, **Figura II 11**, **Figura II 12** y **Figura II 13**).

Details of "Point Mass 2"	
Scope	
Geometry	2 Faces
X Coordinate	3,e-011 μm
Y Coordinate	-2,e-011 μm
Z Coordinate	-35000 μm
Location	Click to Change
Definition	
Mass	5, kg

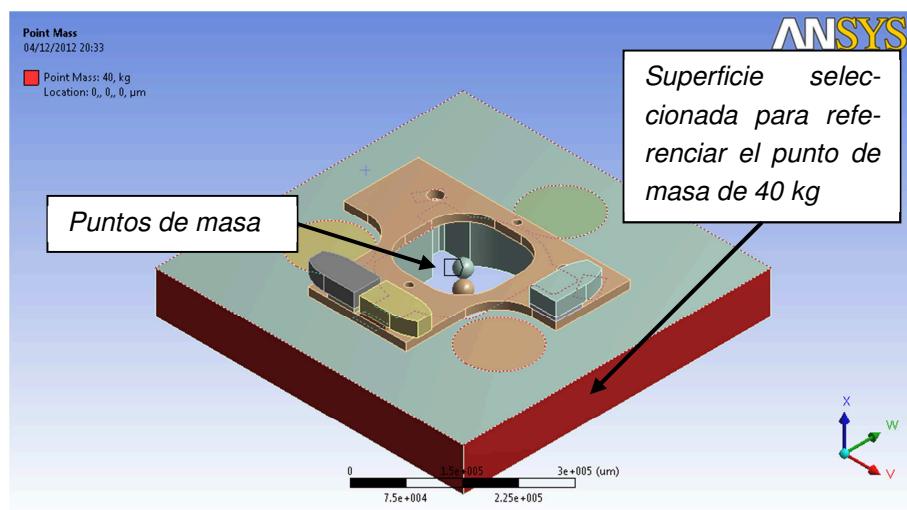
**Figura II 10** Cuadro de opciones del punto de masa que sustituye al acoplamiento del actuador vertical y el propio actuador (5 kg)



**Figura II 11** Referencia del punto de masa que sustituye al acoplamiento del actuador y al propio actuador (5 kg)



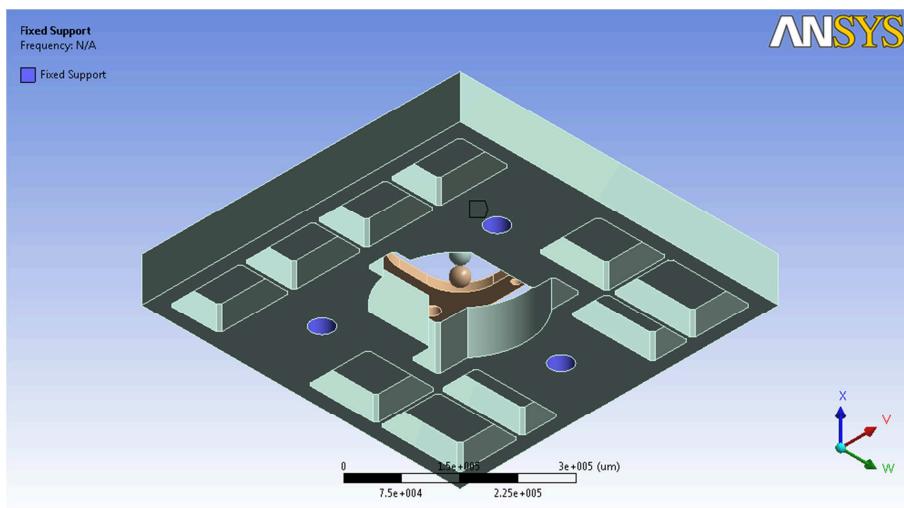
**Figura II 12** Cuadro de opciones del punto de masa que sustituye a la parte fija superior (40 kg)



**Figura II 13** Referencia del punto de masa que sustituye a la parte fija superior (40 kg)

Es importante observar el hecho de que estas cargas no son consideradas por Ansys Workbench como fuerzas externas; sino como una elemento geométrico más que ejercerán una fuerza sobre los elementos que se colocan cuando se introduce la fuerza de la gravedad que si se considera una acción externa. Es decir, son masas y no fuerzas (en el análisis modal no se permiten cargas externas debidas a fuerzas).

En cuanto a los apoyos considerados, los consideramos fijos por los agujeros realizados para acoplar a la mesa anti-vibración (que hará de bancada) en la parte inferior de la base (véase **Figura II 14**).



**Figura II 14** Apoyos fijos de la base (en azul)

### II.3.1.2 Mallado para la parte fija inferior en el análisis modal

Debido al problema encontrado para hallar la solución con un mallado muy fino, se ha procedido a comprobar la influencia que tienen las opciones de configuración de la malla en el primer modo de resonancia de esta parte fija inferior.

Así, se ha mallado la geometría modificando las opciones de *Relevance* y *Relevance Center* desde valores que proporcionan una malla más gruesa, a valores para mallas más finas con mayor número de elementos.

Existen tres opciones para *Relevance Center*, que son *Coarse*, *Medium* y *Fine* de más gruesa a más fina.

Asimismo, para cada una de ellas, podemos elegir un *Relevance* entre -100 y 100, siendo 100 la malla más fina.

Por lo tanto se ha resuelto el problema con diferentes configuraciones cada una de ellas más fina (véase **Tabla II 1** y **Tabla II 2**), hasta que encontramos el mensaje de error.

RELEVANCE <i>Coarse</i>	nº nodos	Primera frecuencia de resonancia (Hz)
-100	15516	192,46
-80	16780	188,61
-60	17384	189,04
-40	17971	187,94
-20	19032	190,44
0	19280	187,87
20	23438	187,87
40	26630	186,60
60	27960	186,64
80	33325	184,18
100	34325	185,70

**Tabla II 1** Resultados con la opción *Coarse*

RELEVANCE <i>Medium</i>	nº nodos	Primera frecuencia de resonancia (Hz)
-100	33078	186,60
-80	34443	186,85
-60	37196	187,16
-40	38932	187,04
-20	40851	185,88
0	41154	184,59
20	47113	184,31
40	56554	183,99
60	61881	error
80	-	error
100	-	error

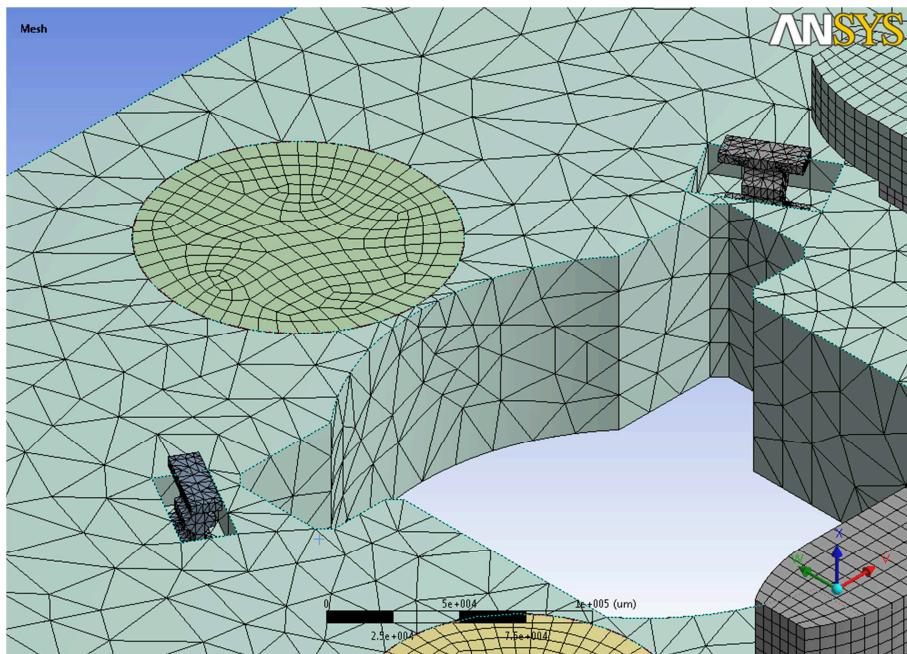
**Tabla II 2** Resultados con la opción *Medium*

nº nodos	Primera frecuencia de resonancia (Hz)
15516	192,46
16780	188,61
17384	189,04
17971	187,94
19032	190,44
19280	187,87
23438	187,87
26630	186,60
27960	186,64
33078	186,60
33325	184,18
34325	185,70
34443	186,85
37196	187,16
38932	187,04
40851	185,88
41154	184,59
47113	184,31
56554	183,99

**Tabla II 3** Resultados según  
número de nodos**Figura II 15** Estudio de validez del mallado

Se puede observar, como a partir de la opción “*Medium 0*”, que corresponde para esta geometría a unos 40000 nodos, no existe apenas variación en el resultado. Así, para mallados más finos, se puede considerar un error aceptable en la solución. Es importante el hecho de que la opción “*Relevance*” es relativa a la geometría, de modo que para una geometría más sencilla o de otras características puede ser que varíe el número de nodos, pero no habrá diferencias significativas en el error de los resultados. Por lo tanto, estos resultados se pueden extrapolar a los demás mallados realizados.

En la **Figura II 16** se aprecia el aspecto del mallado. Es esta vista se ha ocultado el marco metrológico para observar con detalle el mallado de los acoplamientos flexibles. Aquí, se aprecia la idoneidad de elegir esta forma de mallado (desde la opción “*Relevance*” y no eligiendo un tamaño para cada elemento). De este modo conseguimos que exista una adaptación relativa de la malla a cada elemento, dependiendo de la complejidad del mismo.



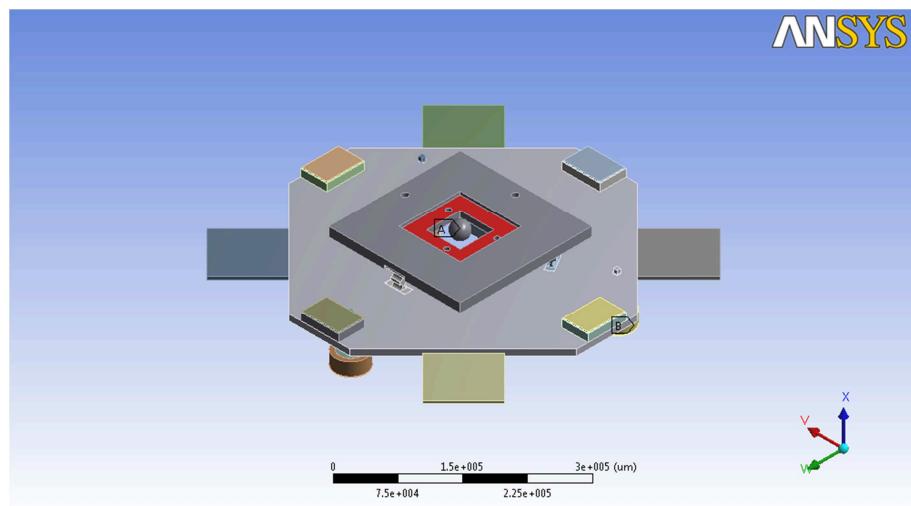
**Figura II 16** Detalle del aspecto del mallado de la parte fija inferior para análisis modal

### II.3.2 CONFIGURACIÓN DE LA PLATAFORMA MÓVIL PARA EL ANÁLISIS MODAL

Para la plataforma móvil, se hará uso de la experiencia en el análisis modal obtenida con la simulación anterior. Además, se debe configurar de forma coherente para obtener resultados con la misma precisión en ambos casos. Es decir, si se ha elegido una combinación de opciones para el mallado de la anterior simulación, se debe continuar con la misma configuración.

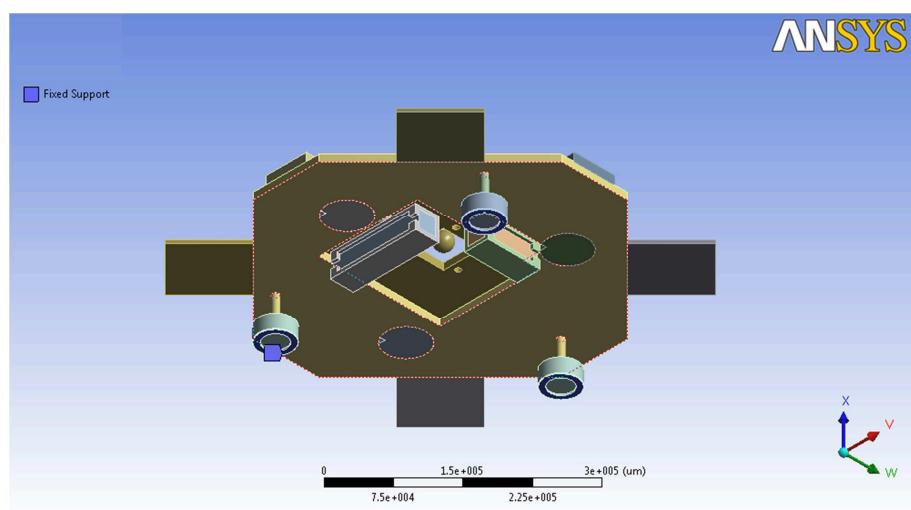
#### II.3.2.1 Cargas y apoyos en el análisis modal de la parte móvil

En este caso, se añadirá un punto de masa de 1 kg sobre el marco metrológico superior. Éste representará, el AFM con el posible acoplamiento que se diseñará en un futuro (véase **Figura II 17**).



**Figura II 17** Punto de masa de 1 kg representando al AFM. (Observar en rojo la superficie de referencia tomada)

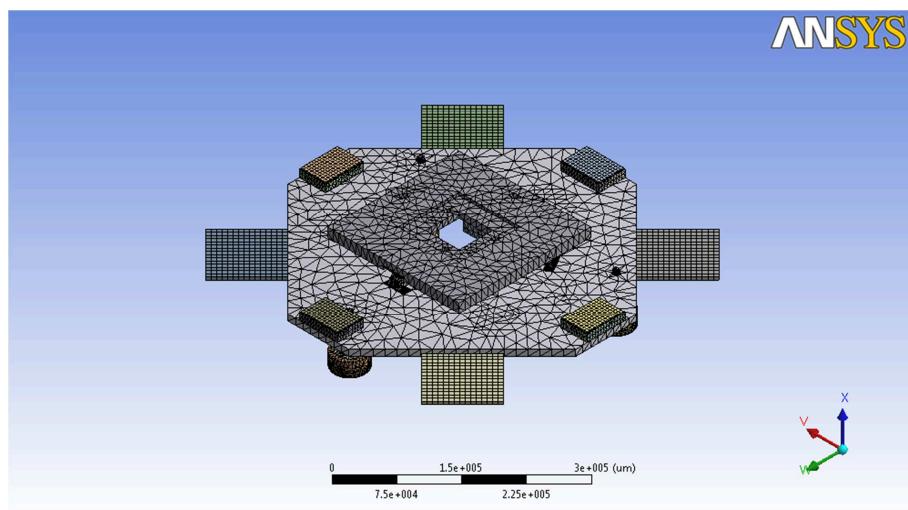
En cuanto a los apoyos, se considera fijo por la parte inferior de los cojinetes de aire (véase **Figura II 18**). Aquí, cabe destacar que habría que simular la película de aire para mantener en levitación la parte móvil. No obstante, y considerando que tampoco debe entrar en resonancia cuando la plataforma esté simplemente apoyada (sin aire), se ha simplificado el análisis con unos apoyos fijos. En el análisis estático, sí se ha tenido en consideración la película de aire, pero de esa forma aparecían aquí unas frecuencias de resonancia muy bajas responsables de un desplazamiento de la parte móvil en el plano y no deformaciones que es lo que nos preocupa en nuestro estudio de la estructura. Dichos desplazamientos deberán ser controlados de una forma que todavía queda lejos de estar determinada y tiene más que ver con la parte de control que con los análisis estructurales aquí realizados.



**Figura II 18** Apoyos para el análisis modal de la parte móvil

### II.3.2.2 Mallado para la parte móvil en el análisis modal

Como ya hemos comentado, consideramos en este caso, unas opciones de configuración coherentes con las elegidas para la parte fija y el mismo análisis. Esto es “Medium”, “Relevance: 30”. (Véase **Figura II 19**).



**Figura II 19** Aspecto del mallado de la parte móvil para análisis modal

### II.3.3 RESUMEN DE CONFIGURACIÓN Y RESULTADOS

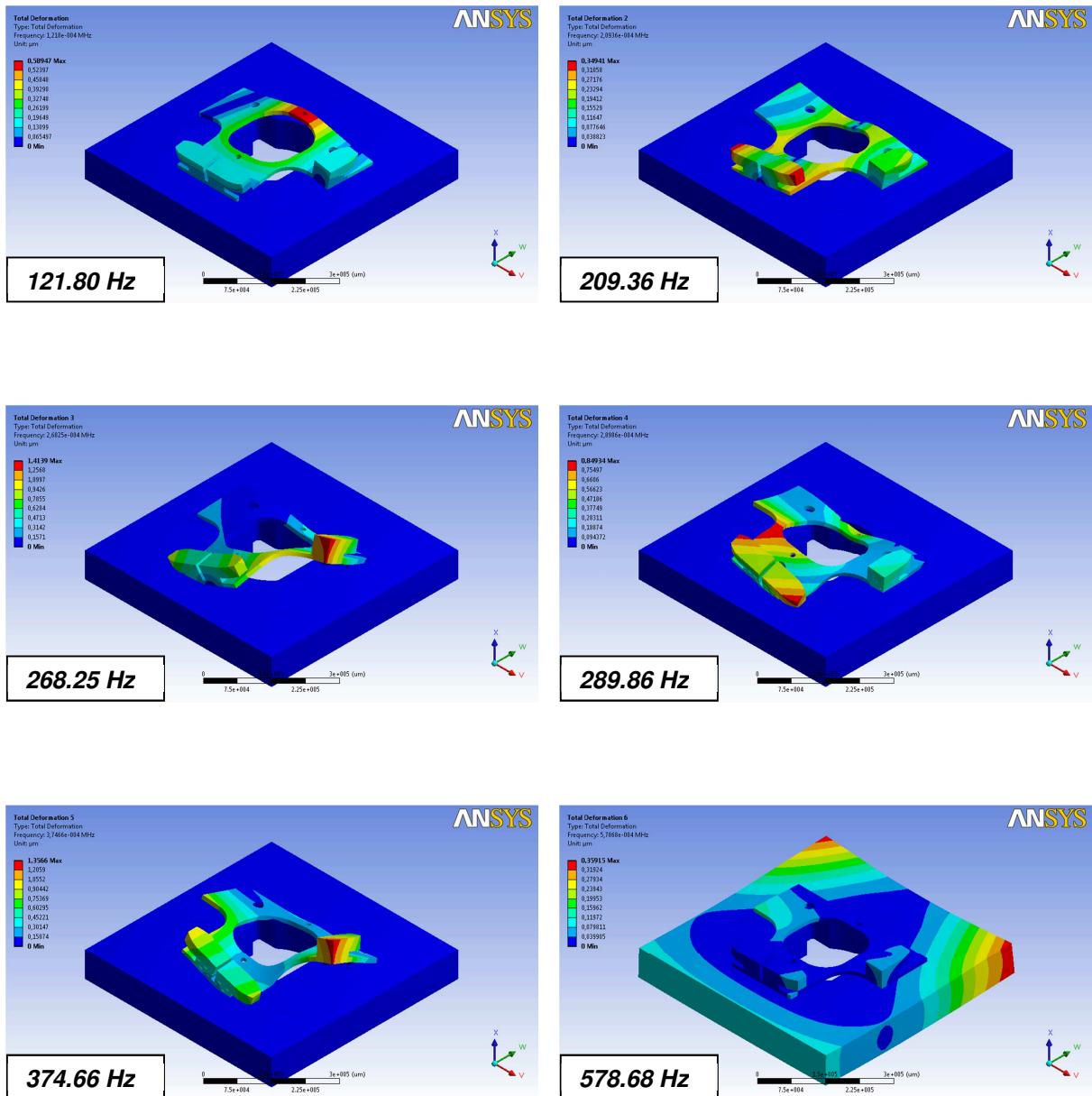
A continuación se muestran las consideraciones más relevantes del análisis modal:

ANÁLISIS MODAL	Apoyos	Mallado	Puntos de masa
<b>Parte fija inferior</b>	Apoyo fijo en 3 puntos de la base	Relevance Center: Medium  Relevance 30	40 kg sobre la pared lateral de la base  5 kg sobre marco inferior
<b>Parte móvil</b>	Apoyo fijo en 3 puntos de la base	Relevance Center: Medium  Relevance 30	1 kg sobre marco superior

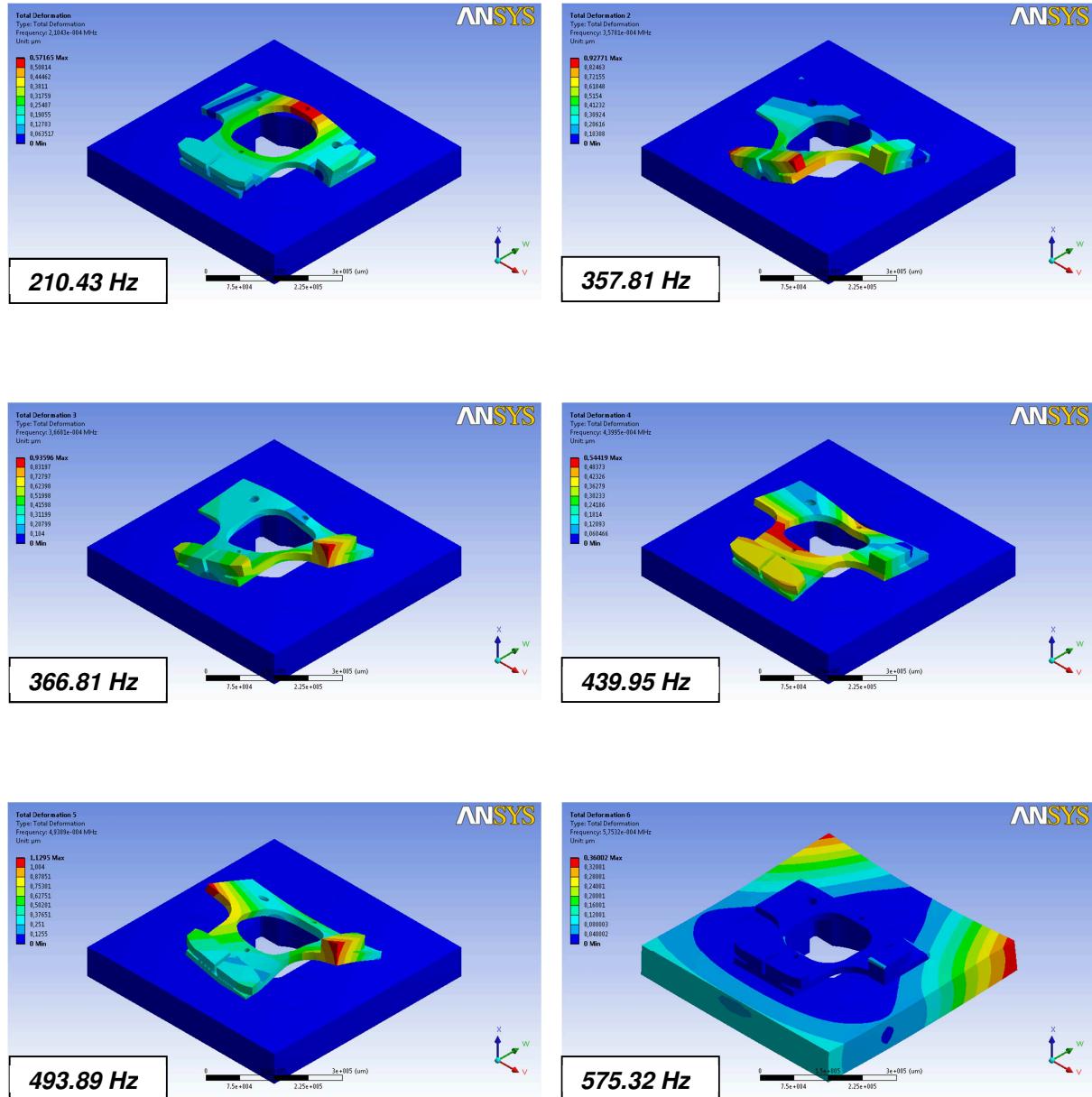
**Tabla II 4** Resumen de configuración del análisis modal

### II.3.3.1 Imágenes de los resultados del análisis modal de la parte fija inferior

Se muestran aquí las imágenes de las formas modales para espesores de placa de Zerodur de 10 mm (diseño original) y 17 mm (solución óptima). (Véase **Figura II 20** y **Figura II 21** respectivamente). Ambos considerando acoplamientos flexibles de acero.



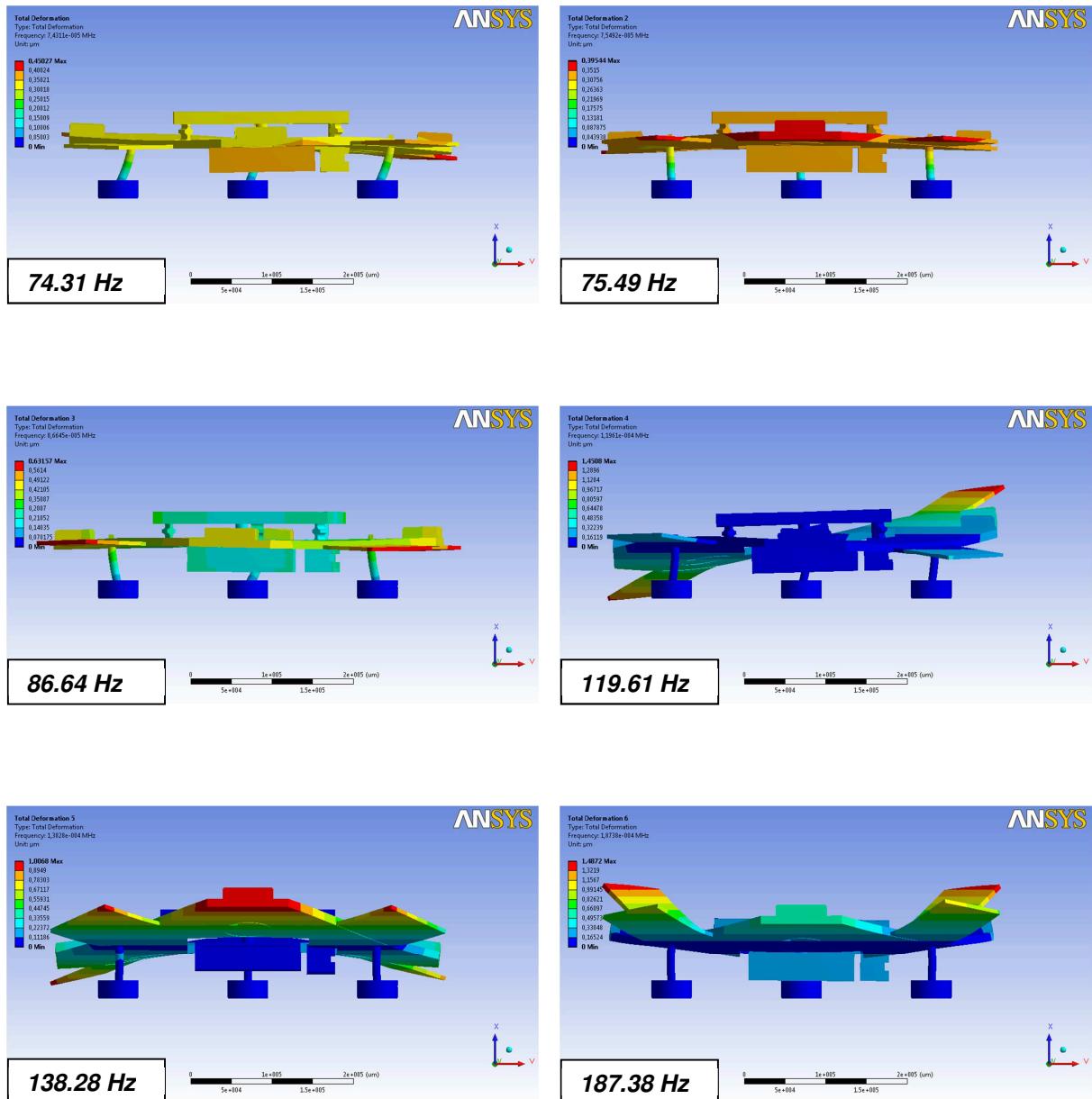
**Figura II 20** Formas modales aparecidas para un espesor de la placa que hace de marco metrológico inferior de 10 mm. (Deformaciones x50000)



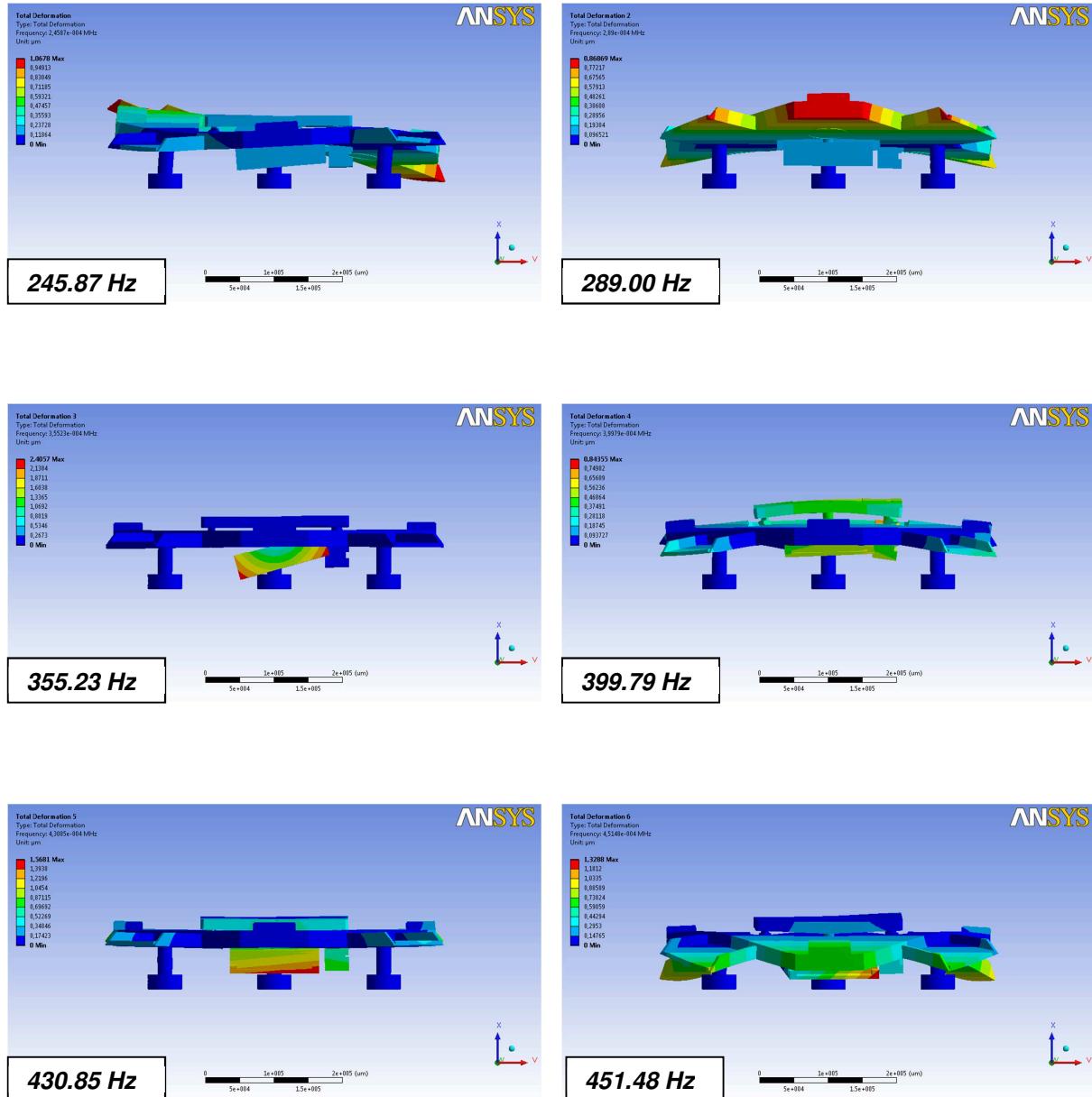
**Figura II 21** Formas modales aparecidas para un espesor de la placa que hace de marco metrológico inferior de 17 mm. (Deformaciones x50000)

### II.3.3.2 Imágenes de los resultados del análisis modal de la parte móvil

Se muestran aquí las imágenes de las formas modales de la parte móvil original y modificada. (Véase **Figura II 22** y **Figura II 23** respectivamente). Ambos considerando acoplamientos flexibles de acero.



**Figura II 22** Formas modales aparecida en la parte móvil original. (Deformaciones x50000)



**Figura II 23** Formas modales aparecidas en la parte móvil modificada (Deformaciones x50000)

## II.4 ANÁLISIS ESTÁTICO. CONFIGURACIÓN Y SIMULACIONES

En el análisis estático, el coste computacional es considerablemente menor que en análisis modal. Puesto que se trata de otro tipo de análisis y otros resultados a estudiar, es posible cambiar las opciones de configuración buscando la mayor precisión en la solución. Además, aquí, consideramos las dos partes como un conjunto y no por separado.

### II.4.1 CONFIGURACIÓN DEL ANÁLISIS ESTÁTICO

En este caso, es importante considerar la película de aire producida por los *air bearings* puesto que la adaptación que tengan los mismos a la superficie de desplazamiento situada en la base, es algo determinante en el estudio de las deformaciones en las diferentes posiciones.

Esto se debe a que se trata, en este caso, de determinar cómo asienta la parte móvil en la base en las diferentes posiciones y la película de aire hace de enlace entre las partes.

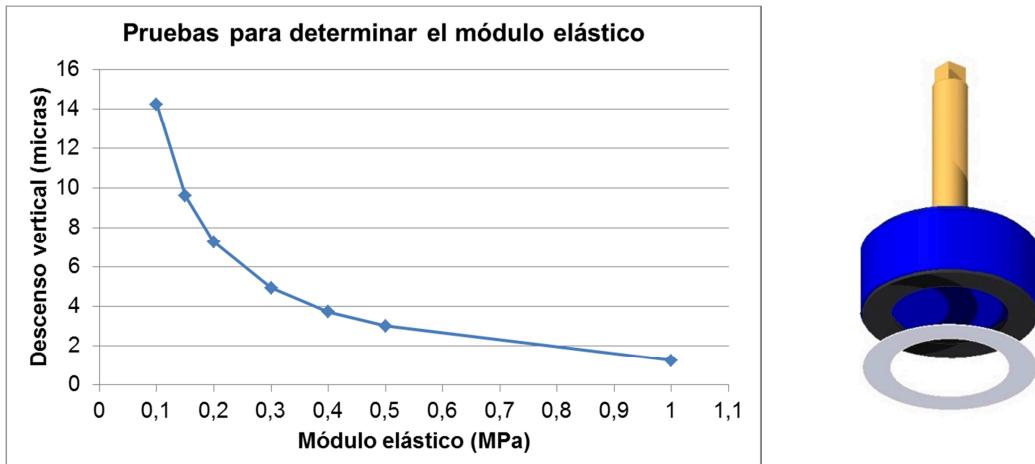
Por ello, se ha modelado un pequeño disco de 100 micras de espesor (mínimo espesor permitido por Solid Edge en una operación de protrusión). Este disco hará las funciones de aire. Así, se ha creado un nuevo material en Ansys para asociarlo a dicho disco y se le ha atribuido un límite elástico de modo que se deforme de forma lo más similar posible a como lo haría la película de aire.

Para la elección de este módulo elástico, se ha tomado como referencia unos ensayos realizados en un TFM anterior con los *air bearings* ya comprados. En dichos ensayos, se añadió peso sobre los cojinetes de forma que se medía con unos sensores capacitivos el aplastamiento de la película de aire según se aumentaba el peso (véase **Figura II 24**). Es decir, se midió el descenso en la altura de vuelo de una plataforma con distintos pesos dispuesta sobre los cojinetes de aire.



**Figura II 24** Adición de peso sobre los *air bearings* (6)

Así, se ha ido variando el módulo elástico en Ansys hasta conseguir un descenso vertical similar al observado en los ensayos. Las simulaciones de prueba para determinar este valor con Ansys se han realizado con la parte móvil original que tenía unos 8 kg de masa. Para este peso, el descenso de la altura de vuelo era de unas 5 micras, así que a la vista de los resultados variando el módulo elástico en las simulaciones de prueba (véase **Figura II 25**) se ha tomado un valor de 0.3 MPa para atribuir al material asociado a la plaquita que hace de película de aire.



**Figura II 25** Pruebas de variación del módulo elástico del material asociado a la plaquita que simula el aire. (Valor medio del máximo descenso vertical en la base de los 3 *air bearings*)

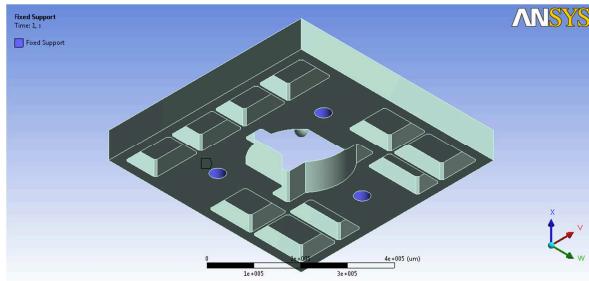
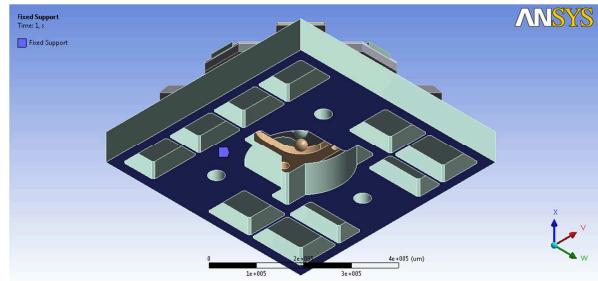
Es importante notar el hecho de que en el análisis estático se considera la parte móvil ya modificada, por lo que la deformación será mayor, al ser mayor el peso de dicha parte por las nervaduras y material añadido para conseguir la rigidez requerida. No obstante, el valor de módulo elástico elegido es válido al ser comparado en las pruebas con un peso de 8 kg en los ensayos (como la masa del diseño original de la parte móvil) sobre la película de aire.

#### II.4.1.1 Cargas y apoyos en el análisis estático

Los puntos de masa serán, como en anteriores ocasiones, 40 kg sobre la pared lateral de la base (debido a la parte fija superior), 5 kg sobre marco metrológico inferior (actuador vertical y acoplamiento) y 1 kg sobre el superior (AFM y acoplamiento)

En cuanto a los apoyos se ha introducido una variación. En el análisis modal, sólo se considera una forma de apoyo de la base (3 puntos fijos). Sin embargo, en este caso se ha tenido en cuenta tanto 3 apoyos fijos, como fijada toda la superficie inferior de la base. (Véase **Figura II 26** y **Figura II 27** respectivamente)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Estas mismas figuras se muestran en la memoria justificando el hecho de que en el análisis modal se considere una sola forma de apoyo por 3 puntos fijos (MEMORIA pág.20).

**Figura II 26** Tres apoyos fijos (en azul)**Figura II 27** Toda la superficie fija (en azul)

Se añadirá; además, en este caso, la fuerza de la gravedad como acción externa.

Por último, se considera la plaquita con bajo módulo elástico que simula la deformación del aire anteriormente mencionada. Dicha plaquita irá unida por un lado a la parte móvil y a la superficie de deslizamiento en la base por el otro deformándose pero sin desplazarse. De este modo se impiden desplazamientos en el plano XY que realmente no deberían impedirse pero no influyen en la deformación sufrida, así que no importa en el estudio de las deformaciones estructurales. La forma de controlar este desplazamiento, no es objeto de este trabajo y deberá determinarse en los trabajos de control una vez que se conozca el funcionamiento de los motores lineales y la amortiguación.

#### II.4.1.2 Mallado en el análisis estático

Anteriormente, se han justificado ciertas simplificaciones y un mallado determinado comprobando además su validez. No obstante, en este caso es posible simular en tiempos aceptables y sin mensajes de error con mallados “Relevance Center: Fine” y “Relevance: 100”. Así; que a pesar de no ser estrictamente necesario y no apreciar excesiva diferencia a si usáramos un mallado como el utilizado en el análisis modal, se ha optado por esta configuración para un mallado lo más fino posible.

## II.4.2 RESUMEN DE CONFIGURACIÓN DEL ANÁLISIS ESTÁTICO

Las consideraciones más importantes del análisis estático se muestran a continuación:

ANÁLISIS ESTÁTICO	Apoyos	Mallado	Puntos de masa	Acciones externas
<b>Parte fija inferior y parte móvil conjuntas</b>	1º. Apoyo fijo en 3 puntos de la base  2º. Apoyo fijo de toda la superficie inferior de la base	Relevance Center: Fine  Relevance 100	40 kg sobre la pared lateral de la base  5 kg sobre marco metrológico inferior  1 kg sobre marco metrológico superior	Fuerza de la gravedad

**Tabla II 5** Resumen De configuración del análisis estático

## II.4.3 DATOS PARA EL CÁLCULO DEL ERROR DE POSICIONAMIENTO DEDIDO A DEFORMACIONES ESTRUCTURALES

Se presentan en este apartado los datos obtenidos en las simulaciones, con las deformaciones de todos los puntos necesarios para determinar el error y los ángulos de inclinación de los espejos. Para calcular los ángulos de inclinación fue necesario tomar tres puntos adicionales en las simulaciones en tres esquinas de cada uno de los espejos.

**II.4.3.1 Plataforma con 3 apoyos fijos: Datos obtenidos para el cálculo de errores**

	j=(-25,25)					j=(25,25)			
	$\delta x_{j, \text{pos}}$ μm	$\delta y_{j, \text{pos}}$ μm	$x_j$ μm	$y_j$ μm		$\delta x_{j, \text{pos}}$ μm	$\delta y_{j, \text{pos}}$ μm	$x_j$ μm	$y_j$ μm
1	-0,028	-0,236	70500,000	70500,000	1	0,026	-0,239	20500,000	70500,000
2	-0,029	-0,227	70500,000	70500,000	2	0,026	-0,234	20500,000	70500,000
3	0,217	-0,357	70500,000	70500,000	3	0,278	-0,365	20500,000	70500,000

	j=(0,0)			
	$\delta x_{j, \text{pos}}$ μm	$\delta y_{j, \text{pos}}$ μm	$x_j$ μm	$y_j$ μm
1	-0,003	-0,269	45500,000	45500,000
2	-0,003	-0,262	45500,000	45500,000
3	0,248	-0,390	45500,000	45500,000

	j=(-25,-25)					j=(25,-25)			
	$\delta x_{j, \text{pos}}$ μm	$\delta y_{j, \text{pos}}$ μm	$x_j$ μm	$y_j$ μm		$\delta x_{j, \text{pos}}$ μm	$\delta y_{j, \text{pos}}$ μm	$x_j$ μm	$y_j$ μm
1	-0,030	-0,294	70500,000	20500,000	1	0,021	-0,298	20500,000	20500,000
2	-0,031	-0,286	70500,000	20500,000	2	0,021	-0,292	20500,000	20500,000
3	0,218	-0,411	70500,000	20500,000	3	0,278	-0,418	20500,000	20500,000

**Tabla II 6** Datos tomados en cada posición: Variación de posición de los puntos y distancia teórica entre cabezales láser y espejos. Tres apoyos

j=(-25,25)				j=(25,25)			
$\alpha_{1j}$ (°)	$\beta_{1j}$ (°)	$\alpha_{2j}$ (°)	$\beta_{2j}$ (°)	$\alpha_{1j}$ (°)	$\beta_{1j}$ (°)	$\alpha_{2j}$ (°)	$\beta_{2j}$ (°)
-0,0849	0,0447	-0,2895	-0,2483	-0,0019	0,0669	-0,3439	-0,2309

j=(0,0)			
$\alpha_{1j}$ (°)	$\beta_{1j}$ (°)	$\alpha_{2j}$ (°)	$\beta_{2j}$ (°)
-0,1108	0,0558	-0,3384	-0,2437

j=(-25,-25)				j=(25,-25)			
$\alpha_{1j}$ (°)	$\beta_{1j}$ (°)	$\alpha_{2j}$ (°)	$\beta_{2j}$ (°)	$\alpha_{1j}$ (°)	$\beta_{1j}$ (°)	$\alpha_{2j}$ (°)	$\beta_{2j}$ (°)
-0,1122	0,0511	-0,3348	-0,2452	-0,1363	0,0684	-0,3843	-0,2341

**Tabla II 7** Cálculo de los ángulos de inclinación de los espejos en cada posición. Tres apoyos

**II.4.3.2 Plataforma con toda la superficie inferior apoyada: Datos obtenidos para el cálculo de errores**

	j=(-25,25)					j=(25,25)			
	$\delta x_{j, \text{pos}}$ μm	$\delta y_{j, \text{pos}}$ μm	$dx_j$ μm	$dy_j$ μm		$\delta x_{j, \text{pos}}$ μm	$\delta y_{j, \text{pos}}$ μm	$dx_j$ μm	$dy_j$ μm
1	0,039	-0,285	70500,000	70500,000	1	0,040	-0,290	20500,000	70500,000
2	0,039	-0,278	70500,000	70500,000	2	0,039	-0,283	20500,000	70500,000
3	0,291	-0,409	70500,000	70500,000	3	0,291	-0,408	20500,000	70500,000

	j=(0,0)			
	$\delta x_{j, \text{pos}}$ μm	$\delta y_{j, \text{pos}}$ μm	$dx_j$ μm	$dy_j$ μm
1	0,041	-0,287	45500,000	45500,000
2	0,040	-0,281	45500,000	45500,000
3	0,290	-0,410	45500,000	45500,000

	j=(-25,-25)					j=(25,-25)			
	$\delta x_{j, \text{pos}}$ μm	$\delta y_{j, \text{pos}}$ μm	$dx_j$ μm	$dy_j$ μm		$\delta x_{j, \text{pos}}$ μm	$\delta y_{j, \text{pos}}$ μm	$dx_j$ μm	$dy_j$ μm
1	0,038	-0,286	70500,000	20500,000	1	0,040	-0,292	20500,000	20500,000
2	0,037	-0,279	70500,000	20500,000	2	0,040	-0,285	20500,000	20500,000
3	0,291	-0,410	70500,000	20500,000	3	0,293	-0,410	20500,000	20500,000

**Tabla II 8** Datos tomados en cada posición: Variación de posición de los puntos y distancia teórica entre cabezales láser y espejos. Superficie inferior fija

j=(-25,25)				j=(25,25)			
$\alpha_{1j}$ (°)	$\beta_{1j}$ (°)	$\alpha_{2j}$ (°)	$\beta_{2j}$ (°)	$\alpha_{1j}$ (°)	$\beta_{1j}$ (°)	$\alpha_{2j}$ (°)	$\beta_{2j}$ (°)
-0,1457	0,0878	-0,3954	-0,2136	-0,1456	0,0878	-0,3955	-0,2137

j=(0,0)			
$\alpha_{1j}$ (°)	$\beta_{1j}$ (°)	$\alpha_{2j}$ (°)	$\beta_{2j}$ (°)
-0,1453	0,0840	-0,3947	-0,2144

j=(-25,-25)				j=(25,-25)			
$\alpha_{1j}$ (°)	$\beta_{1j}$ (°)	$\alpha_{2j}$ (°)	$\beta_{2j}$ (°)	$\alpha_{1j}$ (°)	$\beta_{1j}$ (°)	$\alpha_{2j}$ (°)	$\beta_{2j}$ (°)
-0,1452	0,0878	-0,3950	-0,2136	-0,1464	0,0878	-0,3968	-0,2136

**Tabla II 9** Cálculo de los ángulos de inclinación de los espejos en cada posición. Superficie inferior fija

---

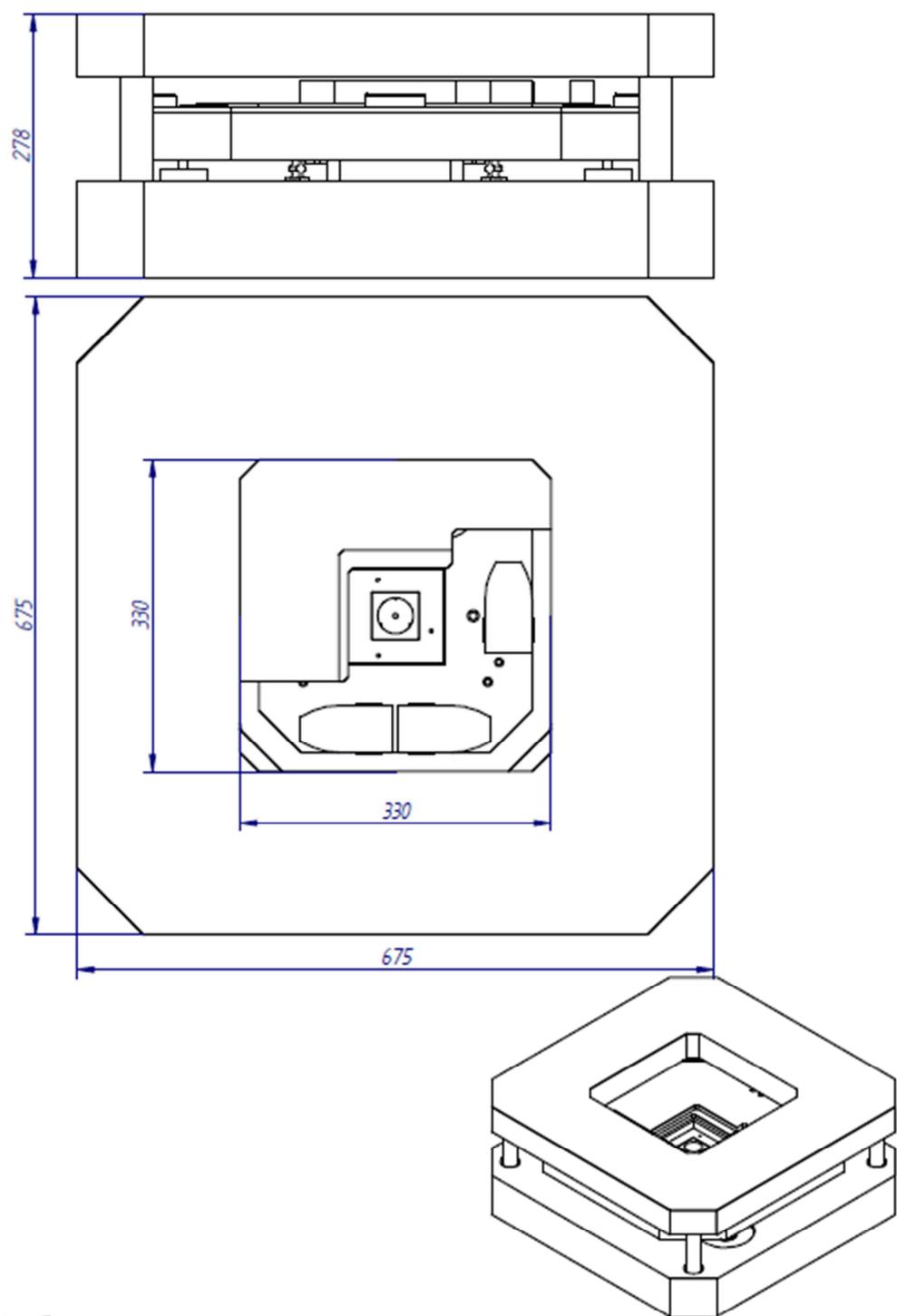
## **ANEXO III**

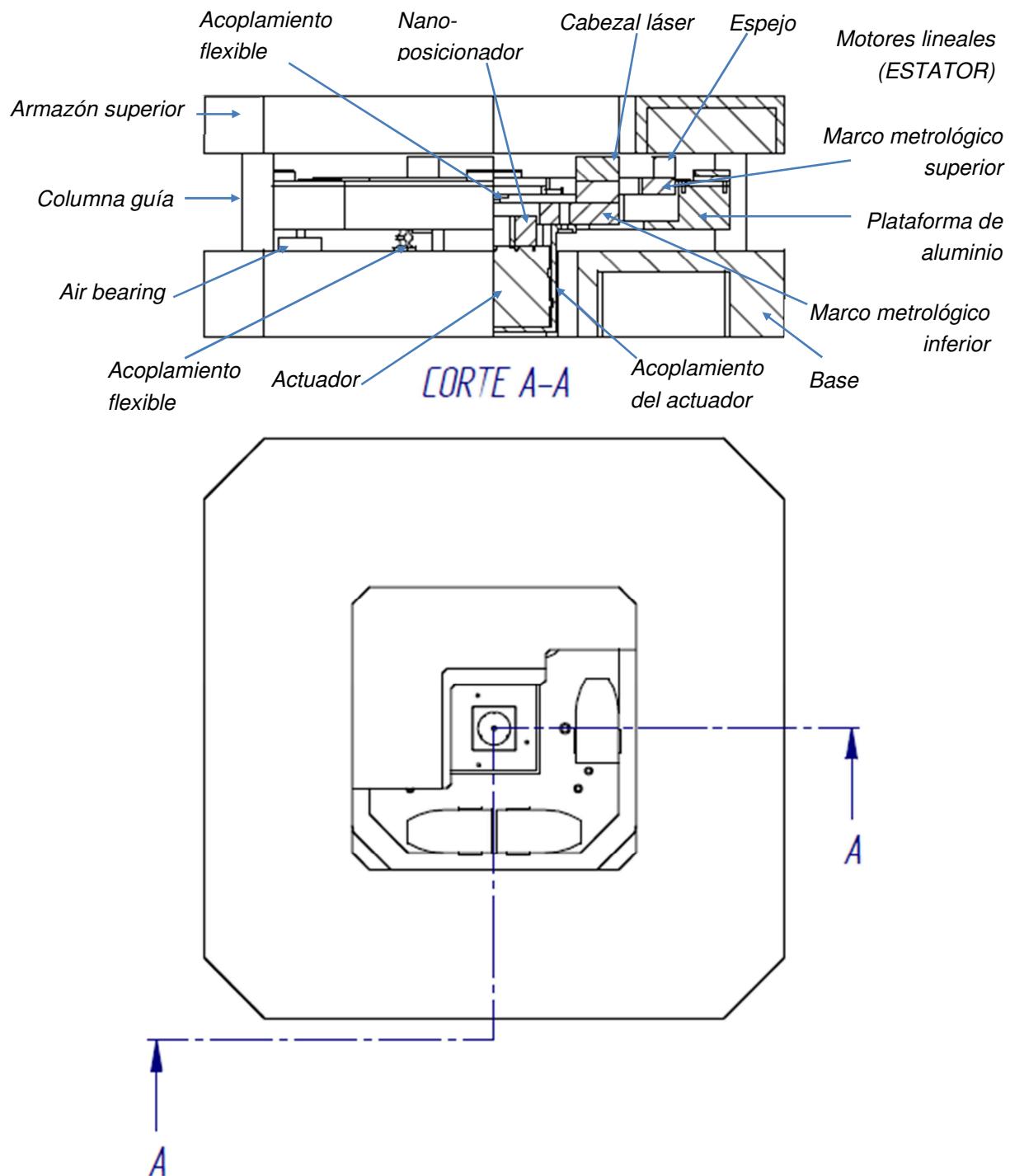
**Alternativa propuesta en  
el diseño del sistema.**

**Detalles constructivos**

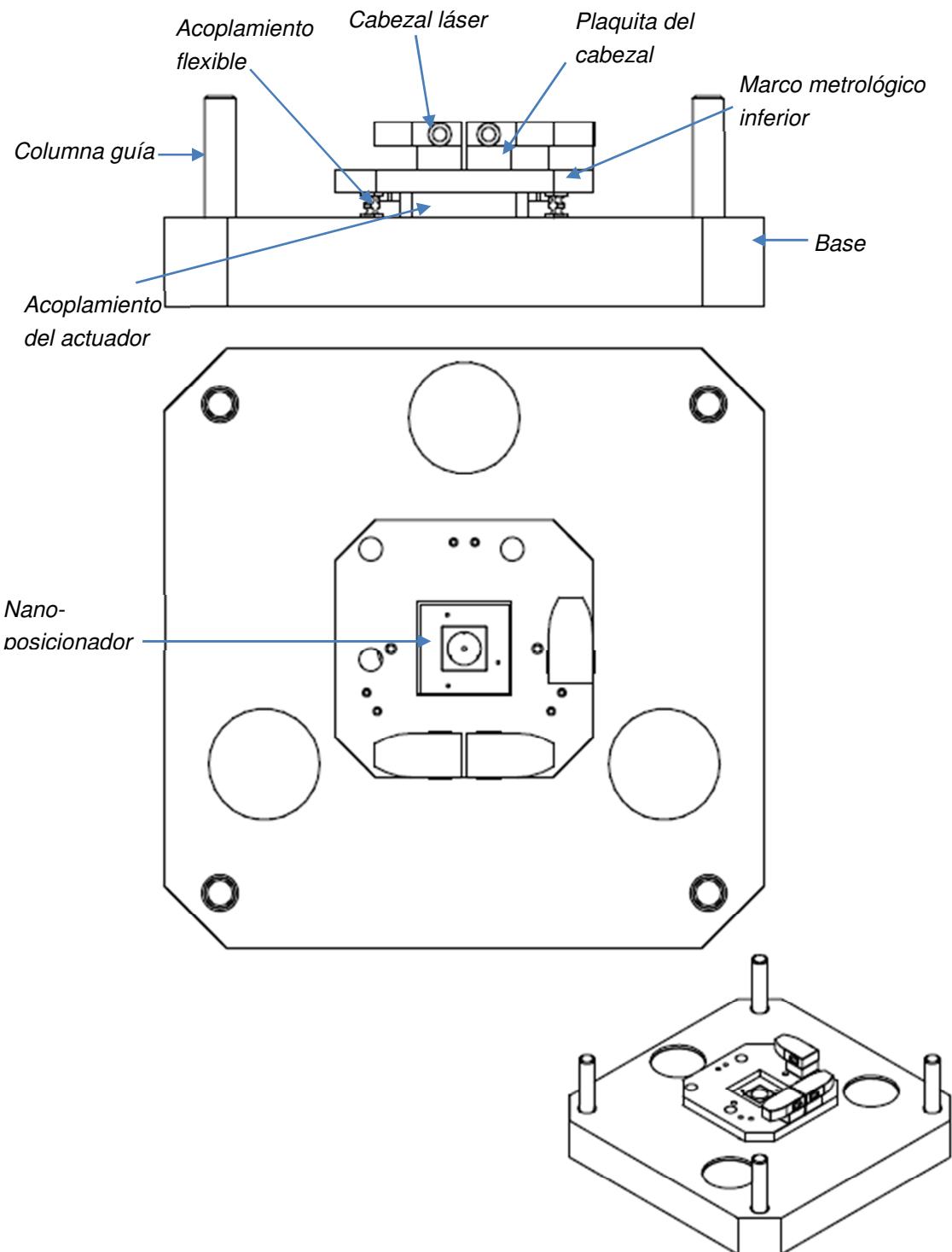


### III.1 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ÍNTEGRO

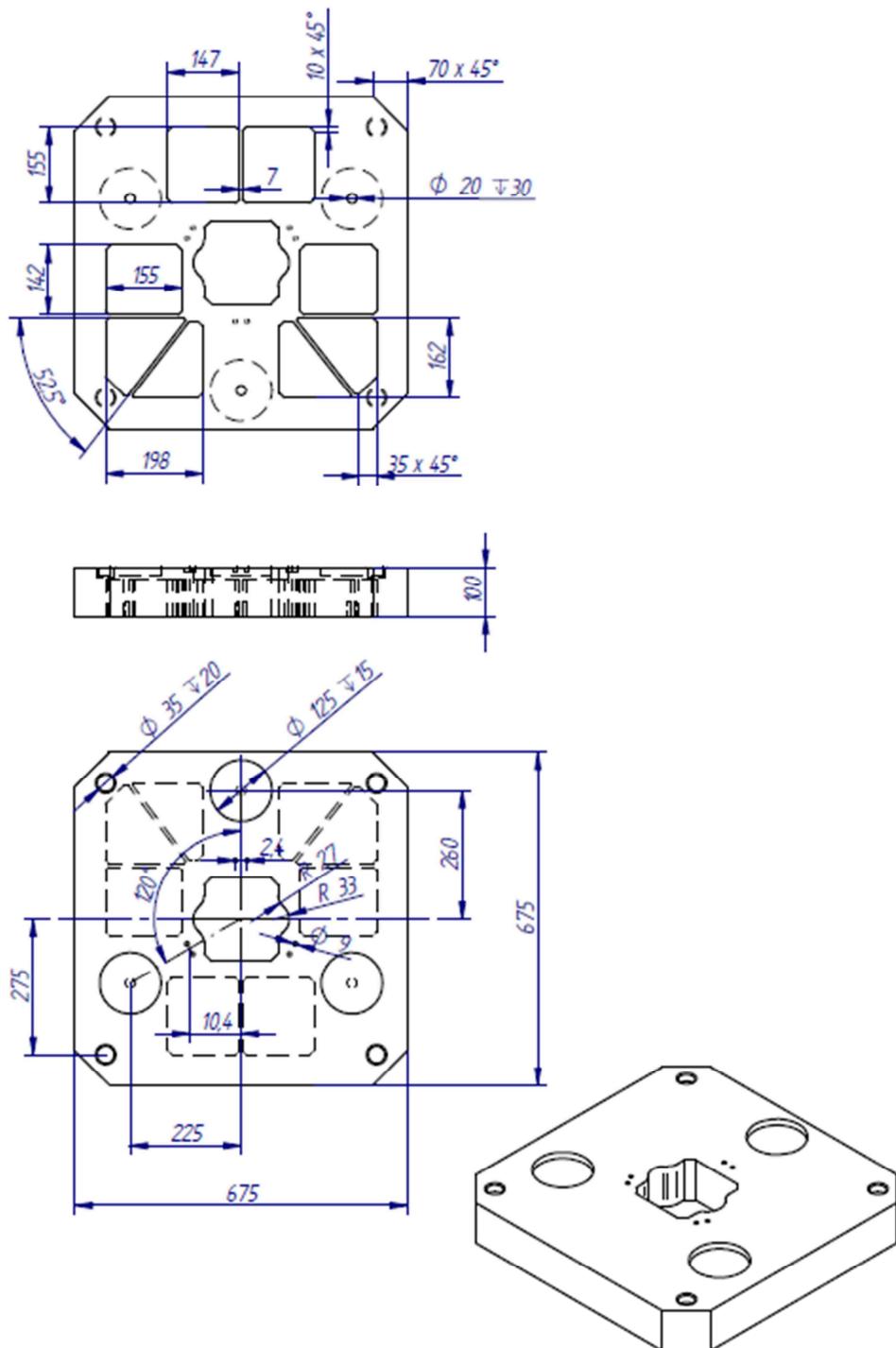


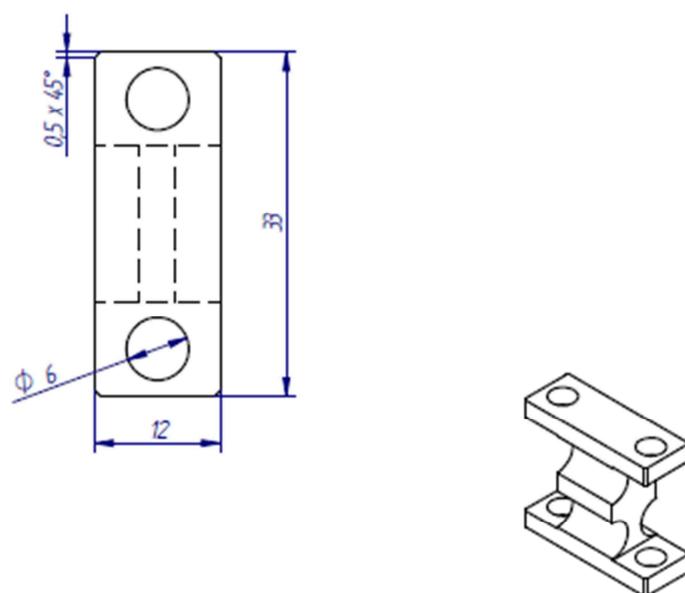
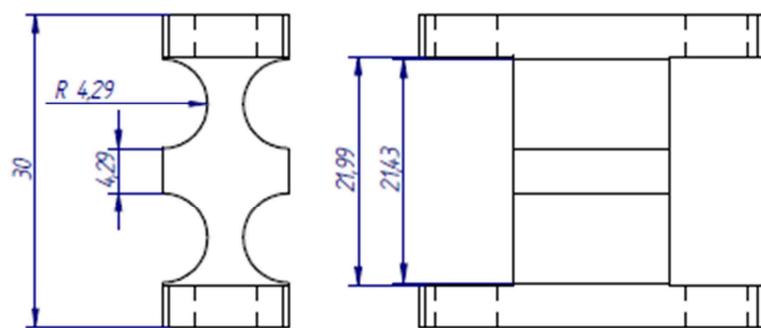


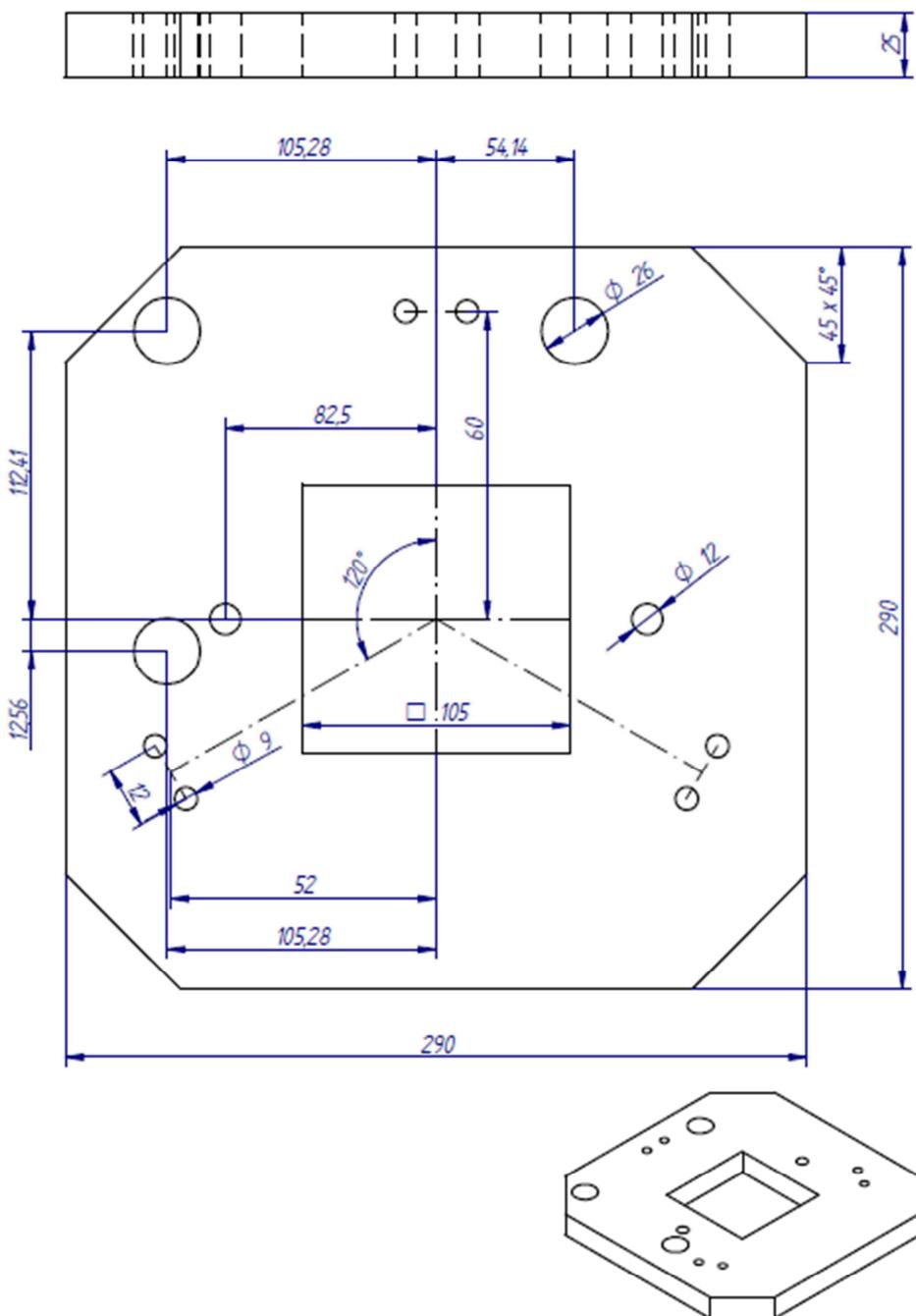
## III.2 PARTE FIJA INFERIOR

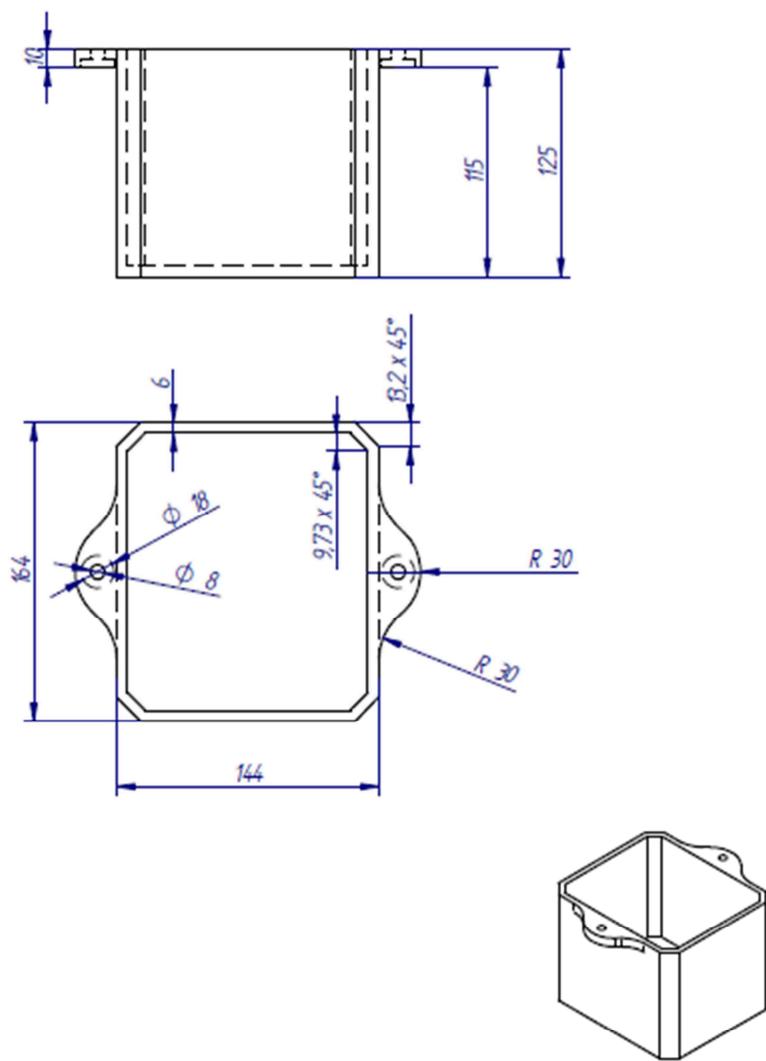


### **III.2.1      BASE**



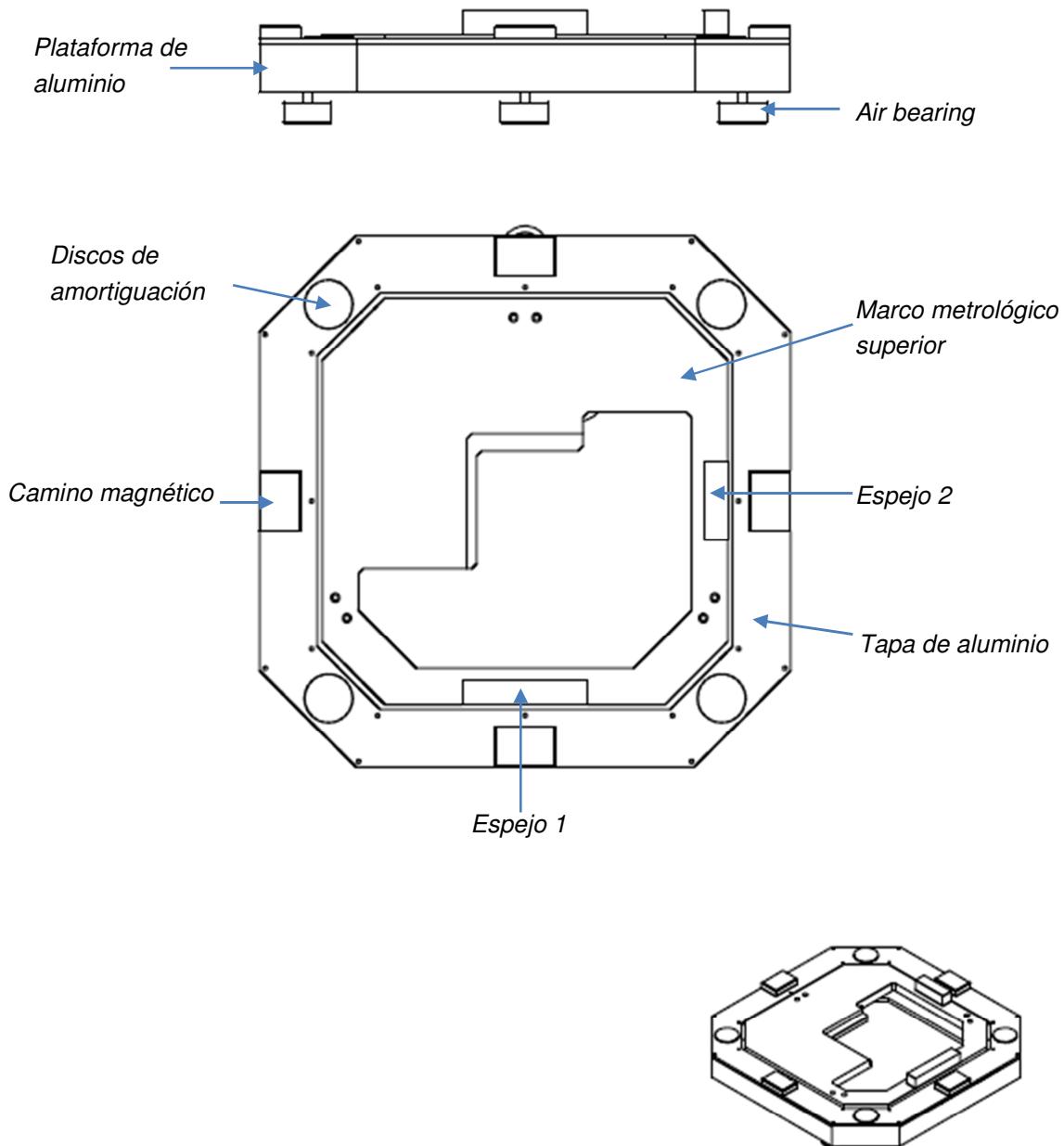
**III.2.2 ACOPLAMIENTOS FLEXIBLES**

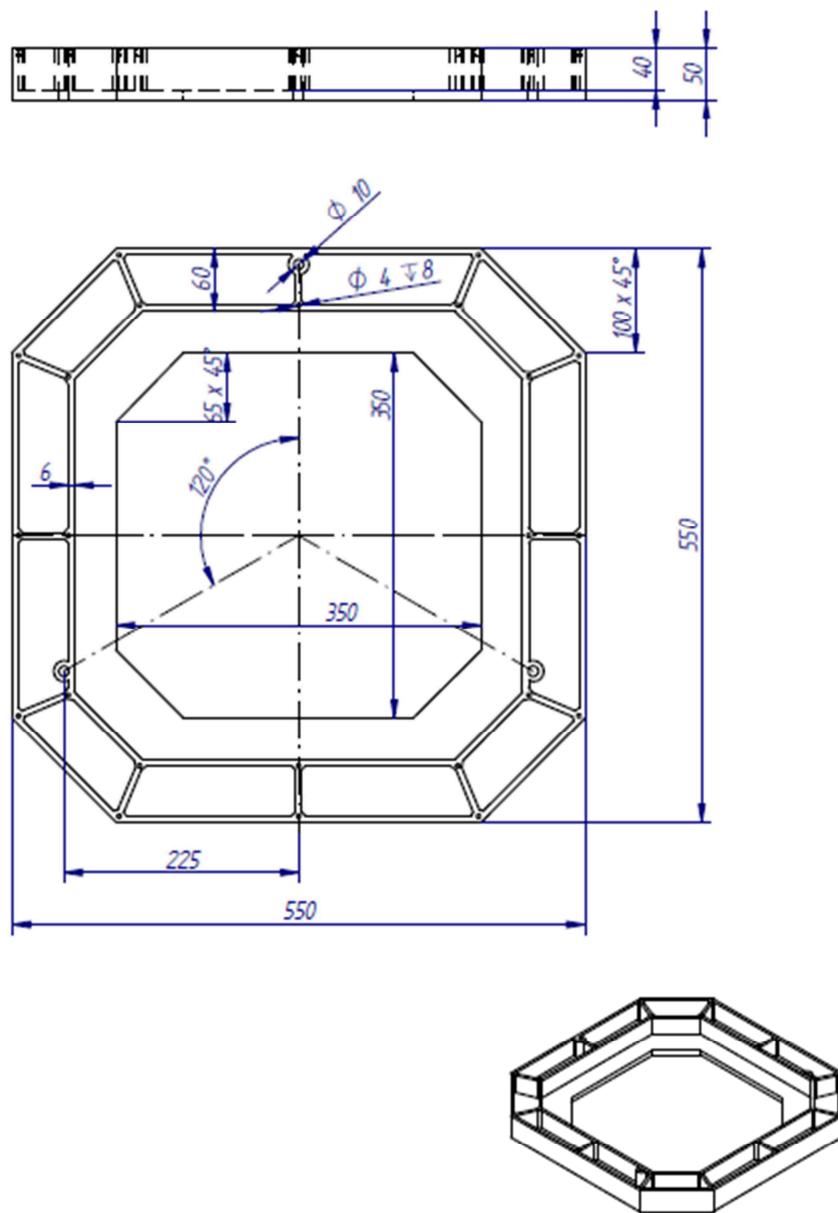
**III.2.3 MARCO METROLÓGICO INFERIOR**

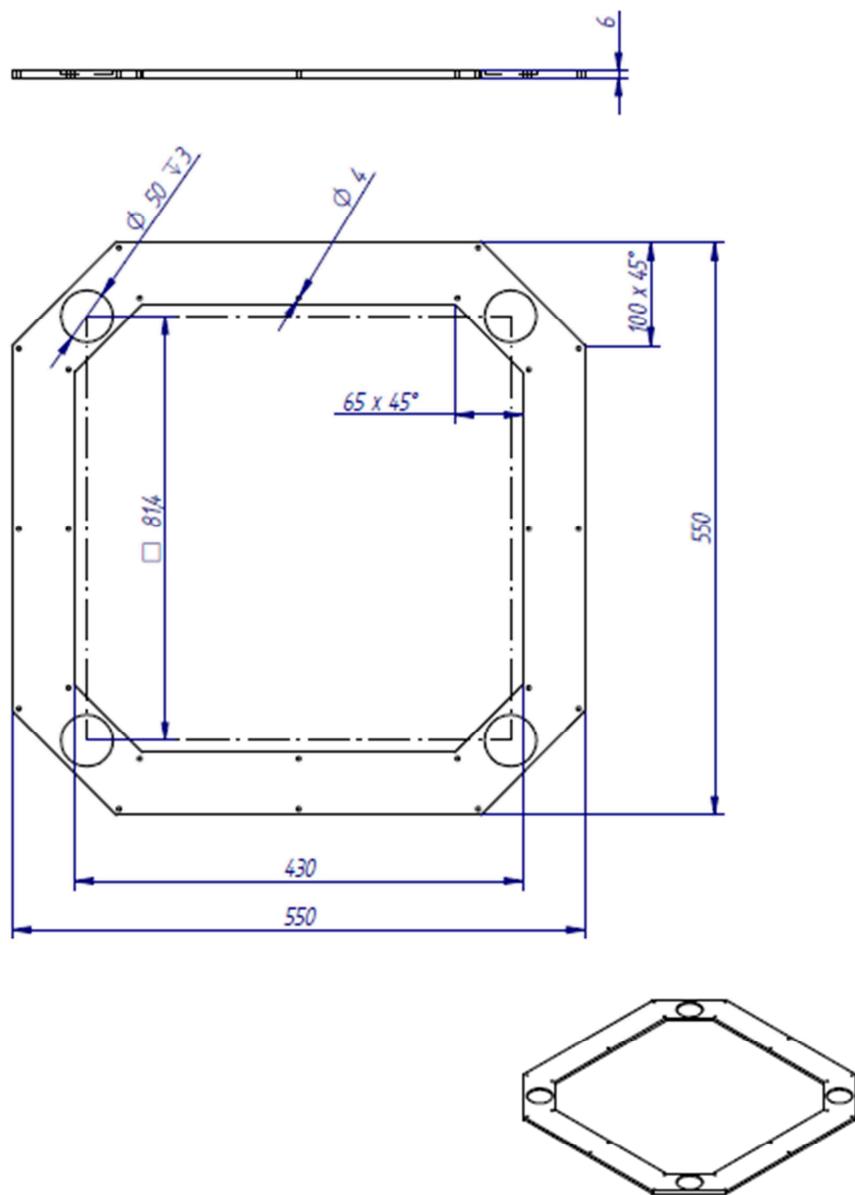
**III.2.4 ACOPLAMIENTO DEL ACTUADOR**

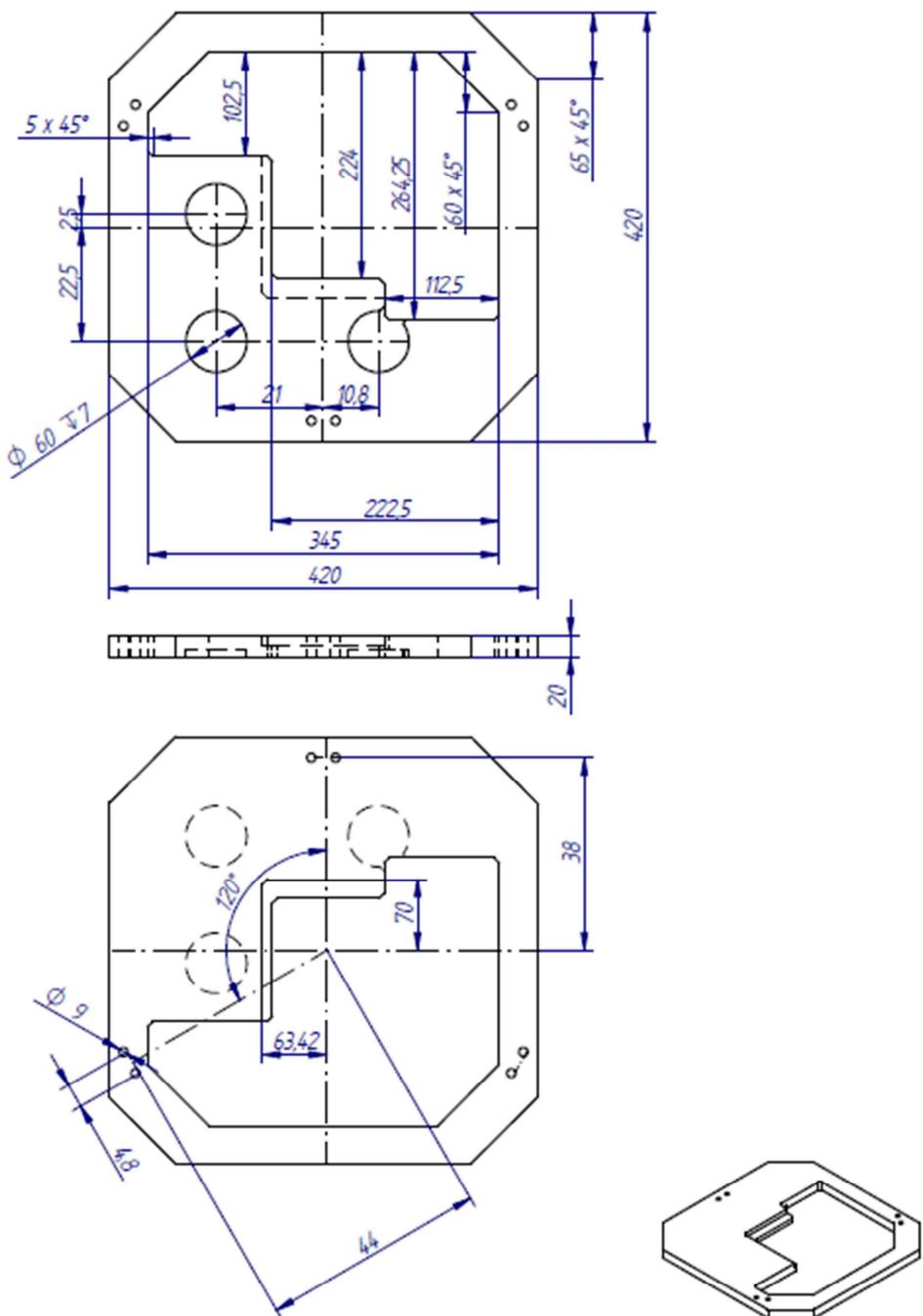


### III.3 PARTE MÓVIL

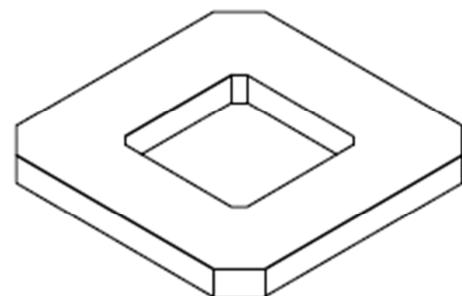
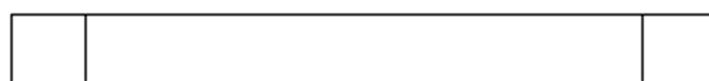
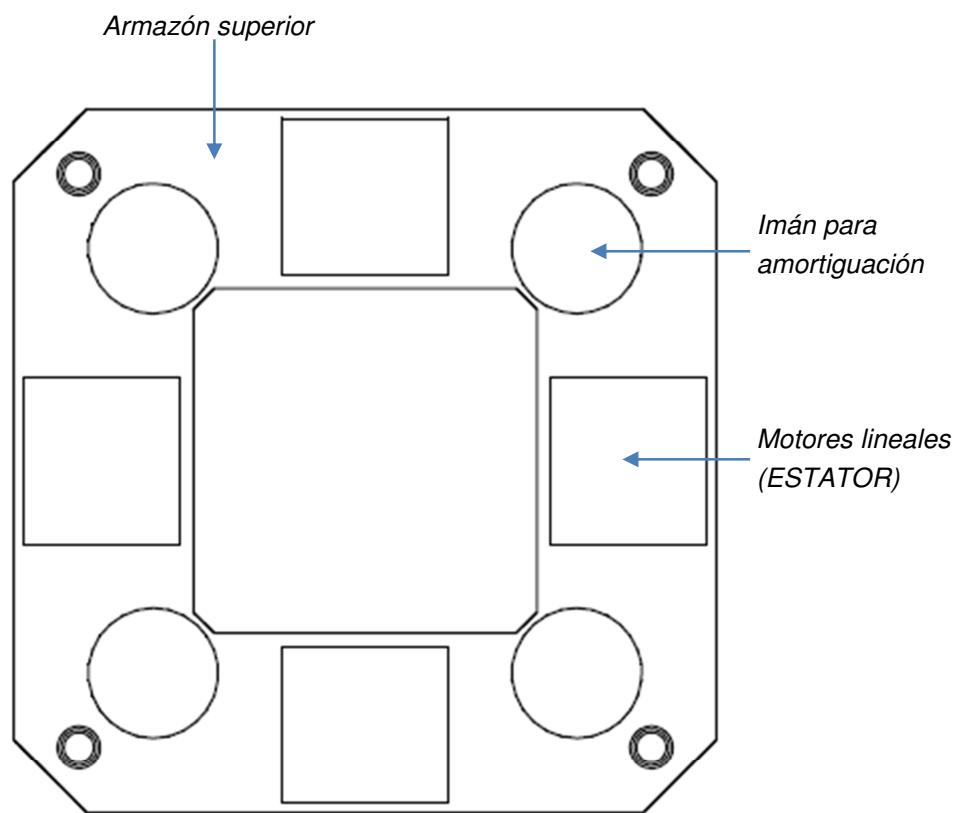


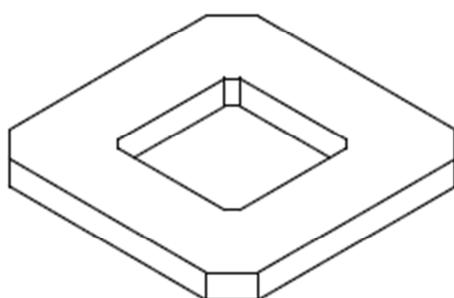
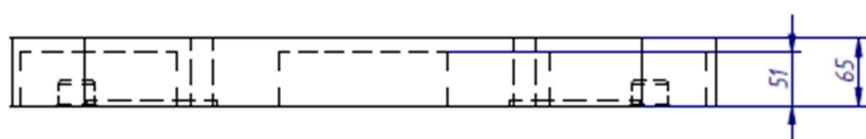
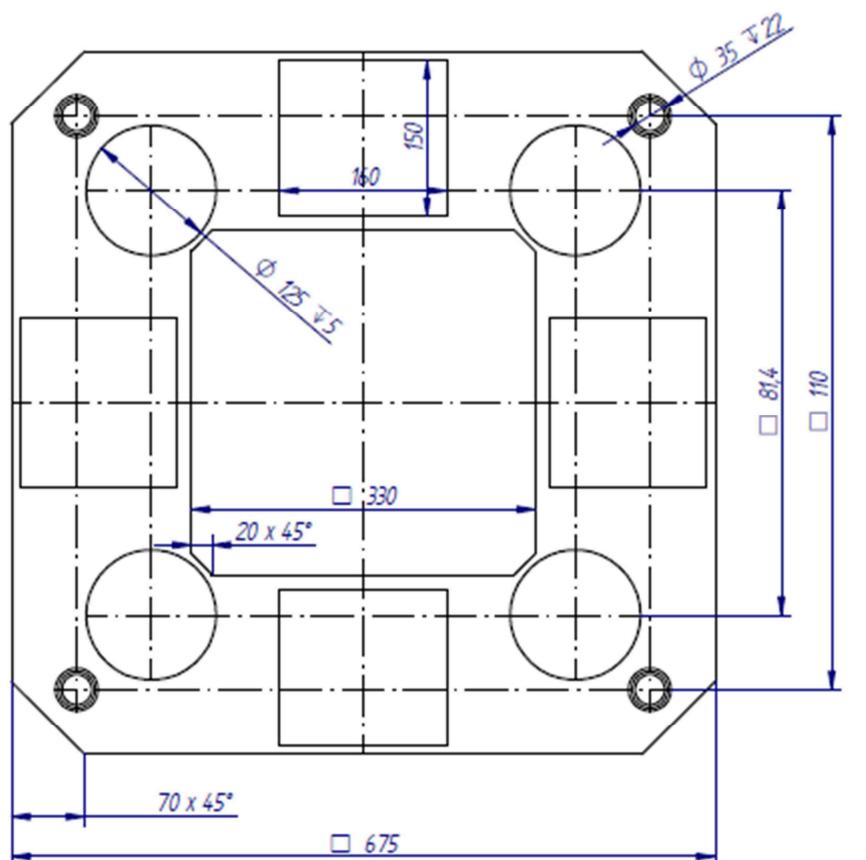
**III.3.1 PLATAFORMA DE ALUMINIO**

**III.3.2 TAPA DE ALUMINIO**

**III.3.3 MARCO METROLÓGICO SUPERIOR**

### III.4 PARTE FIJA SUPERIOR



**III.4.1 ARMAZÓN SUPERIOR**

---

**ANEXO IV**

**Ensayo experimental de**

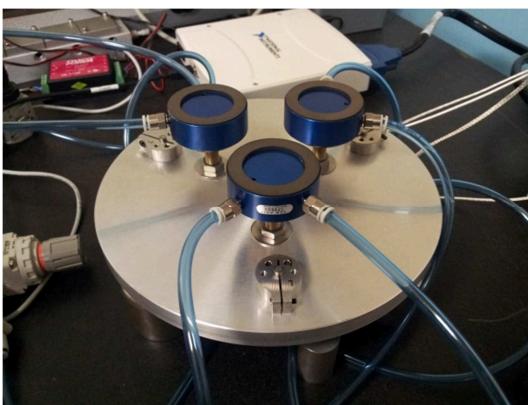
**los sensores capacitivos**



## IV.1 MONTAJE EN EL LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE LOS SENsoRES CAPACITIVOS

Se ha realizado un montaje en el laboratorio de metroología para comprobar y tratar de ver causas del ruido observado en mediciones anteriores con los sensores capacitivos.

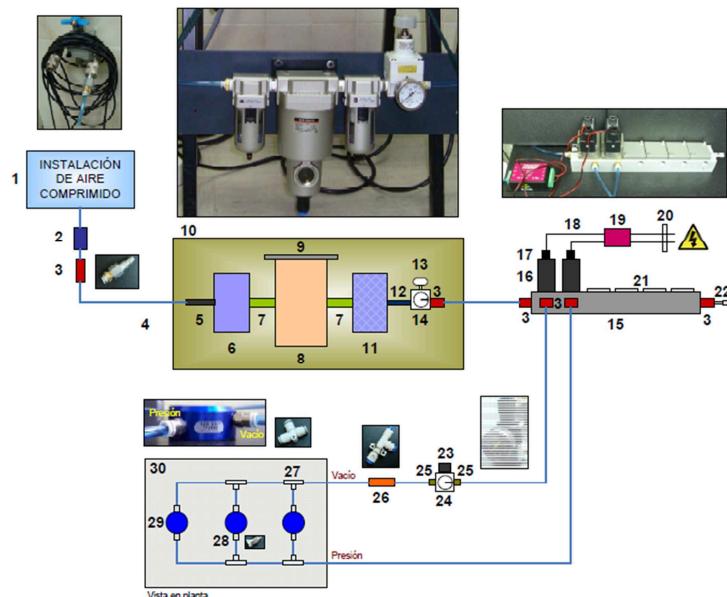
El montaje realizado ha sido igual al de anteriores ensayos para poder comparar los resultados. Para ello, se dispondrá una plataforma de aluminio especialmente fabricada para el ensayo con unos insertos donde acoplaremos los sensores capacitivos. Todo ello, irá sustentado por los vástagos de los *air bearings*. Se preparará la instalación neumática que los alimenta y se creará la película de aire en el ensayo correspondiente (véase **Figura IV 3**).



**Figura IV 1** Configuración de los elementos  
(Vista inferior)



**Figura IV 2** Montaje preparado para el ensayo con conexión a tierra



**Figura IV 3** Esquema de la instalación neumática (6)



## IV.2 RESULTADOS OBTENIDOS

### IV.2.1 VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA

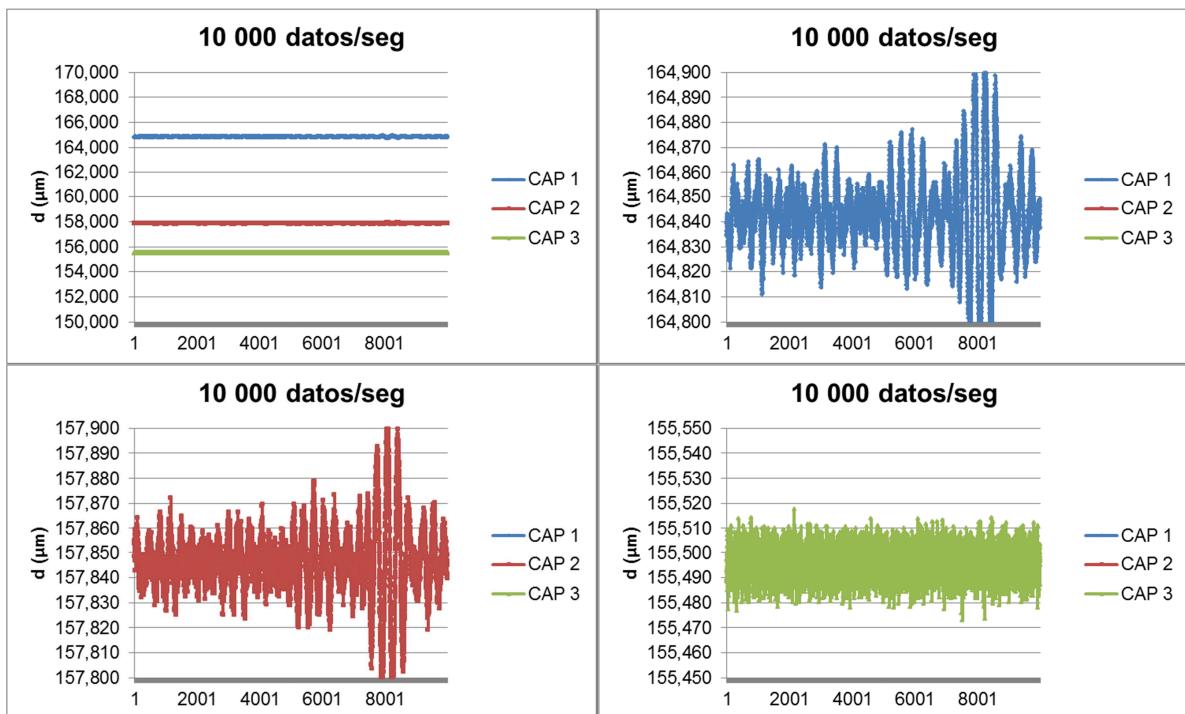


Figura IV 4 10 000 datos por segundo

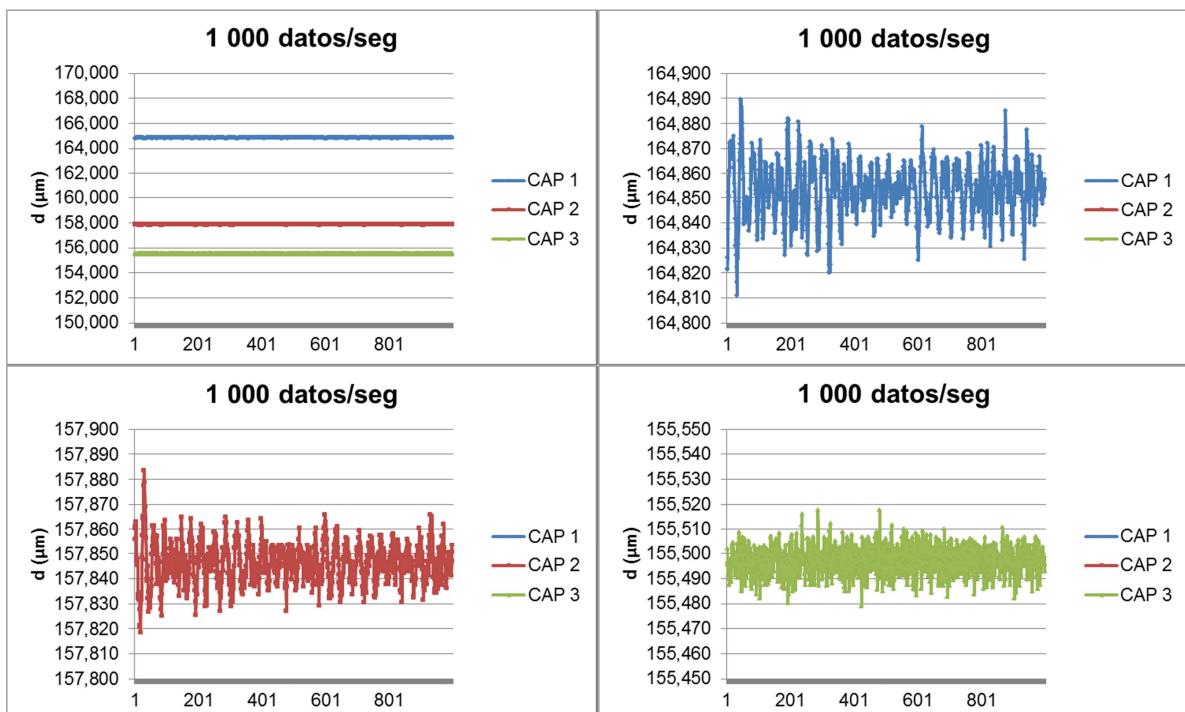
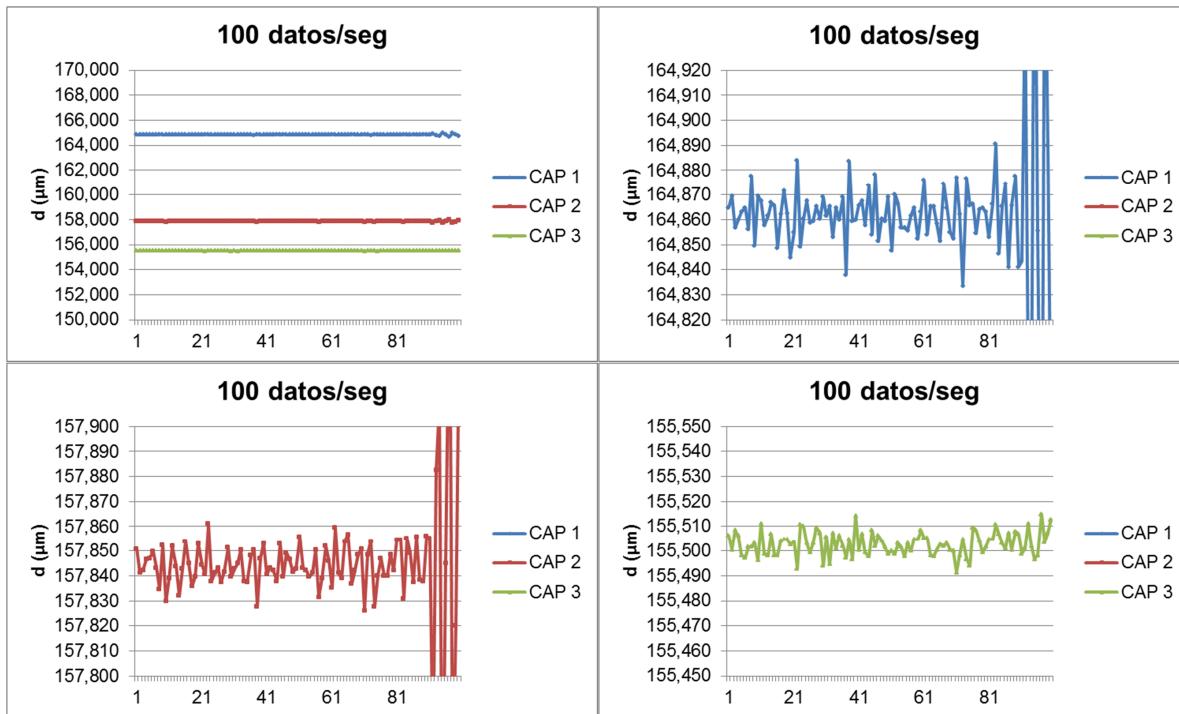
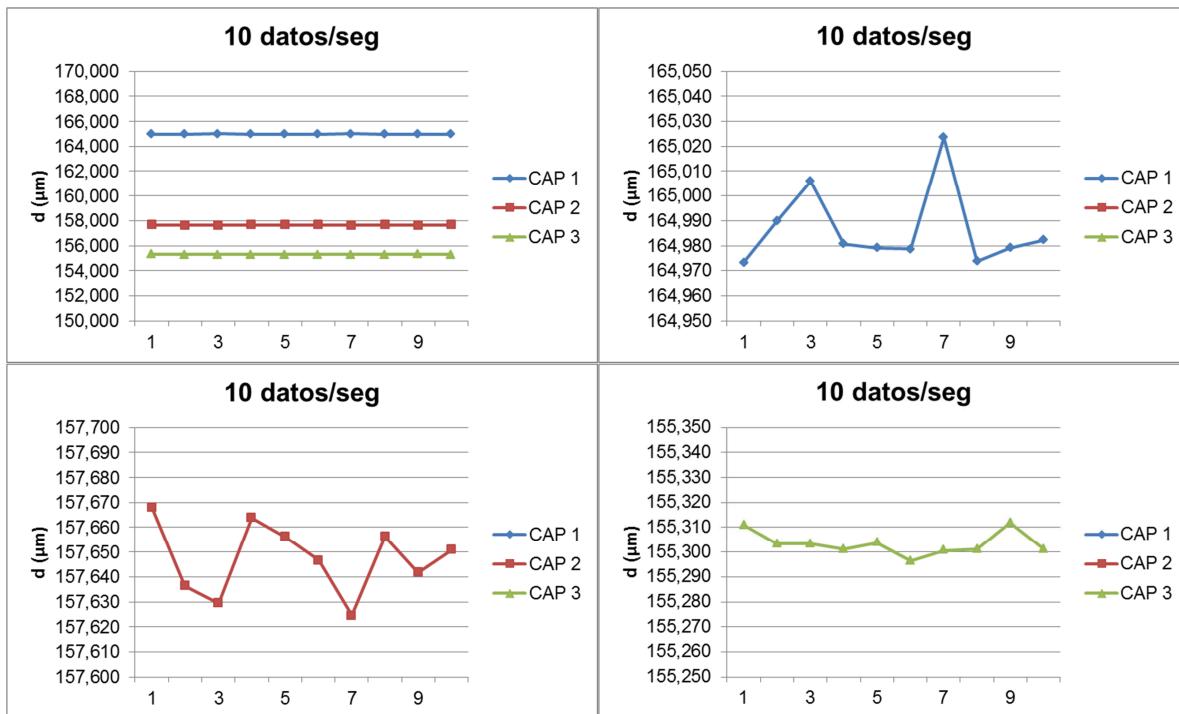
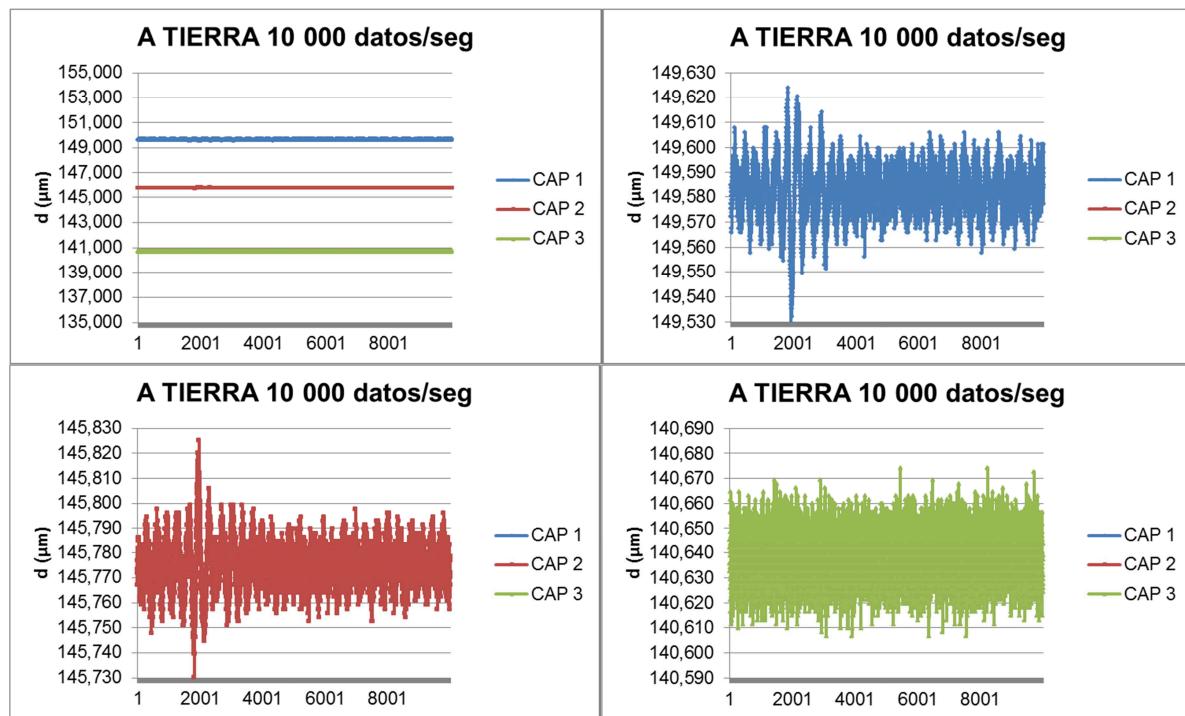


Figura IV 5 1 000 datos por segundo

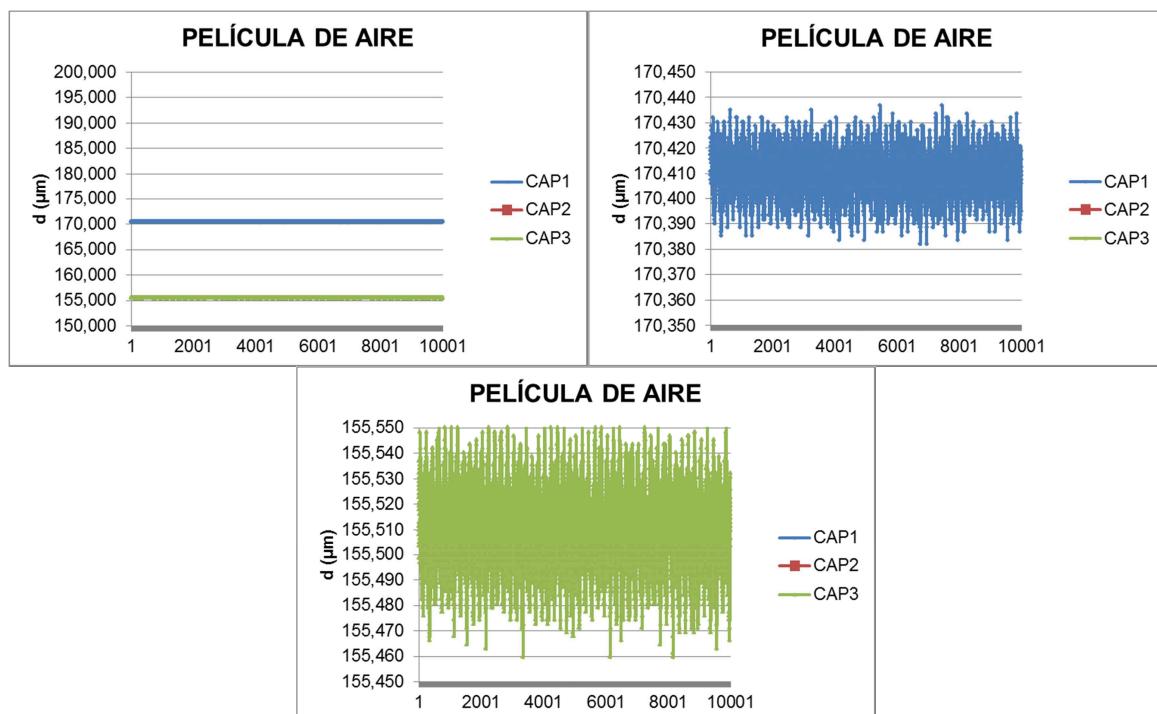
**Figura IV 6** 100 datos por segundo**Figura IV 7** 10 datos por segundo

#### IV.2.2 PUESTA A TIERRA



**Figura IV 8** Datos con puesta a tierra (10 000 datos por segundo)

#### IV.2.3 MEDICIÓN CON PELÍCULA DE AIRE



**Figura IV 9** Datos con película de aire (10 000 datos por segundo y conexión a tierra)