



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:  
Diseño de un soporte metroológico para sensor  
confocal

English title:  
Design of a metrological measuring setup for a  
confocal sensor

Autor/es  
Javier Camino Ferró

Director:  
José Antonio Albajez García

Codirectora:  
Lucía Candela Díaz Pérez

Grado en Ingeniería Mecánica  
Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Universidad de Zaragoza

2018

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. Javier Camino Ferró

con nº de DNI 18061219D en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

Grado \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

Diseño de un soporte metrológico para sensor confocal

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 de Septiembre de 2018

Fdo: \_\_\_\_\_

## **Diseño de un soporte metrológico para sensor confocal**

### **RESUMEN**

El objetivo de este trabajo consiste en el desarrollo de una estructura de soporte para un sistema metrológico de alta precisión, compuesto por un nanoposicionador piezoeléctrico 2D (ejes X-Y) y un sensor confocal 1D para el eje Z.

Es necesario que este sistema mida con una precisión submicrométrica, por ello se ha prestado especial atención al efecto de la temperatura, optimizando el diseño y realizando los cálculos necesarios que esto implica. También se ha tenido en cuenta para el diseño final, las deformaciones provocadas por los propios esfuerzos de la estructura.

Para llevar a cabo el diseño en principio se trabajó con bocetos de distintas ideas. Finalmente se determinó la opción que se consideró más adecuada de cara a optimizar la calidad de la medida. Para ello, se llevaron a cabo los estudios relacionados con la expansión térmica. De este modo, se ha realizado un diseño en el que se minimizan los efectos de la temperatura en la medida del sensor. También se estudió el grado en el que la temperatura pudiese afectar a muestras de distinto tamaño, de forma que, en caso de necesidad, pudiera ser corregido.

Seguidamente, se analizó el diseño final con respecto a criterios de fabricación con el objetivo de adecuar el diseño a las capacidades del Servicio de Mecánica de Precisión de la Universidad de Zaragoza.

El diseño CAD se ha realizado con el programa SolidEdge, así como el análisis de las deformaciones del sistema mediante el método de los elementos finitos. De este modo, se ha podido estimar la deformación total del sistema y saber si podría llegar a alterar la calidad de la medida.

Además del soporte para el sensor confocal, se ha realizado el diseño de un portamuestras que se fija en el nanoposicionador, incluyendo un sistema de agujeros y topes para que el posicionamiento de las muestras a medir sea repetible.

Por último, aprovechando el sistema ya diseñado, se realizó una adaptación para poder utilizarlo también con un sensor táctil. El procedimiento de desarrollo de este segundo soporte fue similar al del sensor confocal, debiendo realizar todos los cálculos necesarios para obtener una precisión de medida óptima.

# Índice

RESUMEN .....	3
Índice.....	4
Introducción .....	6
1.    Preámbulo.....	6
2.    Componentes.....	8
3.    Objetivos y alcance.....	10
Desarrollo de un soporte para sensor confocal.....	11
1.    Introducción.....	11
2.    Desarrollo Inicial.....	13
2.1    Primer soporte.....	13
2.2    Segundo soporte.....	15
3.    Optimización del diseño final.....	17
3.1    Materiales .....	17
3.2    Expansión térmica .....	22
3.3    Cálculo mediante elementos finitos .....	27
3.4    Portamuestras y varillas.....	31
Desarrollo de un soporte para sensor táctil.....	33
1.    Introducción.....	33
2.    Optimización del diseño final.....	35
2.1.    Materiales .....	35
2.2.    Expansión térmica .....	36
2.3.    Cálculo mediante elementos finitos .....	42
Conclusión .....	46
Trabajo futuro.....	47
Bibliografía .....	47
Anexos.....	48
1.    Catálogos .....	49
1.1.    Catálogo nanoposicionador .....	49
1.2.    Catálogo sensor confocal .....	50
1.3.    Catálogo sensor Heidenhain.....	55
1.4.    Catálogo posicionadora.....	57
1.5.    Catálogo muestra patrón .....	61
2.    Elementos Finitos .....	62
2.1.    Informe sensor confocal .....	62

2.2.	Informe sensor táctil Heidenhain .....	66
3.	Estudios de expansión térmica .....	70
3.1.	Estudio conjunto sensor confocal.....	70
3.2.	Estudio conjunto sensor táctil .....	71
4.	Bocetos .....	72
5.	Planos .....	75

# Introducción

## 1. Preámbulo

En la actualidad, los nanoposicionadores son herramientas fundamentales en los procesos de nanotecnología y nanofabricación. Se utilizan para medir y manipular muestras en una escala de precisión muy alta.

Con el progreso tecnológico actual, se ha hecho necesario que los componentes fabricados sean de dimensiones cada vez más reducidas. Debido a ello, la necesidad de ser cada vez más precisos y de poder trabajar en unos rangos de precisión más altos ha ido en aumento a lo largo de los años.

Esta necesidad fue la que impulsó el proyecto de crear la nanoplataforma desarrollada en la Universidad de Zaragoza, que se espera posicione de manera efectiva en una escala nanométrica en un rango de 50 mm x 50 mm.

La nanoplataforma consta de tres partes (Figura 1), una base inferior, una parte superior y una parte móvil que se encuentra en medio. En la parte móvil se posicionará el sensor.

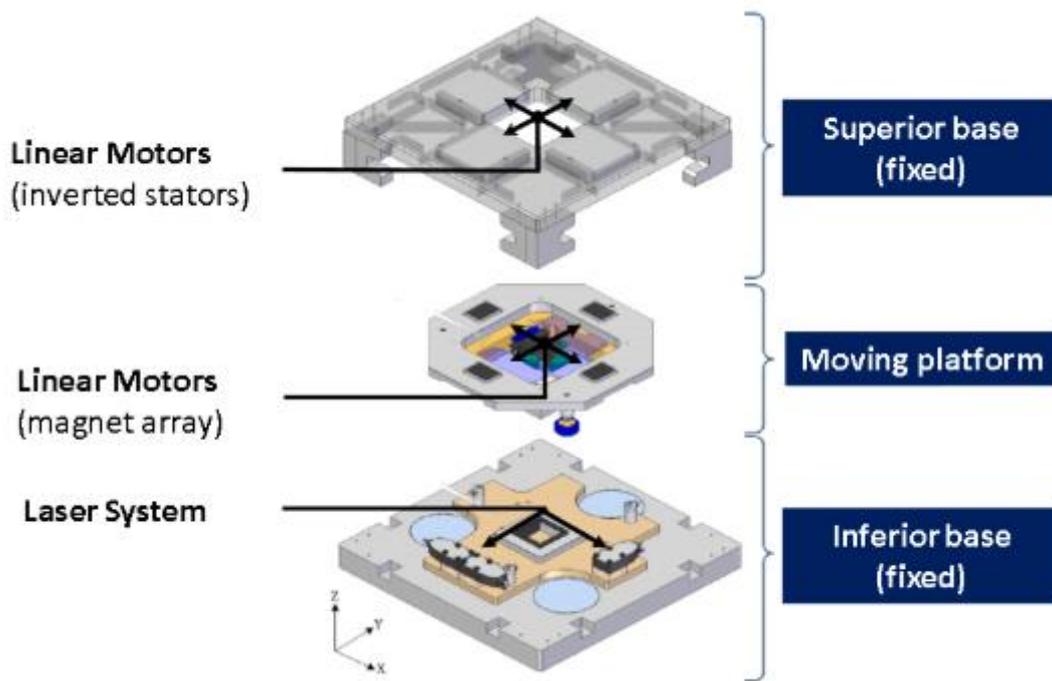


Figura 1. Nanoplataforma. Fuente: [0]

El funcionamiento de la nanoplataforma es el siguiente:

-Primeramente, cuatro cojinetes de aire a presión permiten que la parte móvil de la plataforma levite, de manera que todo el movimiento se realiza en el aire sin generar ninguna fricción con el suelo.

-A continuación, cuatro motores lineales introducidos en la nanoplataforma, la posicionan en el punto requerido.

-Una vez que la nanoplataforma se encuentra en el punto requerido, los cojinetes se apagan y la plataforma queda estática. En este punto, el sensor posicionado en la parte móvil (ahora estática), mide la muestra que se encuentra en el nanoposicionador, que se encuentra en la parte fija.

El diseño que se desarrolla en este trabajo se utilizará para medir mediante los sensores que luego se utilizarán en la nanoplataforma, pero en este caso, en el exterior de esta. Por lo tanto, servirá para simular las mediciones que se producen una vez la nanoplataforma se encuentra en su modo estático. De esta manera, se podrán comparar las mediciones realizadas mediante la nanoplataforma con las mediciones realizadas mediante el soporte diseñado en este Trabajo de Fin de Grado, y de esta manera comprobar la calidad de las mediciones de la nanoplataforma desarrollada.

Estas mediciones se realizarán mediante dos sensores, un sensor confocal y uno táctil, aunque el objetivo final del proyecto de investigación es el de llegar a medir con el AFM (microscopio de fuerzas atómicas), cuyo funcionamiento es más complejo.

Para llevar a cabo el diseño de este Trabajo de Fin de Grado ha sido necesario realizar una serie de bocetos, cálculos, comprobaciones y estudios mediante software, para finalmente comprobar que todo funcionaba correctamente.

Puesto que, como se ha dicho, las mediciones se realizarán con dos sensores, fue necesario desarrollar dos diseños diferentes que se adaptarán a las características de cada dispositivo.

Junto con el sensor confocal, fue necesario diseñar un portamuestras y unas varillas, que permiten realizar mediciones con repetibilidad.

Finalmente, ambos conjuntos se finalizaron con éxito, y están a la espera de ser fabricados en el Servicio de Mecánica de Precisión de la Universidad de Zaragoza.

## 2. Componentes

Para el proyecto se han seleccionado los siguientes componentes:

**-Muestra:** Para el estudio de la calidad de medición de ambos sensores es necesario disponer de un patrón de referencia. En este caso, se optó por la marca T&S Längenprüftechnik, modelo KN15, que mide 10 mm de altura (Figura 2).



Figura 2. Muestra T&S, KN15. Fuente: [1]

**-Nanoposicionador:** se ha elegido el nanoposicionador de la marca n.point, modelo NPXY100Z10A. En la Figura 3, se detallan algunas de sus especificaciones:

NPXY100Z10A

Specifications

<p>Range (µm)                    100 x 100 x 10</p> <p>Footprint (mm)              140 x 140 x 30</p> <p>Aperture (mm)               68 x 68</p> <p>Material                        Aluminum</p> <p>Max Load (kg)               1</p>	<p>The NPXY100Z10A is a closed-loop XYZ nanopositioner with 100µm x 100µm x 10µm range of motion. It has the highest resonant frequency available in the market for products of similar function. Its large aperture allows for easy integration with optical microscopes or any application that requires easy sample access.</p>																			
<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center; color: #4CAF50; font-weight: bold;">XY</td> <td style="text-align: center; color: #4CAF50; font-weight: bold;">Z</td> </tr> <tr> <td>Position Noise (nm)</td> <td style="text-align: center;">0.5</td> <td style="text-align: center;">0.1</td> </tr> <tr> <td>Small Signal Settling Time (ms/1µm step)</td> <td style="text-align: center;">15</td> <td style="text-align: center;">7</td> </tr> <tr> <td>Resonant Frequency (Hz, unloaded, typical)</td> <td style="text-align: center;">600</td> <td style="text-align: center;">1600</td> </tr> <tr> <td>Linearity Error (%)</td> <td style="text-align: center;">0.05</td> <td style="text-align: center;">0.5</td> </tr> <tr> <td>Hysteresis (% , typical)</td> <td style="text-align: center;">0.05</td> <td style="text-align: center;">0.5</td> </tr> </table>		XY	Z	Position Noise (nm)	0.5	0.1	Small Signal Settling Time (ms/1µm step)	15	7	Resonant Frequency (Hz, unloaded, typical)	600	1600	Linearity Error (%)	0.05	0.5	Hysteresis (% , typical)	0.05	0.5	<p style="color: #4CAF50; font-weight: bold; margin-top: 10px;">Application Examples</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Near-Field Scanning Optical Microscopy</li> <li>• Scanning Probe Microscopy</li> <li>• Optical Microscopy</li> <li>• Lithography</li> <li>• Nanometer-scale Manipulation</li> <li>• Metrology</li> <li>• Optical Fiber Alignment</li> </ul>	
	XY	Z																		
Position Noise (nm)	0.5	0.1																		
Small Signal Settling Time (ms/1µm step)	15	7																		
Resonant Frequency (Hz, unloaded, typical)	600	1600																		
Linearity Error (%)	0.05	0.5																		
Hysteresis (% , typical)	0.05	0.5																		
<p>Part Number                    3715128</p>																				

Figura 3: n.point NPXY100Z10A. Fuente: [2]

**-Sensor Heidenhain:** Para el sensor táctil se optó por el HEIDENHAIN-METRO, de la casa HEIDENHAIN (Figura 4).

## HEIDENHAIN-METRO

Incremental length gauges with  $\pm 0.2 \mu\text{m}$  accuracy

- High repeatability
- Plunger actuation by cable release, by the workpiece or pneumatically
- Ball-bush guided plunger

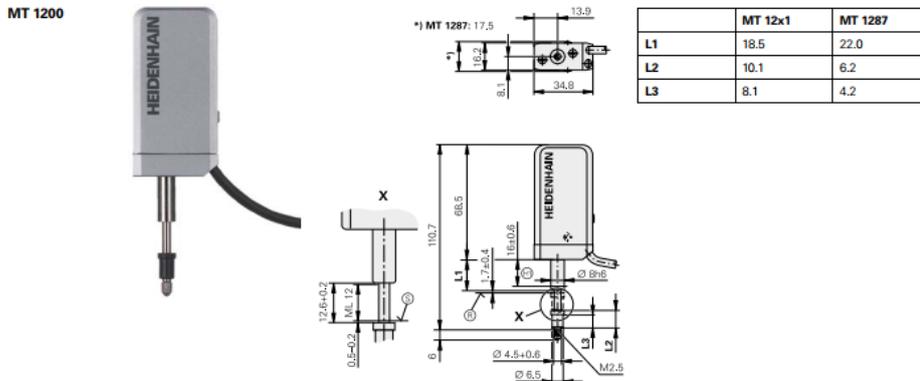


Figura 4: HEIDENHAIN-METRO. Fuente: [3]

**-Posicionadora:** Para poder ampliar el rango de medición del sistema (sensor confocal/sensor táctil) es necesario utilizar una posicionadora lineal en vez del nanoposicionador que permita desplazar la muestra. En este caso se eligió la L-509.4ASD00 de la marca PI (Figura 5).

### L-509

- + Travel ranges from 26 to 102 mm (1" to 4")
- + Repeatability to  $0.05 \mu\text{m}$
- + Optional direct metrology linear encoder
- + Stepper Motor or DC Gear Motor
- + Direction- sensing reference point switch
- + Integrated optical limit switches



Figura 5: PI L-509.4ASD00. Fuente: [4]

**-Sensor confocal:** En cuanto al sensor se ha elegido el CL4 MG 35 de la casa STIL (Figura 6).



Figura 6: STIL CL4 MG 35. Fuente: [5]

En el anexo encontraremos todas las especificaciones necesarias de cada componente, apareciendo el catálogo completo de cada uno de ellos en la bibliografía.

### 3. Objetivos y alcance

Este trabajo tiene como objetivo la realización del diseño para la fabricación de dos soportes en el que irán alojados dos sensores, táctil y confocal, de forma que nos permita hacer comprobaciones de las mediciones de alta precisión que toman estos equipos (táctil/confocal).

Es necesario tener en cuenta que el sensor táctil realiza mediciones correctas a una distancia de 20 mm, por tanto, el soporte deberá tener libertad de movimiento en el eje Z, para poder ajustar el sensor a esta distancia.

El sensor táctil trabaja en contacto directo con la muestra. Debido a que estas pueden variar de tamaño, también se realiza el diseño del sensor con libertad en el eje Z.

También se lleva a cabo un estudio en el cual se analiza el efecto de la expansión térmica en ambos conjuntos. A partir de los resultados obtenidos, se realiza un diseño más eficiente en el cual se minimiza el efecto de la expansión térmica en las mediciones.

Ambos conjuntos se diseñan en SolidEdge, para estudiar los desplazamientos, las deformaciones y la inclinación con la que medirá el sensor.

Una vez concretado el diseño, se fabricarán ambos conjuntos (táctil/confocal) en el taller Mecánico de la Universidad de Zaragoza.

El destino final de este sensor será formar parte integrante del proyecto de la nanoplataforma que se está llevando a cabo en la Universidad de Zaragoza.

## Desarrollo de un soporte para sensor confocal

### 1. Introducción

A continuación, se procede a describir el desarrollo del primer soporte para el sensor confocal.

Este sensor mide la altitud (coordenada z) de un punto en una muestra, posicionado en su eje óptico. También es capaz de medir el grosor de muestras transparentes.

En la Figura 7, se observa una imagen del conjunto. Estos tipos de sensores están compuestos por un controlador (1), un lápiz óptico (2), y un cable de fibra óptica (3). El lápiz óptico se ha representado en detalle en la Figura 8.

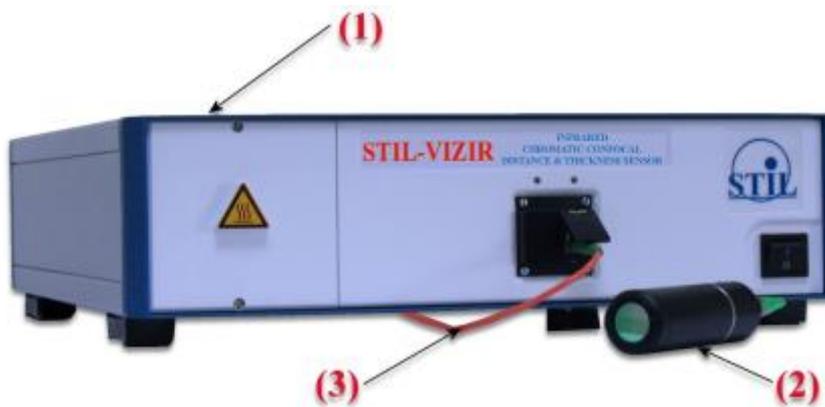


Figura 7. Controlador (1), lápiz óptico (2) y cable de fibra óptica (3). Fuente: [5]

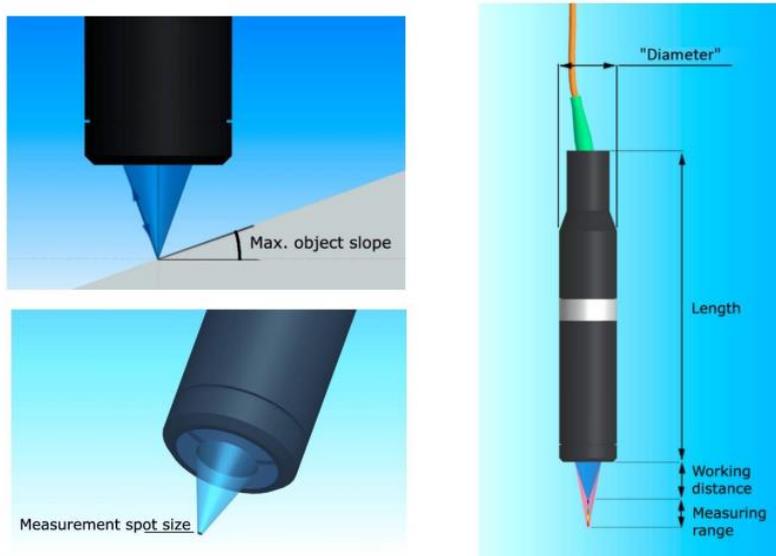


Figura 8. Lápiz óptico (2). Fuente: [5]

Este sensor medirá las variaciones en altura de la superficie de las muestras colocadas en un nanoposicionador de la marca n.point (Figura 9). Este nanoposicionador piezoeléctrico mueve las muestras mediante un motor piezoeléctrico que utiliza la electricidad para generar vibraciones en un material piezoeléctrico de forma que produzca un movimiento lineal.

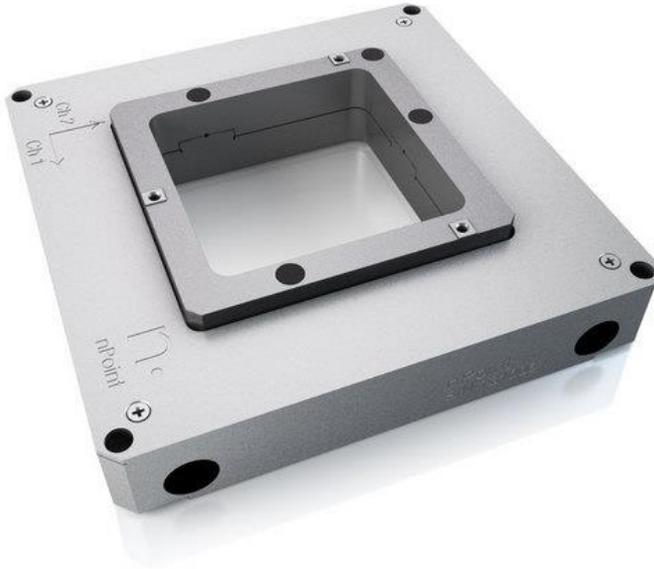


Figura 9. Nanoposicionador npoint. Fuente: [1]

En este proceso fue necesario diseñar varios conjuntos hasta dar con el que más se adecuara a los requisitos.

Primeramente, se diseñó un conjunto mediante una plancha, una corredera y un anillo de sujeción para el sensor confocal. Una vez estudiados los beneficios y los inconvenientes del conjunto, se decidió optar por un segundo diseño.

Este segundo conjunto consiste en una base con un cilindro por el cual se desliza un soporte. Este diseño fue más convincente debido a que es capaz de reducir el efecto de la expansión térmica, además de ser más fácil de fabricar.

Para comprobar su capacidad de contrarrestar el efecto de la expansión térmica, fue necesario realizar una serie de cálculos. En base a ellos se eligió en qué material se debía fabricar el soporte.

Por último, fue necesario comprobar los esfuerzos que sufre todo el conjunto mediante el cálculo de elementos finitos, con el programa SolidEdge.

Todos estos apartados se observan a continuación en este capítulo.

## 2. Desarrollo Inicial

A continuación, se expone el procedimiento que hubo que llevar a cabo hasta decidirse por el diseño más óptimo. Se explicarán las ideas iniciales y los motivos por los cuales fueron desechadas, así como la justificación de la decisión del diseño definitivo.

Para llevar a cabo el diseño se tuvieron en cuenta una serie de restricciones:

- **Altura de trabajo del sensor:** La altura óptima a la que trabaja el sensor son 20 mm.
- **Grados de libertad que se le quiere dar al soporte:** Era esencial que el sensor se pudiera mover en el eje Z, para regular la altura a la que debe trabajar. Los ejes X e Y son importantes para la correcta colocación de la muestra en relación con el sensor, pero este punto de trabajo también se puede regular variando la colocación del nanoposicionador e incluso de la muestra.
- **Magnitud de los errores que se pueden tolerar:** En las especificaciones técnicas del sensor se observa que tiene una precisión de 0,3  $\mu\text{m}$ .

### 2.1 Primer soporte

En primer lugar, se desarrolló el soporte que se representa en la Figura 10. Este consistía en una plancha doblada (1) que se atornillaba directamente sobre el nanoposicionador (2) con una corredera (3) de modo que se pudiera colocar el sensor (4) a lo largo de un eje X. Además, con el agarre mediante anillo (5) que se había diseñado, se podía colocar el confocal a lo largo de un eje Z, permitiendo su posicionado a lo largo de ambos ejes.

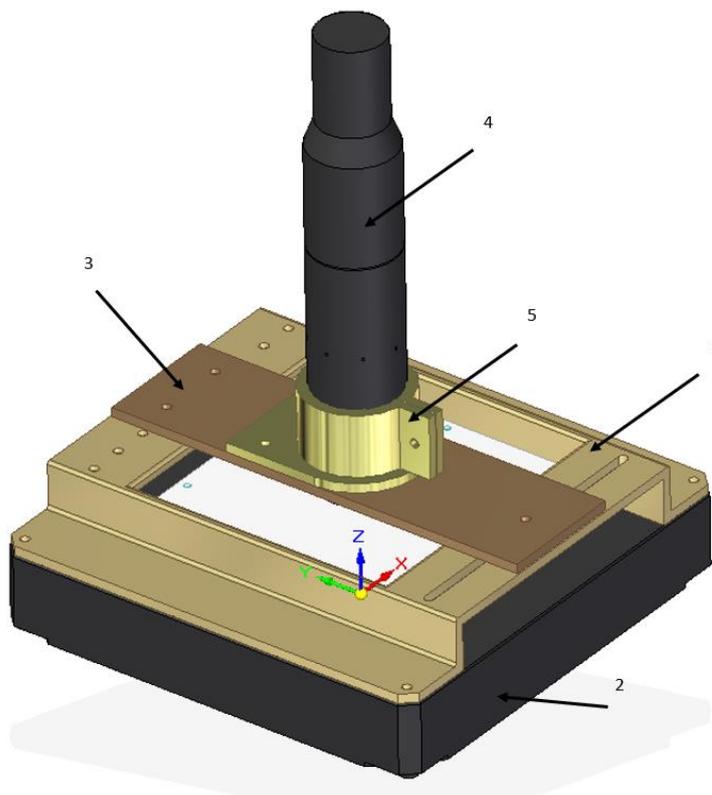


Figura 10. Conjunto primer soporte. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

En el anexo (apartado 4) se observan los primeros bocetos de este soporte.

Este conjunto pareció muy acertado debido a la flexibilidad que transmitía, permitiendo colocar el sensor a lo largo de dos ejes perpendiculares. Además, la unión se producía directamente con el nanoposicionador mediante cuatro tornillos, lo cual evitaba problemas a la hora de la colocación del n.point, puesto que iba todo unido.

En un primer momento, su diseño se realizó sin corte (Figura 11), puesto que parecía más sólido, pero para la correcta colocación del puente mediante tornillos y para poder manipular el portamuestras, fue necesario realizar dos cortes laterales (Figura 12).

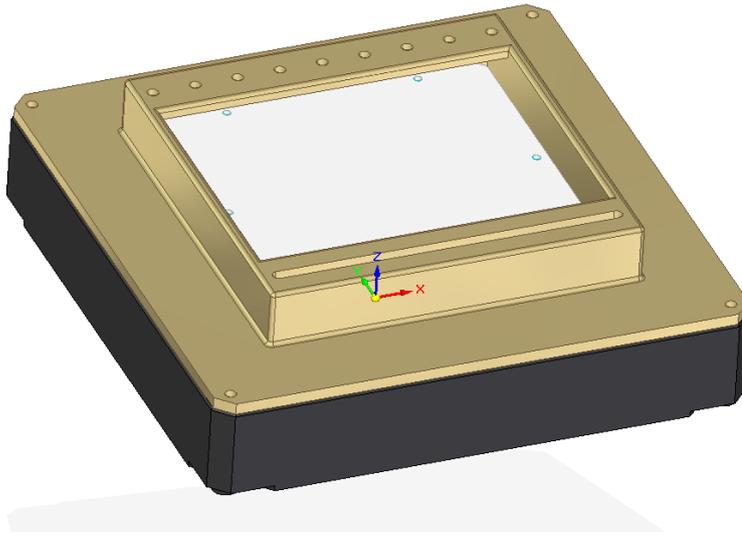


Figura 11. Primer soporte sin corte. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

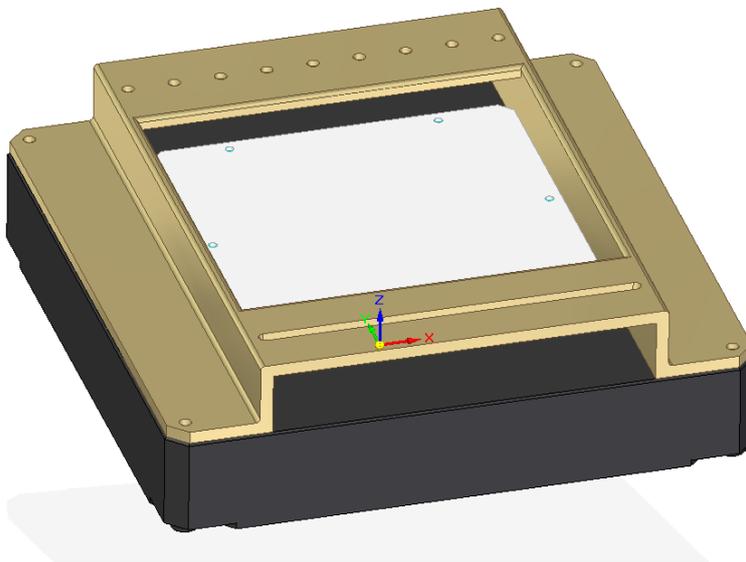


Figura 12. Primer soporte con corte. Fuente: elaboración propia SolidEdge

Este primer diseño en principio parecía correcto, pero se descartó debido a que su procedimiento de fabricación podría ser problemático, por tanto, hubo que desestimar esta opción y desarrollar otra idea.

## 2.2 Segundo soporte

Una vez descartado el primer diseño, se procedió a desarrollar otro diseño (Figura 13). En esta ocasión se tuvieron en cuenta algunas sugerencias proporcionadas por el Servicio de Mecánica de Precisión para que la fabricación resultará más factible. Esta vez se optó por un montaje mediante un cilindro (1) en el cual se engancha un soporte (2), que sujetará el sensor (3), todo ello apoyado en una base de aluminio (4). Este montaje permitía colocar el confocal a lo largo de un eje Z, puesto que el enganche se puede deslizar por el cilindro. El nanoposicionador (5) se coloca sobre la base de aluminio en el punto deseado, pero no se fija de ningún modo.

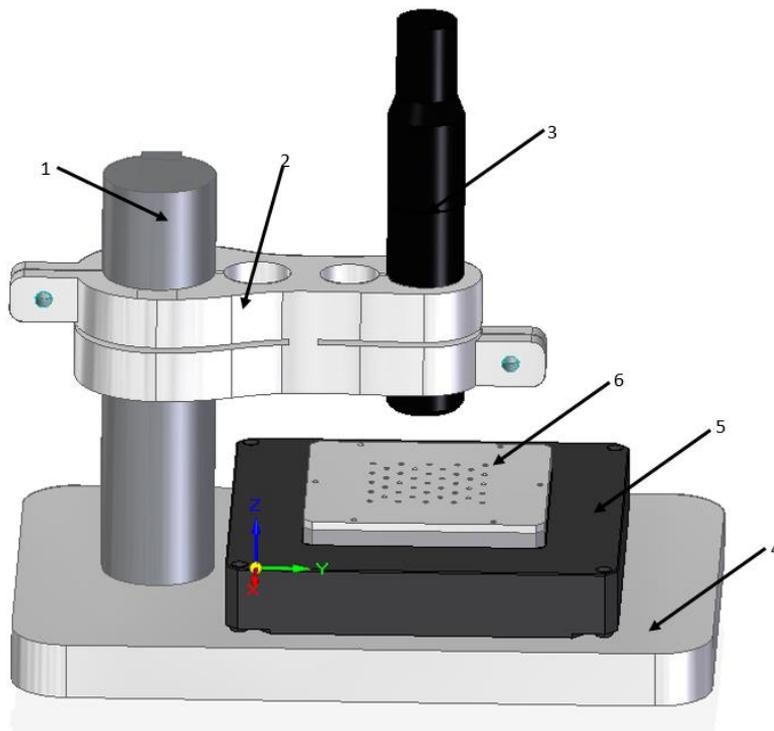


Figura 13. Conjunto definitivo soporte sensor confocal. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

Además de este montaje, fue necesario añadir un portamuestras (6) para poder fijar las muestras de manera repetible. Su funcionamiento se explica más adelante en este capítulo.

Este conjunto parecía bastante apropiado especialmente para compensar la expansión térmica añadiendo un escalón al enganche.

La forma de conseguir un buen apriete en el soporte es mediante unos pomos que irán introducidos en las pestañas exteriores. Para que funcionen de forma correcta, una pestaña está roscada y la otra no. De no ser así, no sería posible que el pomo roscase de forma continua.

En el diseño de este soporte fue fundamental añadir los dos cortes intermedios y los dos agujeros adicionales en el enganche (Figuras 14 y 15). Estos juegan un papel importante en la elasticidad de la pieza ya que, sin ellos, no sería posible ejercer un apriete de forma

correcta. Esto se puede observar con más detalle en el análisis por Elementos Finitos realizado en el apartado 3.3.

Para orientarlo de forma correcta con respecto al nanoposicionador se decidió acoplarle una chaveta, mediante el chavetero. De este modo, siempre que se introduzca el soporte en el cilindro, adoptará la misma posición.

El motivo de que las pestañas no estén alineadas es compensar la expansión térmica. Esta justificación se desarrolla en el apartado 3.2.

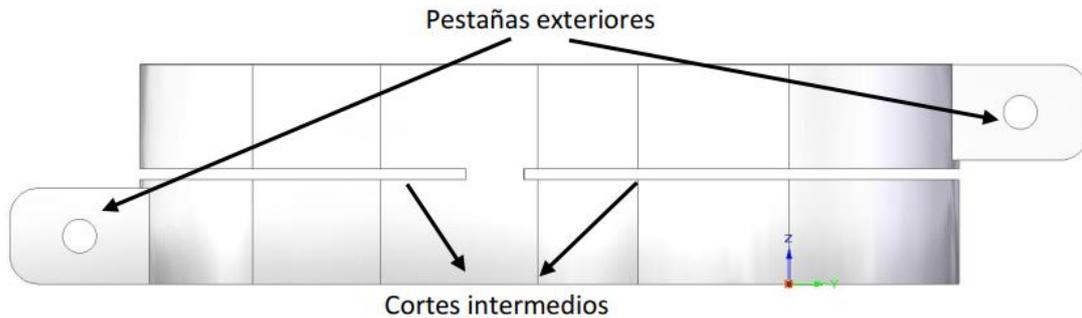


Figura 14. Soporte sensor confocal (1). Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

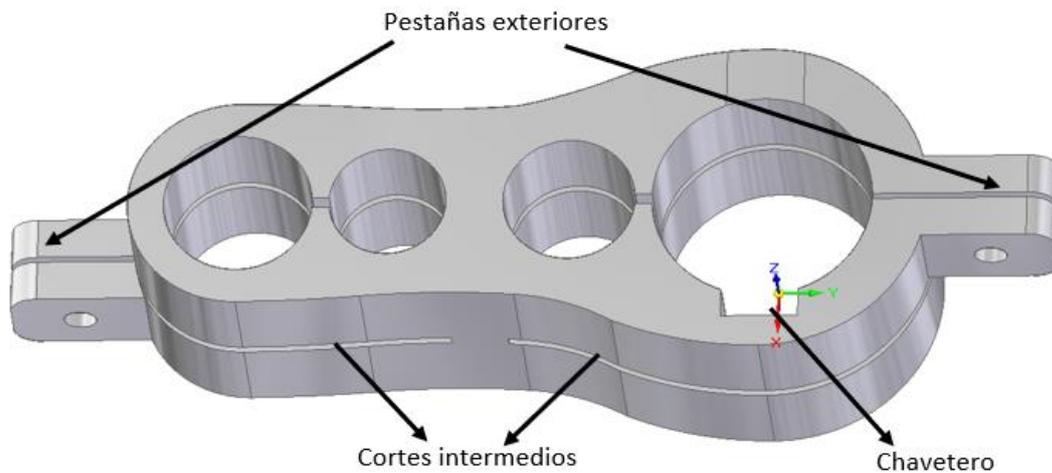


Figura 15. Soporte sensor confocal (2). Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

Todos los detalles se observan con más precisión en los planos del anexo.

### 3. Optimización del diseño final

#### 3.1 Materiales

Un punto clave en la definición del diseño final fue la elección de los materiales de fabricación de cada pieza. Para ello se tuvieron que valorar características como:

- Densidad: por su impacto en el peso final del sistema.
- Rigidez: para limitar las posibles deformaciones en el sistema.
- Coeficiente de expansión térmica: las dilataciones no controladas de la estructura tienen un impacto muy significativo en la precisión del sistema de medición
- Adecuación al montaje: hay combinaciones de materiales que no son muy apropiadas para estar en contacto mutuo.

A continuación, se describe la selección realizada:

- **Cilindro:** Al ser una pieza clave que tiene que soportar un mayor desgaste, puesto que por él se desliza el soporte, se optó por fabricarlo en acero niquelado F-118. La chaveta que se introduce en el cilindro es de acero niquelado F-114.
- **Base:** Es la pieza donde se apoya el nanoposicionador y a la cual se atornilla el cilindro. Su función es sujetar y no sufrir tanto desgaste. Debido a esto y al ser una pieza grande, se fabricó de aluminio para que sea más ligera. En concreto duraluminio 6082 anodizado blanco.
- **Soporte:** Para esta pieza se dudaba entre dos opciones, latón o aluminio. Ambos son metales más blandos que el acero, y esto era un requisito recomendable para favorecer el apriete. En un principio se optó por el latón ya que el aluminio es más sucio y puede llegar a manchar las piezas. Pero al final se eligió el aluminio por dos razones:

1.- Cálculos de expansión térmica: en ellos se observa que el diseño de la pieza será más sencillo con aluminio.

2.- Peso: este fue el factor determinante por el que fue elegido el aluminio. El soporte en latón tendría un peso de 1,206 kg y en aluminio de 0,386 kg. Se estudió la posibilidad de aligerar la pieza quitando las dos anillas que funcionan como guía, pero incluso en ese supuesto la pieza en latón pesaba 0,709 kg y en aluminio 0,227 kg. Se decidió que 0,709 kg era excesivo, por tanto, se optó por la opción de aluminio incluyendo las dos anillas, en particular duraluminio 6082 anodizado blanco.

Todas las opciones se observan a continuación en las Figuras 16, 17, 18 y 19, en los diseños realizados en SolidEdge para conocer las características de cada diseño.

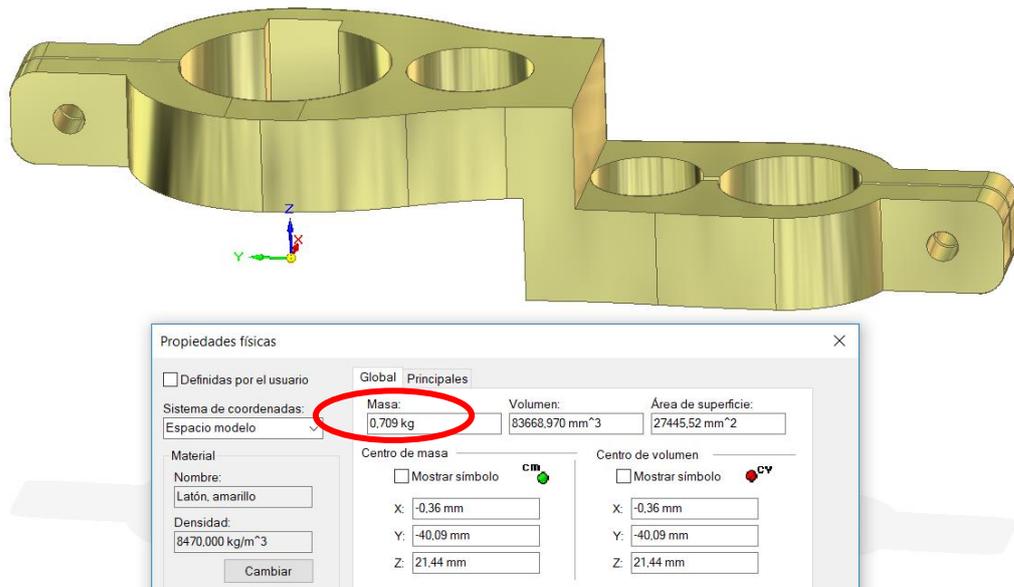


Figura 16. Enganche aligerado en latón. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

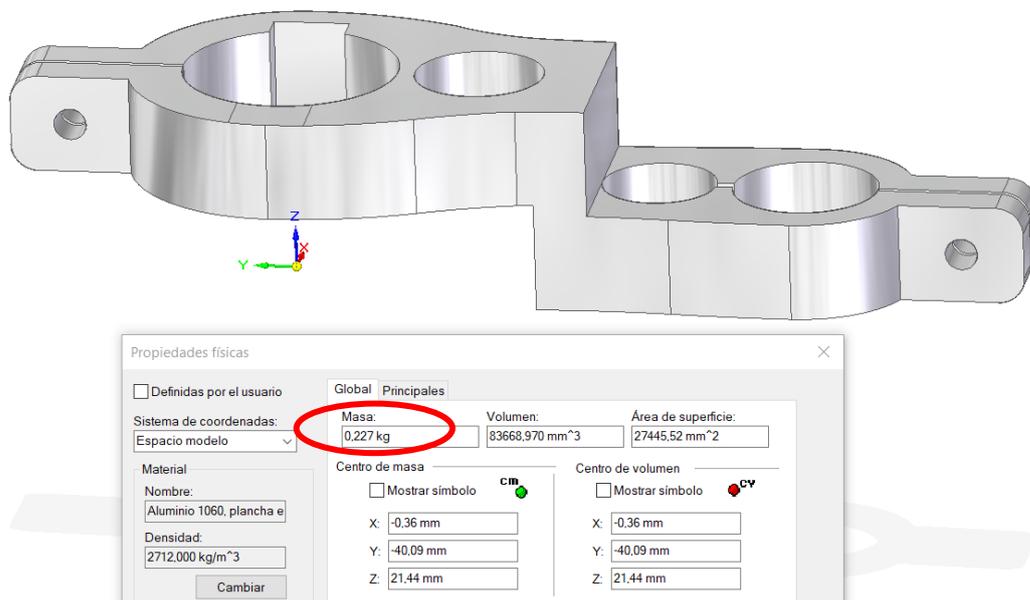


Figura 17. Enganche aligerado en aluminio. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

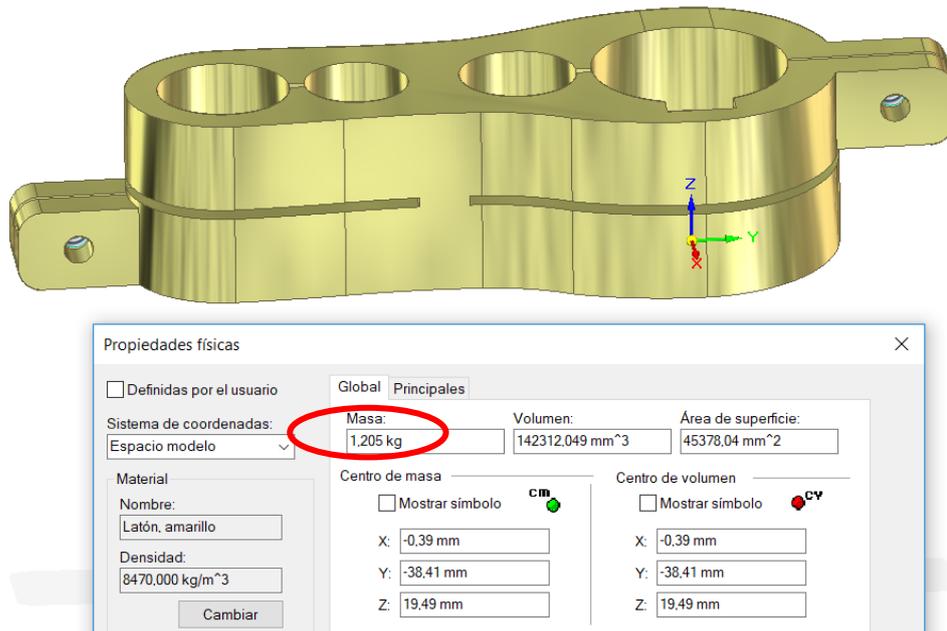


Figura 18. Enganche sin aligerar en latón. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

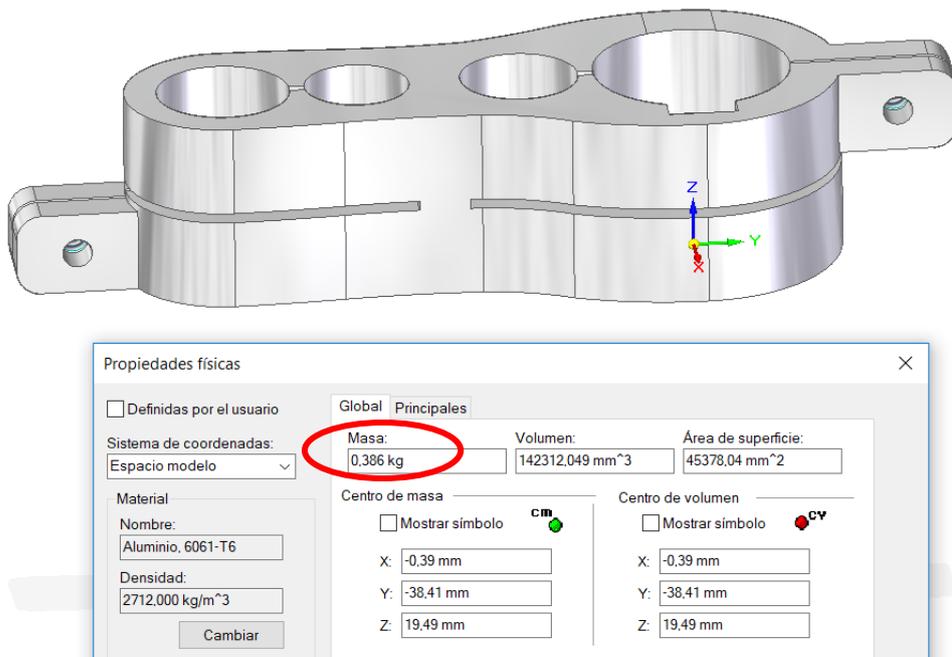


Figura 19. Enganche sin aligerar en aluminio. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

- **Portamuestras:** Más adelante se comentará la fabricación de esta pieza junto con las varillas. Se decidió que su fabricación fuera en aluminio puesto que es una pieza que no sufre un gran desgaste, en concreto duraluminio 6082 anodizado blanco. Las varillas se fabrican en latón para prevenir su desgaste frente al alumnio.
- **Nanoposicionador:** Según especificaciones del catálogo, el n.point es principalmente de aluminio (Figura 20).



nanopositioning | motion control

NPXY100Z10A

**Specifications**

---

Range (µm)	100 x 100 x 10	
Footprint (mm)	140 x 140 x 30	
Aperture (mm)	68 x 68	
Material	Aluminum	
Max Load (kg)	1	

	XY	Z
Position Noise (nm)	0.5	0.1
Small Signal Settling Time (ms/1µm step)	15	7
Resonant Frequency (Hz, unloaded, typical)	600	1600
Linearity Error (%)	0.05	0.5
Hysteresis (% , typical)	0.05	0.5

Part Number	3715128
-------------	---------

**The NPXY100Z10A is a closed-loop XYZ nanopositioner with 100µm x 100µm x 10µm range of motion. It has the highest resonant frequency available in the market for products of similar function. Its large aperture allows for easy integration with optical microscopes or any application that requires easy sample access.**

**Application Examples**

- Near-Field Scanning Optical Microscopy
- Scanning Probe Microscopy
- Optical Microscopy
- Lithography
- Nanometer-scale Manipulation
- Metrology
- Optical Fiber Alignment

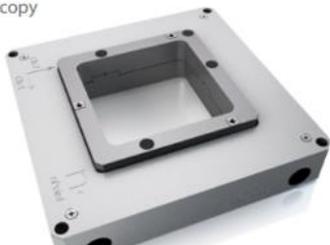


Figura 20. Características n.point. Fuente: [1]

- Sensor confocal:** En el catálogo (Figura 21) no se especifica el material, pero sí el peso (0,155 kg). En función de esto se realizó su diseño en SolidEdge. En este catálogo se observa que la distancia de trabajo es de 16,2 mm, pero en las especificaciones de las instrucciones del sensor, indicaban una distancia de 20 mm, que fue la que se utilizó finalmente para realizar los cálculos.

CL-MG Line Specifications for CCS Optima+ Controller																
Model		CL0 <sup>(1,5)</sup>		CL1		CL2		CL3		CL4		CL5		CL6		
Measuring range <sup>(1)</sup>	µm	100		150		400		1300		4000		12000		24000		
Working distance <sup>(2)</sup>	mm	2.69		3.35		10.8		12.0		16.2		25.9		21.5		
Max. sample slope <sup>(3)</sup>	deg	±42°		±42.5°		±28°		±25°		±21°		±14°		±8.5°		
Reference plate <sup>(4)</sup>	-	No		No		Yes		Yes		Yes		Yes		No		
Axial model <sup>(5)</sup>	-	Standard Optional														
Radial model <sup>(5)</sup>	-															
Magnifier model		MG 210	MG 140	MG 210	MG 140	MG 210	MG 140	MG 70	MG 140	MG 70	MG 35	MG 20	MG 35	MG 20	MG 35	MG 20
<b>NUMERICAL APERTURE</b>																
Beginning of M.R.	-	0.76	0.76	0.72	0.72	0.47	0.47	0.47	0.43	0.43	0.35	0.35	0.25	0.25	0.19	0.19
Mid-range	-	0.75	0.75	0.71	0.71	0.46	0.46	0.46	0.41	0.41	0.33	0.33	0.21	0.21	0.14	0.14
End of M.R.	-	0.75	0.75	0.71	0.71	0.46	0.46	0.46	0.41	0.41	0.32	0.32	0.20	0.20	0.12	0.12
<b>LATERAL (XY) PROPERTIES</b>																
<b>Spot size<sup>(12)</sup></b>																
Beginning of MR	µm	1.6	2.0	2.4	3.2	3.5	4.6	8.1	6.0	10.8	10.7	17.6	19.6	32.8	18.6	30.5
Center of MR	µm	1.8	2.2	2.7	3.5	4.0	5.2	8.8	6.8	11.9	12.3	19.9	24.3	40.0	26.8	43.0
End of MR	µm	1.9	2.4	3.0	3.8	4.4	5.7	9.3	7.4	12.6	13.4	21.3	27.2	44.2	32.7	51.4
Lateral resolution <sup>(6)</sup>	µm	1.1	1.0	1.1	1.3	1.7	1.8	3.7	2.6	4.5	4.6	7.0	11	14	11	18
<b>PHOTOMETRIC EFFICIENCY<sup>(7)</sup></b>																
Collected energy (relative)		0.5	1.7	3.3	10	2.8	7.9	41	10	57	25	91	33	100	9.8	43
<b>MECHANICAL INTERFACE</b>																
Length <sup>(8)</sup>	mm	263.6	229	253.1	217.1	243.3	208.9	176.1	205.9	176.1	145.5	131.7	145.5	131.7	167.6	151.8
Diameter	mm	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Weight <sup>(8)</sup>	g	227	192	268	195	248	190	189	215	214	155	140	175	160	195	180

Figura 21. Características sensor confocal. Fuente: [2]

### 3.2 Expansión térmica

Como ya se ha comentado, este diseño mediante escalón permitirá compensar la expansión térmica del cilindro frente al soporte. Para ello se ha seguido el siguiente procedimiento para el cálculo (Figura 22).

Inicialmente se diseñó el soporte con un escalón (distancia en el eje Z entre pestañas) de 20,5 mm. Mediante los cálculos siguientes, averiguamos cuanto debería ser acortado el escalón para que con una variación de temperatura de 2°C (condiciones de laboratorio), la distancia de 30 mm entre el sensor y el portamuestras no varíe.

El resultado de estos cálculos fue un factor determinante en la elección del material con el que finalmente iba a ser fabricado, aunque finalmente el peso fue el factor decisivo.

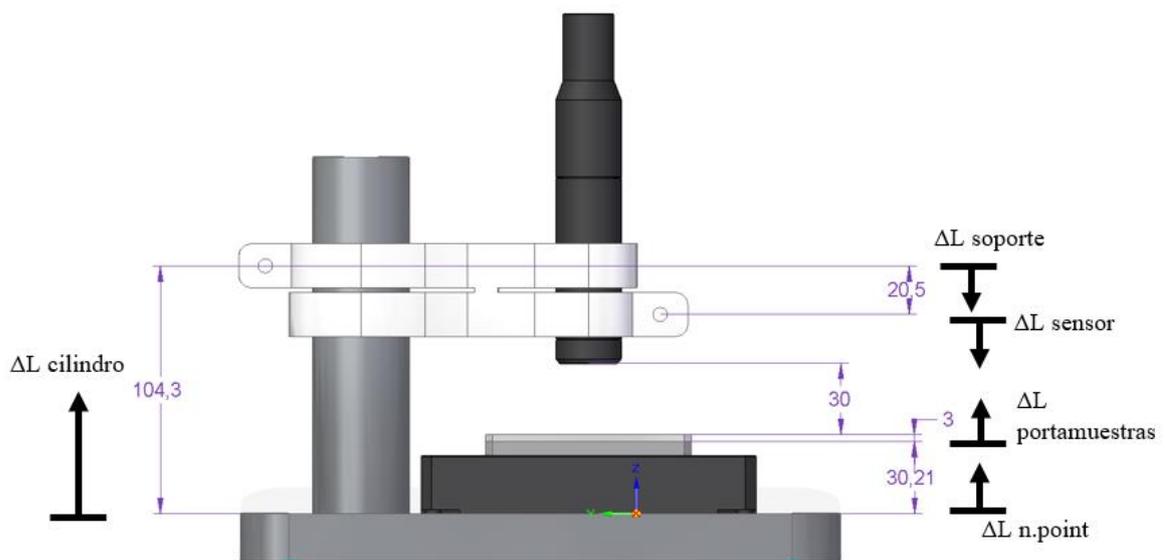


Figura 22. Conjunto soporte sensor confocal, estudio térmico. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

Iniciamos los cálculos con la condición:

$$(1) \Delta L_{\text{cilindro}} - \Delta L_{\text{soporte}} - \Delta L_{\text{sensor}} - \Delta L_{\text{portamuestras}} - \Delta L_{\text{n.point}} = \Delta L_x$$

Siendo  $\Delta L_x$  la variación de la distancia entre el sensor y el portamuestras.

El objetivo principal es que esa variación sea nula en el punto de medición, manteniendo los 30 mm necesarios para medir correctamente. Estos 30 mm están compuestos por los 10 mm que mide la muestra y la distancia correcta de medición del sensor confocal, que es 20 mm.

Además, cada  $\Delta L$  se calculará de la siguiente manera:

$$(2) \alpha = \frac{1}{L} x \frac{\Delta L}{\Delta T^{\circ}}$$

Con:

$\alpha$ : Coeficiente de expansión térmica

$\Delta L$ : Variación de la distancia

$\Delta T^a$ : Variación de temperatura

Aplicamos (2), con los datos conocidos:

- **Cilindro**

Material: Acero

$$\alpha_{\text{acero}} = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(2) 12 \times 10^{-6} = \frac{1}{104,3} \times \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 2,5032 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

- **Soporte**

Material 1: Latón

$$\alpha_{\text{Latón}} = 18 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(2) 18 \times 10^{-6} = \frac{1}{20,5} \times \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 7,38 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

Material 2: Aluminio

$$\alpha_{\text{Aluminio}} = 23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(2) 23 \times 10^{-6} = \frac{1}{20,5} \times \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 9,43 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

- **Portamuestras**

Material: Aluminio

$$\alpha_{\text{Aluminio}} = 23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(2) 23 \times 10^{-6} = \frac{1}{3} \times \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 1,38 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

- **N.point**

Material: Aluminio

$$\alpha_{\text{Aluminio}} = 23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(2) 23 \times 10^{-6} = \frac{1}{30,21} \times \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 1,389 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

- **Sensor**

Hemos supuesto una  $\Delta L_{\text{sensor}} = 0$ , debido a que estará formado internamente por ópticas con un bajo coeficiente de expansión térmica.

Una vez calculadas todas las variaciones de longitud, procedemos a resolver  $\Delta L_x$  para cada caso (soporte de latón y soporte de aluminio).

Aplicamos (1) para cada material:

- **Latón**

$$(1) \Delta L_{\text{cilindro}} - \Delta L_{\text{soporteLatón}} - \Delta L_{\text{sensor}} - \Delta L_{\text{portamuestras}} - \Delta L_{\text{n.point}} = \Delta L_x$$

$$\Delta L_{x\text{Latón}} = 2,382 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

- **Aluminio**

$$(1) \Delta L_{\text{cilindro}} - \Delta L_{\text{soporteAluminio}} - \Delta L_{\text{sensor}} - \Delta L_{\text{portamuestras}} - \Delta L_{\text{n.point}} = \Delta L_x$$

$$\Delta L_{x\text{Aluminio}} = 3,32 \times 10^{-5} \text{ mm}$$

Como puede observarse, con el soporte de aluminio la distancia de 30 mm variará menos que con el soporte de latón.

A continuación, se procede a calcular cuánto habría que acortar o aumentar el escalón para que la distancia de 30 mm no tenga variación alguna.

- **Latón**

$$(3) (L_{\text{cilindro}} - d) \times \Delta T \times \alpha_{\text{cilindro}} - \Delta L_{\text{soporteLa}} - \Delta L_{\text{sensor}} - \Delta L_{\text{portamuestras}} - \Delta L_{\text{n.point}} = 0$$

$$d = -19,85 \text{ mm}$$

- **Aluminio**

$$(4) (L_{\text{cilindro}} - d) \times \Delta T \times \alpha_{\text{cilindro}} - \Delta L_{\text{soporteAl}} - \Delta L_{\text{sensor}} - \Delta L_{\text{portamuestras}} - \Delta L_{\text{n.point}} = 0$$

$$d = -1,509 \text{ mm}$$

Se observa que hay que realizar menor cambio en el diseño con el soporte de aluminio. Ese cambio será de un aumento de 1,5 mm en el escalón (puesto que se había supuesto una d negativa).

A continuación, en la Figura 23 se ha representado cómo afectaría una variación de temperatura de 2°C con muestras de diferentes tamaños medidas con el soporte diseñado finalmente.

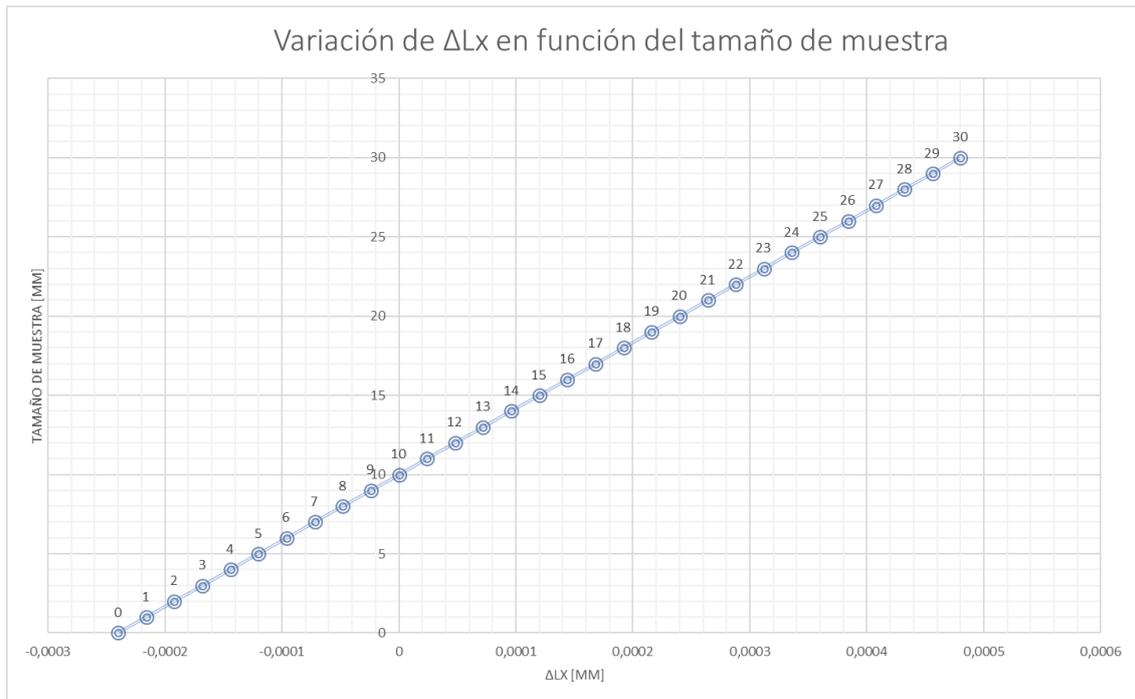


Figura 23. Gráfica estudio de expansión térmica, sensor confocal. Fuente: elaboración propia mediante Excel

Obsérvese que, el menor fallo se encuentra con las muestras de 10 mm, puesto que el diseño del soporte se basa en esta distancia. Se encuentra en ese punto un error de  $2 \times 10^{-9}$  mm, lo cual es despreciable frente a la capacidad de medida del sensor.

También se observa que la variación del error sigue un modelo lineal (todos los efectos que se han combinado son lineales), de tal forma que, el error en la medición debido a la expansión térmica aumenta conforme aumenta el tamaño de muestra. Este error también aumenta de forma lineal conforme el tamaño de muestra disminuye, tal y como se aprecia en la gráfica.

### 3.3 Cálculo mediante elementos finitos

Una vez realizados los cálculos de la expansión térmica, se procede a realizar el diseño del conjunto, estudiando los esfuerzos y los desplazamientos mediante elementos finitos, mediante el programa SolidEdge:

Primeramente, se diseñó cada componente por separado, asignando los materiales comentados anteriormente.

A continuación, se creó un conjunto con todos los componentes, aplicando las restricciones y las conexiones necesarias.

Por último, se impusieron las condiciones de contorno correspondientes, se malló el conjunto y se resolvió, analizando los resultados obtenidos. El programa facilita un estudio en el que se recogen las características del cálculo.

Las condiciones de contorno aplicadas fueron las siguientes:

- La base del conjunto tiene un tipo de restricción fija, puesto que va apoyada en el suelo.
- El nanoposicionador está simplemente apoyado en la base.
- El cilindro está unido con la base mediante un tornillo inferior, que atraviesa la base.
- El soporte va unido con el cilindro mediante apriete. La chaveta entra en juego en esta unión. El apriete lo ejercen las pestañas exteriores del soporte.
- El sensor va unido con el soporte mediante apriete. De nuevo, las orejas exteriores ejercen el apriete.

Todas las características de las condiciones de contorno, del conjunto y del mallado se pueden observar en los anexos.

En la siguiente imagen, pueden verse los resultados del desplazamiento y tensión del conjunto. Como era de esperar, los principales desplazamientos se producen en los puntos extremos del voladizo (Tabla 1).

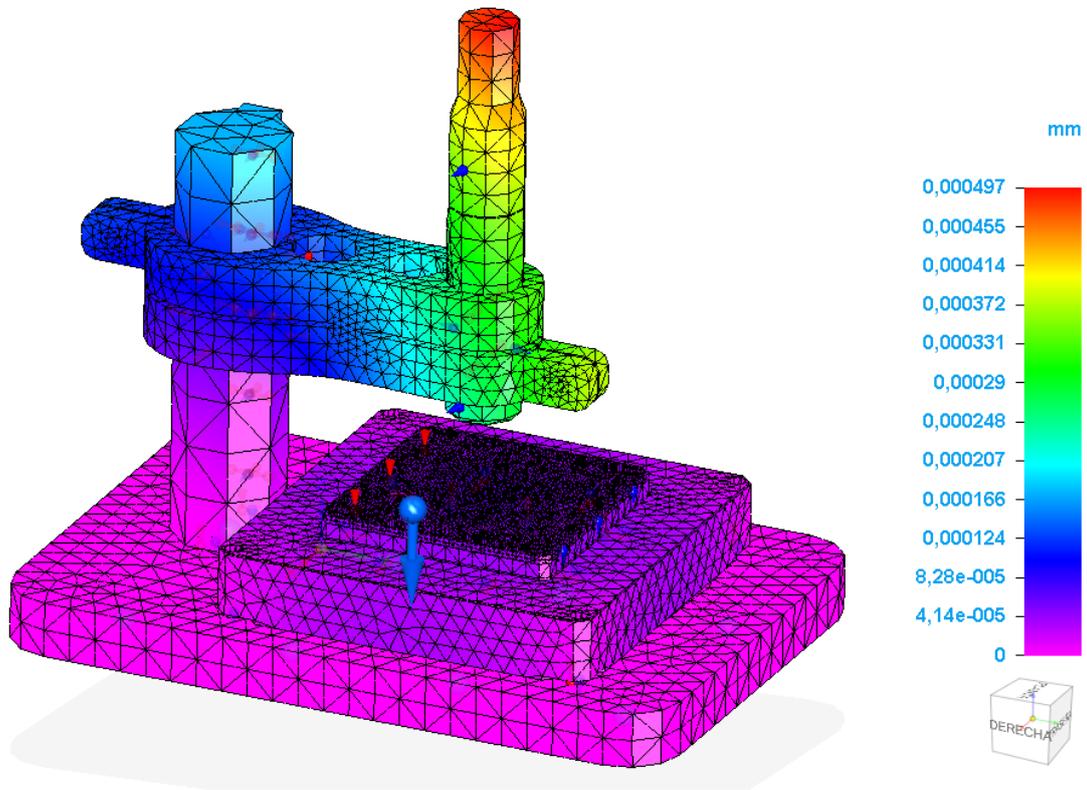


Figura 24. Desplazamiento conjunto soporte sensor confocal, Informe 1. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

Una vez observado el informe, se hace hincapié en los desplazamientos para conocer cuánto será la inclinación del sensor con respecto a la muestra, y si este valor será trascendental para futuras medidas.

A continuación, se calculará la inclinación con la que se ha desplazado el sensor, puesto que, como se observa en la Figura 25, la parte derecha tiene un color más verde que la parte interior, que es más azulada. Según la leyenda de la derecha, esto indica que el extremo derecho se encontrará más abajo que el extremo izquierdo del sensor, lo que le provocará cierta inclinación.

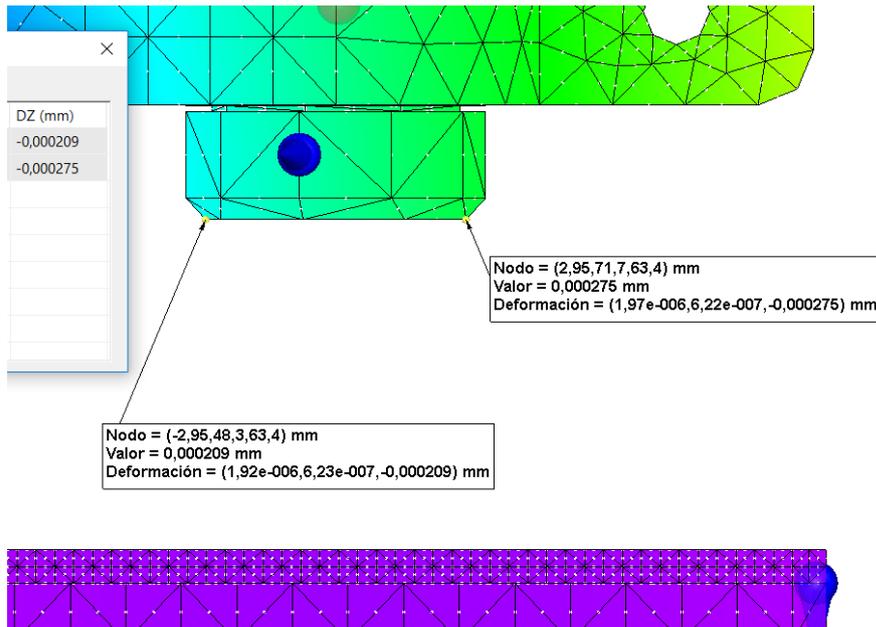


Figura 25. Resultados de desplazamiento (1): detalle de la punta del sensor confocal. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

El punto exterior se desplaza -0,000275 mm en el eje Z y el punto interior -0,000209 mm.

Llegados a este punto, ya se puede calcular el ángulo con el que se inclinará el confocal.

En la Figura 26, en la cual se exagera la inclinación, puede verse el triángulo que se formaría. La altura del triángulo, z, será la diferencia entre los dos desplazamientos. La hipotenusa, h, será el diámetro de la lente de medición del confocal ( $h = 24,16 \text{ mm}$ ).

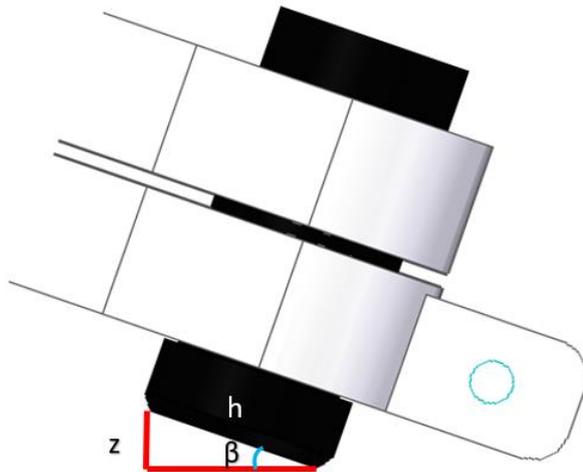


Figura 26. Inclinación sensor confocal. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

Una vez conocidos estos valores, ya es posible hallar el ángulo mediante el seno.

$$z = 0,000275 - 0,000209 = 6,6 \times 10^{-5} \text{ mm}$$

$$\text{sen}(\beta) = \frac{6,6 \times 10^{-5}}{24,16}$$

$$\beta = 2,7314402794 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

Este ángulo se tendrá en cuenta a la hora de interpretar los resultados, puesto que el sensor tomará esa inclinación como si fuera de la muestra.

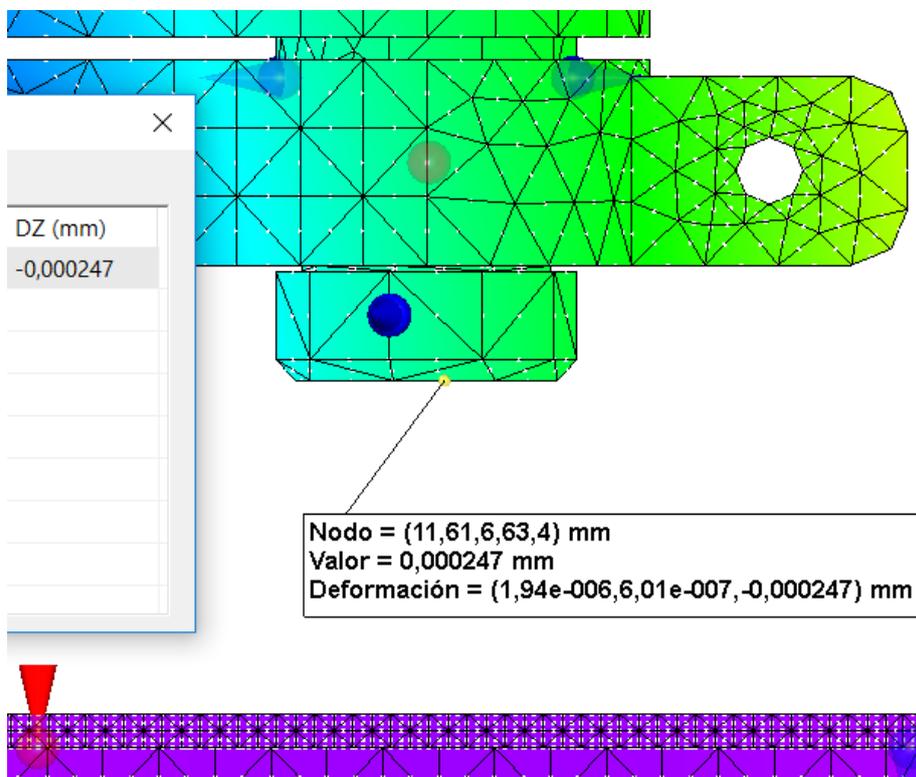


Figura 27. Resultados de desplazamiento (2): detalle de la punta del sensor confocal. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

También se observó que el desplazamiento del sensor es de -0,000247 mm en el eje Z (Figura 27), esto es -0,247  $\mu\text{m}$ . En las especificaciones técnicas del sensor se observa que tiene una precisión de 300 nm, que son 0,3  $\mu\text{m}$ , por tanto, el sensor funcionará correctamente.

### 3.4 Portamuestras y varillas

Una vez realizado el soporte, es necesaria una plataforma para apoyar y fijar las muestras que serán medidas. Para ello se desarrolló el portamuestras con sus varillas.

El portamuestras es una plancha de aluminio, de la misma medida que la parte superior del nanoposicionador. Consta de seis agujeros para atornillarlo con el n.point y de otros 41 agujeros para posicionar la muestra (Figura 28). Para ello se necesitan las varillas (Figura 29). Las varillas son de latón, y tienen la función de posicionar la muestra en el portamuestras de forma repetible y alienada con los ejes de movimiento.

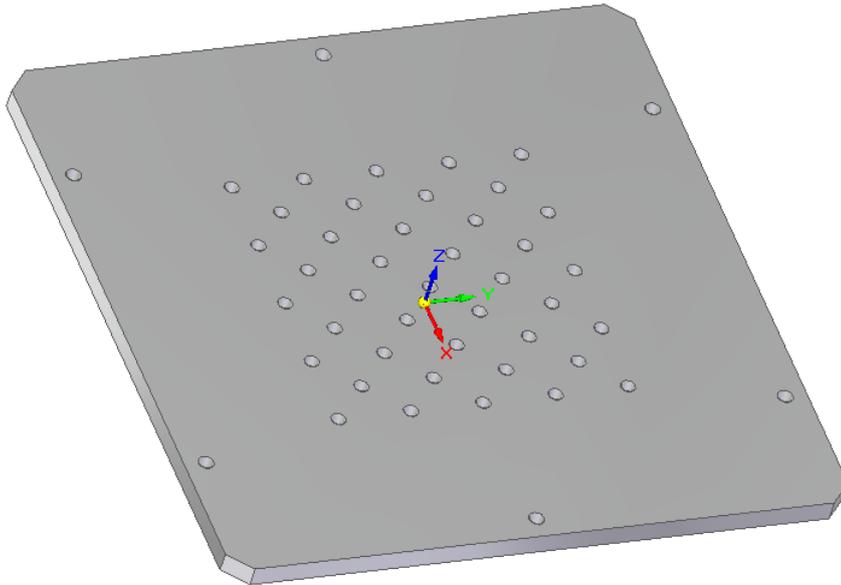


Figura 28. Portamuestras. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

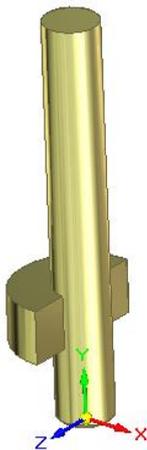


Figura 29. Varilla. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

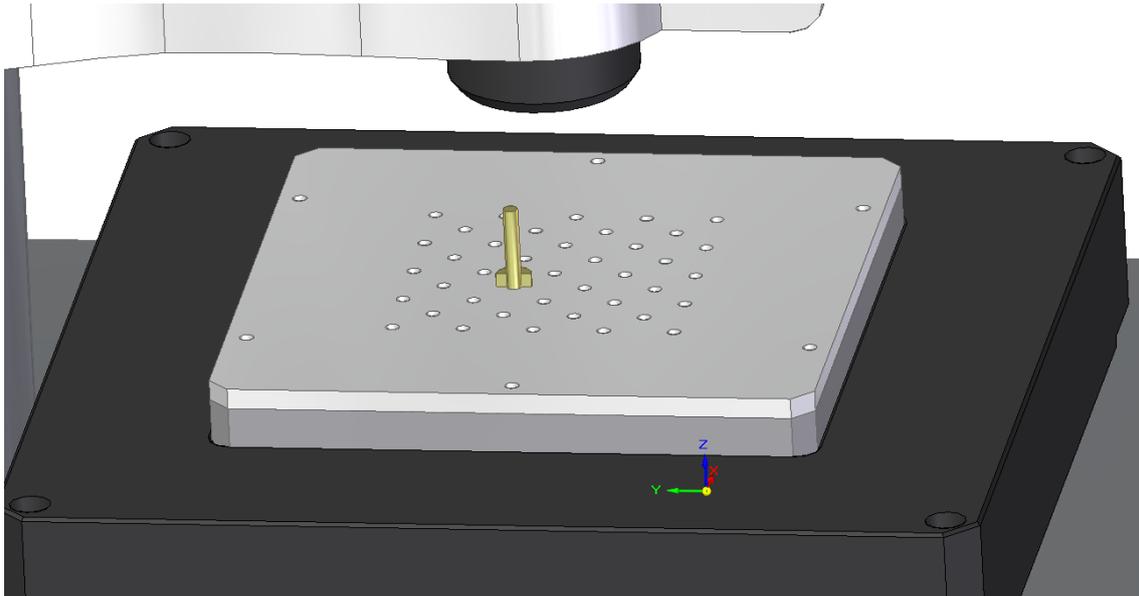


Figura 30. Conjunto portamuestras y varilla. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

Como se ha dicho, este sistema permite posicionar las muestras de forma repetible siguiendo el sistema 3-2-1.

La muestra se apoya en el portamuestras, que funcionaría como plano base, por tanto, se apoyaría en tres puntos. A continuación, mediante dos varillas, se restringiría el movimiento lateral mediante una recta con dos puntos, por tanto, quedará por restringir un grado de libertad en la dirección perpendicular. Este movimiento lineal quedará deshabilitado cuando se coloque una tercera varilla, que será el sexto punto (3-2-1) que faltaba para restringir completamente el movimiento de las muestras. Mediante estos seis puntos se consigue que la posición de las muestras sea repetible (asumiendo que el montaje de las varillas en el portamuestras es suficientemente repetible).

Todos los planos de los correspondientes componentes aparecen en los anexos.

## Desarrollo de un soporte para sensor táctil

### 1. Introducción

Después de desarrollar el soporte para el sensor confocal, se decidió extender el diseño del soporte a un sensor táctil (encoder óptico) de la marca "Heidenhain".

Como el soporte ya diseñado para el sensor confocal parecía bastante correcto y todos los cálculos se resolvieron con éxito, se decidió realizar un diseño similar.

Esta vez, debido a las características del sensor táctil se precisan de desplazamientos para la muestra mayores y con menor precisión que la que aportaba el nanoposicionador. Debido a esto, para posicionar y mover las muestras se utiliza una posicionadora lineal, cuyas dimensiones hicieron replantear el diseño, ya que es más grande que la base de aluminio del anterior conjunto.

Por esta razón, se decidió por el diseño representado en la Figura 31. Este diseño aprovecha la misma base del soporte anterior (1) y el mismo cilindro (2), la posicionadora lineal (3) no se coloca encima de la base, sino junto a ella. Para ello el soporte (4) donde descansaría el sensor Heidenhain (5), debería estar girado 180°.

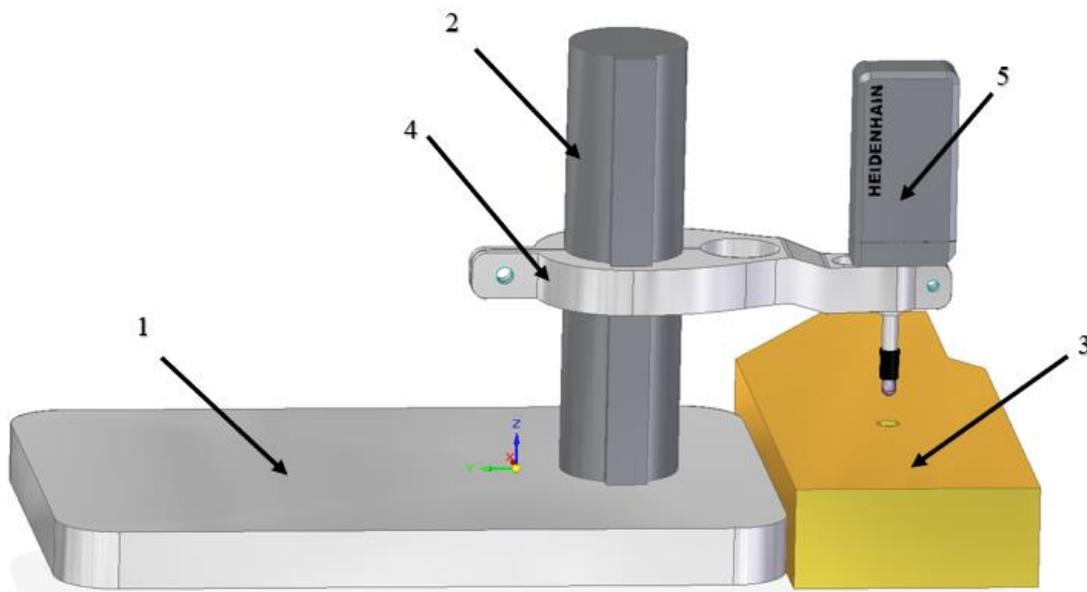


Figura 31. Conjunto soporte sensor táctil Heidenhain. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

La posicionadora lineal (Figura 32) funciona de manera diferente al nanoposicionador. Esta consta de unas guías de rodillos cruzados con sistema antideslizante, además de un tornillo de precisión con paso de 1 mm. El recorrido de la posicionadora seleccionada (L-509.4ASD00), es de 102 mm, mediante un motor paso a paso. Consta de interruptores de límite ópticos y tiene una repetibilidad de 0.05  $\mu\text{m}$

**PI**



Figura 32. Posicionadora Lineal PI L-509.4ASD00. Fuente: [4]

Por su parte, el sensor táctil Heidenhain MT1200 (Figura 33) funciona como un palpador que necesita contactar físicamente con la superficie de la pieza. Estos palpadores ofrecen una alta precisión (0.2 micrómetros) a lo largo de todo el recorrido de medición, son mecánicamente robustos y pueden emplearse en aplicaciones diversas. Los encoders ópticos de este fabricante están disponibles en recorridos desde 12 mm hasta 100 mm (a mayor recorrido peor precisión). Ello permite medir las piezas más diversas en un mismo dispositivo de medición, y evitar así tener que cambiar frecuentemente la configuración.



Figura 33. Sensor Heidenhain MT1200. Fuente [3]

## 2. Optimización del diseño final

### 2.1. Materiales

Como se ha dicho, la base, el cilindro y la chaveta se aprovechan del anterior conjunto, cuyos materiales se describieron en el anterior apartado.

El nuevo soporte, será del mismo material que el anterior soporte, ya que las características de fabricación, dilatación térmica, peso y esfuerzos serán similares (duraluminio 6082 anodizado blanco).

El **sensor Heidenhain** (Figura 34), según características de catálogo, es de acero.

#### HEIDENHAIN-METRO

Incremental length gauges with  $\pm 0.2 \mu\text{m}$  accuracy

- High repeatability
- Plunger actuation by cable release, by the workpiece or pneumatically
- Ball-bush guided plunger

MT 1200



Figura 34. Sensor Heidenhain MT1200. Fuente: [3]

En cuanto a la **posicionadora lineal** (Figura 35), en las especificaciones del fabricante se indica que está compuesta de aluminio y acero, pero no especifican en que porcentaje. Por ello, fue necesario ponerse en contacto con la casa que la produce y se obtuvo la información de que la mayoría de las partes, especialmente la placa base y la corredera son de aluminio; el husillo y la guía son de acero inoxidable. Todos estos datos también han sido tenidos en cuenta en el momento de realizar los cálculos de expansión térmica.

PI

#### Precision Linear Stage

COMPACT DESIGN, FOR LOADS UP TO 10 KG

##### L-509

- ✦ Travel ranges from 26 to 102 mm (1" to 4")
- ✦ Repeatability to  $0.05 \mu\text{m}$
- ✦ Optional direct metrology linear encoder
- ✦ Stepper Motor or DC Gear Motor
- ✦ Direction-sensing reference point switch
- ✦ Integrated optical limit switches



Figura 35. Posicionadora Lineal PI L-509.4ASD00. Fuente: [4]

## 2.2. Expansión térmica

Se procede a calcular los efectos de la expansión térmica de manera similar a la del sensor confocal, con la salvedad de que en esta ocasión calculamos directamente el escalón.

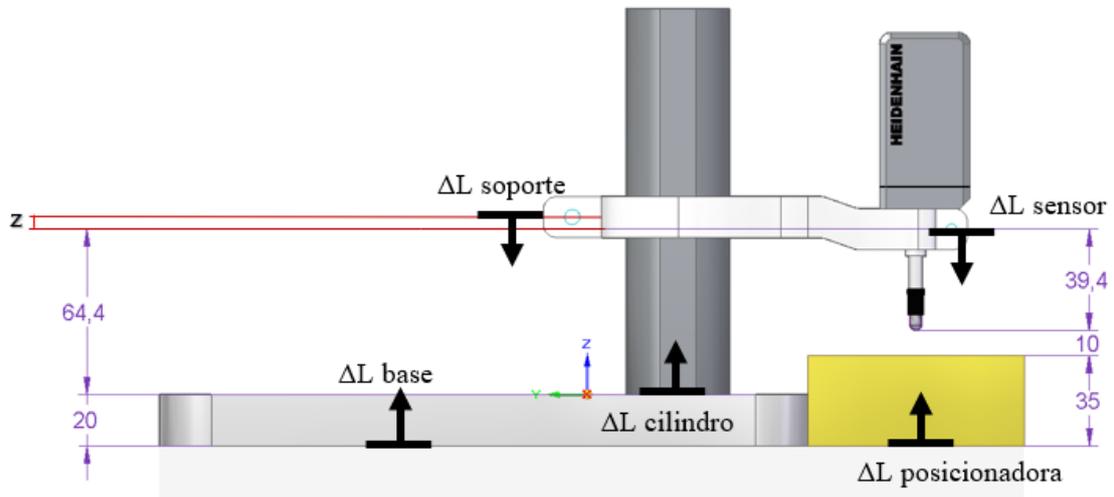


Figura 36. Conjunto soporte sensor táctil Heidenhain, estudio térmico. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

Se inician los cálculos con la siguiente condición:

$$(5) \Delta L_{\text{base}} + \Delta L_{\text{cilindro}} - \Delta L_{\text{soporte}} - \Delta L_{\text{sensor}} - \Delta L_{\text{posicionadora}} = \Delta L_x$$

Además, cada  $\Delta L$  se calculará:

$$(6) \alpha = \frac{1}{L} \times \frac{\Delta L}{\Delta T^a}$$

Con una  $\Delta T^a = 2^\circ$

Con:

$\alpha$ : Coeficiente de expansión térmica

$\Delta L$ : Variación de la distancia

$\Delta T^a$ : Variación de temperatura

Aplicamos (4) con los datos conocidos:

- **Base**

Material: Aluminio

$$\alpha_{\text{acero}} = 23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(6) 23 \times 10^{-6} = \frac{1}{20} x \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 9,2 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

- **Cilindro**

Material: Acero

$$\alpha_{\text{acero}} = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(6) 12 \times 10^{-6} = \frac{1}{(64,4+z)} x \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 2,4 \times 10^{-5} x (64,4 + z)$$

- **Soporte**

Material: Aluminio

$$\alpha_{\text{Aluminio}} = 23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(6) 23 \times 10^{-6} = \frac{1}{z} x \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 4,6 \times 10^{-5} z$$

- **Sensor**

Material: Acero

$$\alpha_{\text{Aluminio}} = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(6) 12 \times 10^{-6} = \frac{1}{39,4} \times \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 9,456 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

- **Posicionadora**

Como se ha comentado anteriormente, según especificaciones de la casa de Precision Linear Stage “PI”, la posicionadora está fabricada en gran parte de aluminio, con algunos componentes de acero. Debido a esto, se decidió calcular el escalón del soporte tomando la posicionadora como un 75% de aluminio y un 25% de acero. Más adelante, se calculó el error que se produciría en la medición, en el caso de que la posicionadora tuviera una composición de 50% aluminio y 50% acero, y el error con una composición de 100% acero, con el escalón calculado (para un 75% aluminio, 25% acero).

De esta forma, se cubren prácticamente todas las posibilidades de que exista algún tipo de error en la medición debido a la expansión térmica.

Material: 75% Aluminio, 25% Acero

$$\alpha_{75\%Al,25\%Ac} = 20,25 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(6) 20,25 \times 10^{-6} = \frac{1}{35} \times \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 1,4175 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

Material: 50% Aluminio, 50% Acero

$$\alpha_{50\%Al,50\%Ac} = 1,75 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(6) 1,75 \times 10^{-5} = \frac{1}{35} \times \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 1,225 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

Material: 100% Aluminio

$$\alpha_{100\%Al} = 23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$(6) 23 \times 10^{-6} = \frac{1}{35} \times \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L = 1,61 \times 10^{-3}$$

Estos dos últimos incrementos de longitud se utilizarán más adelante para estudiar el error en el supuesto de que fuera 50% aluminio, 50% acero y 100% aluminio.

A continuación, se procede a calcular el escalón z tomando la posicionadora como 75% aluminio, 25% acero, tomando  $\Delta L_x = 0$  en la primera igualdad, puesto que se desea que el error sea nulo.

Aplicamos (5):

$$(5) \Delta L_{\text{base}} + \Delta L_{\text{cilindro}} - \Delta L_{\text{soporte}} - \Delta L_{\text{sensor}} - \Delta L_{\text{posicionadora}} = 0$$

$$z = 4,659 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se diseñará el soporte con un escalón de 4,7 mm para compensar el efecto de la expansión térmica.

Una vez conocido el escalón, se procede a calcular el error que se produciría si la posicionadora fuera 50% aluminio, 50% acero y 100% aluminio:

$$(7) \quad e_{50\%Al} = 9,2 \times 10^{-4} + 12 \times 10^{-6} \times 2(64,4 + z) - 23 \times 10^{-6} \times 2z - 9,456 \times 10^{-4} - 1,225 \times 10^{-3} =$$

$$e_{50\%Al} = 0,0001925 \text{ mm} = 0,1925 \mu\text{m}$$

$$(8) \quad 9,2 \times 10^{-4} + 12 \times 10^{-6} \times 2(64,4 + z) - 23 \times 10^{-6} \times 2z - 9,456 \times 10^{-4} - 1,61 \times 10^{-3} = e_{100\%Al}$$

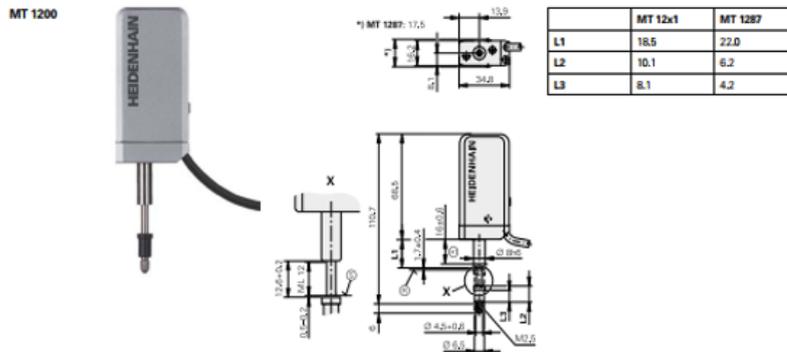
$$e_{100\%Al} = -0,0001925 \text{ mm} = -0,1925 \mu\text{m}$$

Obsérvese que en ninguno de los dos casos el error sería superior a  $\pm 0,2 \mu\text{m}$ , que es el rango de la incertidumbre del sensor Heidenhain (Figura 37):

### HEIDENHAIN-METRO

Incremental length gauges with  $\pm 0.2 \mu\text{m}$  accuracy

- High repeatability
- Plunger actuation by cable release, by the workpiece or pneumatically
- Ball-bush guided plunger



Mechanical data	MT 1271 $\square$ TTL MT 1281 $\sim$ 1 Vpp	MT 2571 $\square$ TTL MT 2581 $\sim$ 1 Vpp	MT 1287 $\sim$ 1 Vpp	MT 2587 $\sim$ 1 Vpp
Plunger actuation Position of plunger at rest	By cable or measured object Extended		Pneumatic Retracted	
Measuring standard	DIADUR phase grating on Zerodur glass ceramic; grating period 4 $\mu\text{m}$			
<b>System accuracy</b>	<b><math>\pm 0.2 \mu\text{m}</math></b>			
Position error per signal period	$\leq \pm 0.02 \mu\text{m}$			
Short-range accuracy typically	0.03 $\mu\text{m}$	0.04 $\mu\text{m}$	0.03 $\mu\text{m}$	0.04 $\mu\text{m}$
Reference mark	$\approx 1.7 \text{ mm}$ below upper stop			
Measuring range	12 mm	25 mm	12 mm	25 mm
Working pressure	-		0.9 bar to 1.4 bars	

Figura 37. Catálogo sensor táctil Heidenhain. Fuente: [3]

En conclusión, mediante este procedimiento y con el diseño propuesto, se ha minimizado al máximo el efecto de la expansión térmica en el caso de que la posicionadora fuera 75% aluminio, 25% acero, que es lo indicado por el fabricante. Con una posicionadora 100% de aluminio o 50% aluminio 50% acero, se observa el error que se obtendría, para tenerlo en cuenta en los resultados, apreciando que además no superaría el rango de incertidumbre del sensor táctil, con lo que no sería crítico a la hora de interpretar las futuras medidas.

A continuación, en la Figura 38 se observa la variación de la distancia entre el sensor y la muestra en función del tamaño de muestra. Este estudio se utilizó previamente para el sensor confocal.

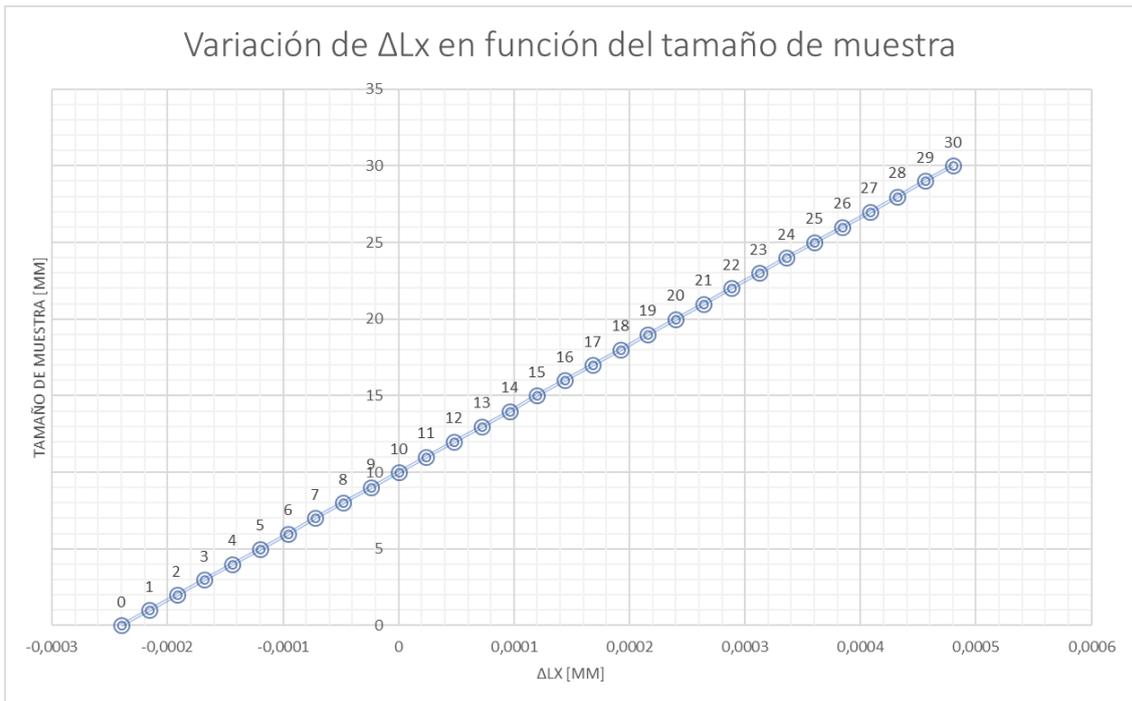


Figura 38. Gráfica estudio de expansión térmica, sensor táctil Heidenhain. Fuente: elaboración propia mediante Excel

Obsérvese que, el menor fallo se obtendría con las muestras de 10 mm, ya que el escalón fue diseñado para ello. En ese punto se encuentra un error de  $2 \times 10^9$  mm, lo cual es despreciable frente a las prestaciones del sensor.

También se puede ver que el error sigue un modelo lineal, de tal forma que, cuanto más grande o más pequeña sea la muestra, el error en la medición debido a la expansión térmica será mayor.

Todo esto ocurriría de manera similar con el confocal, puesto que el procedimiento para la realización de los cálculos es el mismo.

### 2.3.Cálculo mediante elementos finitos

A continuación, se procede a realizar el cálculo mediante elementos finitos con el programa SolidEdge.

La metodología será la misma que la seguida para el cálculo del conjunto del sensor confocal:

-En primer lugar, se diseña cada componente por separado y se les asigna el material decidido.

-En segundo lugar, se crea un conjunto de todos los componentes necesarios, aplicando las conexiones y restricciones necesarias.

-En último lugar se imponen las condiciones de contorno, se malla y resuelve el conjunto, analizando los resultados obtenidos.

En los cálculos fue necesario tener en cuenta que la posicionadora estaba compuesta por aluminio y acero, sin conocer exactamente el porcentaje de cada uno, realizando los cálculos en un rango impuesto por nosotros (50% de aluminio al 100%). Esto no es necesario tenerlo en cuenta en el cálculo mediante elementos finitos, puesto que la posicionadora únicamente estará apoyada en el suelo y no sufrirá esfuerzos.

Una vez realizado el cálculo, puede verse el informe del estudio de SolidEdge.

Las condiciones de contorno aplicadas fueron las siguientes:

- La base del conjunto y la posicionadora poseen un tipo de restricción fija, puesto que van apoyadas en el suelo.
- El cilindro está unido con la base mediante un tornillo inferior, que atraviesa la base.
- El soporte va unido al cilindro mediante apriete. La chaveta entra en juego en esta unión. El apriete lo ejercen las orejas exteriores del soporte.
- El sensor va unido al soporte mediante apriete. De nuevo, las orejas exteriores ejercen el apriete.

Todas las características de las condiciones de contorno, del conjunto y del mallado se pueden observar en los anexos.

En la Tabla 2 y en la Figura 39, pueden verse los resultados del desplazamiento del conjunto. Al igual que con el sensor confocal, los principales desplazamientos se producen en los puntos extremos del voladizo.

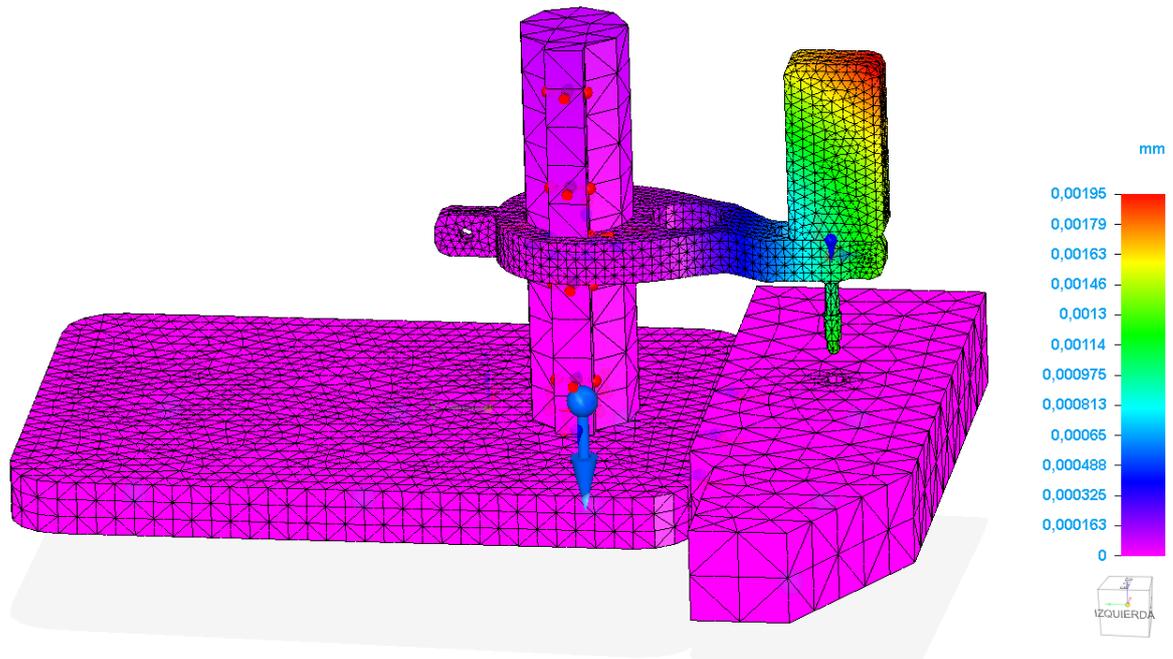


Figura 39. Desplazamiento conjunto soporte sensor confocal, Informe 2. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

A continuación, el estudio se centrará en el desplazamiento del sensor con respecto a la muestra para saber si esta variación será relevante para las futuras medidas

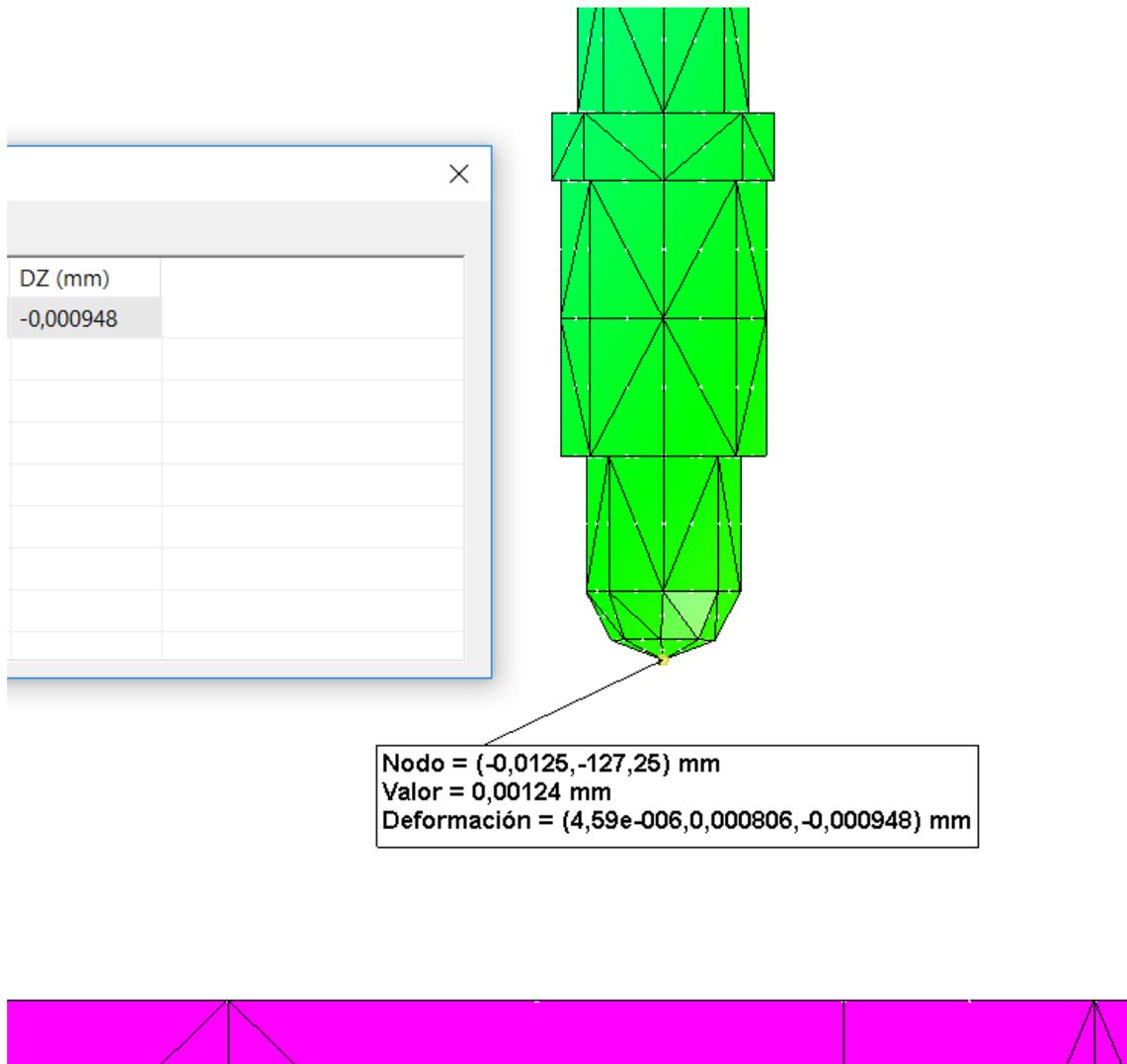


Figura 40. Resultados de desplazamiento, sensor táctil Heidenhain (detalle de la punta). Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

Se observa que en la punta del sensor el desplazamiento será de 0,000948 mm. Este dato podría ser importante a la hora de la medición, pero hay que recordar que este sensor es táctil, por tanto, va a estar en contacto con la muestra en todo momento, hundiéndose lo que fuera necesario, por lo que no afectará a la medición. Este dato se calcula por si fuera exageradamente grande, en ese caso habría que estudiar el comportamiento del conjunto y los posibles inconvenientes.

A continuación, se procede a calcular la inclinación del sensor táctil, de manera similar a la realizada con el sensor confocal

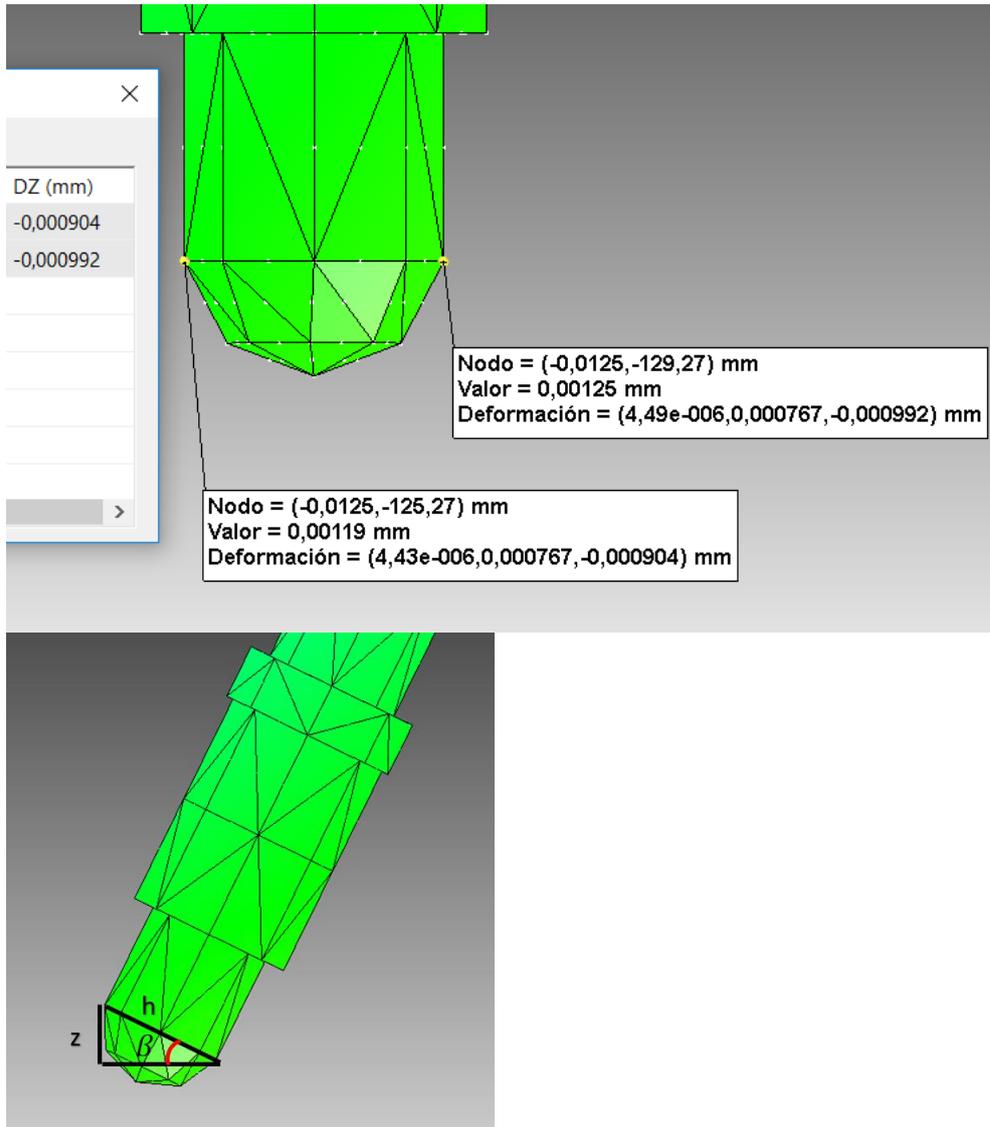


Figura 41. Inclinación sensor táctil. Fuente: elaboración propia mediante SolidEdge

$$z = 0,000992 - 0,000904 = 8,8 \times 10^{-5} \text{ mm}$$

$$\text{sen}(\beta) = \frac{8,8 \times 10^{-5}}{4,5}$$

$$\beta = 1,96 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

Este ángulo se tendrá en cuenta a la hora de interpretar los resultados, puesto que el sensor tomará esa inclinación como si fuera de la muestra.

## Conclusión

Este trabajo de fin de grado forma parte de un proyecto de investigación, que consiste en el desarrollo de una nanoplataforma.

El cometido de este trabajo finalmente se consiguió cumplir, puesto que se consiguió diseñar con éxito un soporte para medir mediante un sensor confocal y un sensor táctil en un nanoposicionador.

Primeramente, fue necesario decidir entre varios diseños y materiales según criterios de precisión en la medición de los sensores y de fabricación a través del Servicio de Mecánica de Precisión de la Universidad de Zaragoza.

Una vez decidido el diseño inicial para trabajar con él, se completaron todos los cálculos necesarios para comprobar que sería capaz de realizar mediciones precisas.

El primer cálculo realizado fue el de la compensación de la expansión térmica. Se añadió un escalón en el soporte, puesto que de este modo se conseguiría finalmente compensar el efecto de la dilatación térmica. Para ello fue necesario realizar una serie de cálculos analíticos, que fueron comprobados con soportes en software como EES (Engineering Equation Solver). Finalmente se realizó un estudio para comprobar cómo se comportaría el conjunto con otras piezas que tuvieran un tamaño diferente a la muestra. De esta manera, se puede corregir la posición del soporte en función de la muestra y la expansión térmica, cubriendo así todos los factores posibles.

A continuación, se procedieron a realizar los cálculos de esfuerzos y desplazamientos mediante elementos finitos mediante el mismo programa SolidEdge utilizado para el diseño CAD. Mediante este programa se consiguió obtener un informe completo de desplazamientos, esfuerzos. Una vez realizado este estudio, se hizo hincapié en la inclinación del sensor con relación a la muestra, ya que influye en la distancia crítica a la hora de realizar una correcta medición. Como conclusión se observó que estos valores no afectarían de forma crítica a la calidad de las medidas.

Una vez realizados los dos estudios (térmico y de esfuerzos), se realizó este mismo trabajo para un sensor táctil de tipo encoder. Se siguió un procedimiento similar, pero adaptado a las características físicas de dicho sensor (dimensiones, peso, forma de medir). Además, en este segundo estudio se decidió introducir una posicionadora lineal, que posea diferentes dimensiones y características de funcionamiento que el nanoposicionador, pero mejor adaptada a su campo de medida.

También fue necesario diseñar un portamuestras y unas varillas para realizar las mediciones mediante el sensor confocal, puesto que es necesario fijar la muestra de forma que no sufra ningún movimiento exterior no deseado.

Estos dos elementos se diseñaron con el objetivo de realizar mediciones que fueran repetibles.

Finalmente, los diseños realizados se han enviado al Servicio de Mecánica de Precisión para su fabricación.

## Trabajo futuro

El siguiente paso lógico tras la fabricación de todos los componentes consistirá en la evaluación metroológica de los sensores mediante la medición de un patrón y bajo diferentes condiciones de trabajo. Para ello será necesario configurar adecuadamente los módulos de control de los diferentes componentes electrónicos involucrados, así como su conexión a un ordenador para capturar los datos.

En un contexto más amplio como el del proyecto de investigación en el que se encuadra este TFG está la introducción de un sistema de cámaras que ayuden al operador a visualizar e identificar correctamente la zona en la que se va a medir.

Con la experiencia adquirida tras todos estos pasos se deberá proceder a diseñar unos soportes que permitan la integración de los sensores en la nanoplataforma.

## Bibliografía

- [0] Información proyecto nanoplataforma realizado en la Universidad de Zaragoza:  
Torralba M, Valenzuela M, Yagüe-Fabra JA, Albajez JA, Aguilar JJ. Large range nanopositioning stage design: A three-layer and two-stage platform. Measurement. 2016; 89, Pages 55-71.
- Torralba M, Yagüe-Fabra JA, Albajez JA, Aguilar JJ. Design Optimization for the Measurement Accuracy Improvement of a Large Range Nanopositioning Stage. Sensors. 2016; 16(1):84.
- [1] Muestra:  
<https://ts-messtechnik.de/en/>
- [2] Nanoposicionador n.point:  
<https://www.npoint.com>
- [3] Sensor táctil:  
<https://www.heidenhain.es>
- [4] Posicionadora lineal:  
<http://www.pi-usa.us/>
- [5] Sensor confocal:  
<http://www.stilsa.com/>
- [6] Soporte de ayuda de SolidEdge:  
<https://www.plm.automation.siemens.com>

## **Anexos**

## 1. Catálogos

### 1.1. Catálogo nanoposicionador



nanopositioning | motion control

NPXY100Z10A

#### Specifications

Range (µm)	100 x 100 x 10
Footprint (mm)	140 x 140 x 30
Aperture (mm)	68 x 68
Material	Aluminum
Max Load (kg)	1

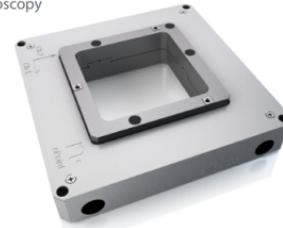
The NPXY100Z10A is a closed-loop XYZ nanopositioner with 100µm x 100µm x 10µm range of motion. It has the highest resonant frequency available in the market for products of similar function. Its large aperture allows for easy integration with optical microscopes or any application that requires easy sample access.

	XY	Z
Position Noise (nm)	0.5	0.1
Small Signal Settling Time (ms/1µm step)	15	7
Resonant Frequency (Hz, unloaded, typical)	600	1600
Linearity Error (%)	0.05	0.5
Hysteresis (% typical)	0.05	0.5

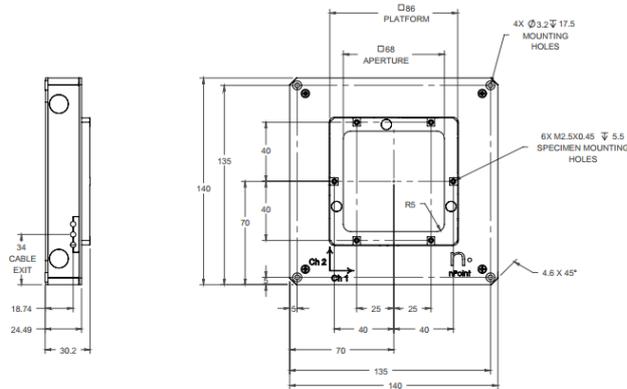
Part Number 3715128

#### Application Examples

- Near-Field Scanning Optical Microscopy
- Scanning Probe Microscopy
- Optical Microscopy
- Lithography
- Nanometer-scale Manipulation
- Metrology
- Optical Fiber Alignment



#### Installation



www.npoint.com  
sales@npoint.com

sales: 608.824.1770  
fax: 608.824.1774

3030 Laura Ln., #100  
Middleton, WI 53562

Fuente [1]

1.2.Catálogo sensor confocal

**Non-contact "point" sensors**

7

**Chromatic Confocal "point" sensors**

These sensors measure the altitude (z coordinate) of the sample point located on their optical axis. They can also measure the thickness of transparent samples. They consist of a controller (1), an "optical pen" (optical probe) (2) and a fiber optic cable (3). 3 controller lines (CCS, STIL-VIZIR and CHR), 3 optical pen lines (CL-MG, OP & ENDO) and different fiber optic cable models are available. A single controller may be ordered with several interchangeable optical pens.



**Advantages**

- Configurable: Select the controller, the optical pen and the fiber optics cable best suited for your application.
- Large choice of measuring ranges (100 µm - 20 mm),
- Large choice of optical pens satisfying specific requirements ("endoscopic" / radial pens / large working distance / steep slope / small spot size / through-window measurement...).

**Controllers for chromatic confocal "point" sensors**

**The CCS Controller line**

- The leading confocal chromatic sensors worldwide,
- The most sophisticated chromatic confocal sensors on the market,
- Distance and Thickness modes,
- High accuracy, high resolution,
- Compatible with all CL-MG, OP and ENDO optical pens,
- Recommended for OEM users and industrial applications,
- Up to 20 different optical pens interchangeable on the same controller,
- Digital outputs: USB and RS232 / RS422,
- 2 0V-10V Analog outputs,
- Synchronized reading of 3 external digital encoders,
- Improved performances in thickness mode due to a specific thickness calibration,
- Long lifetime light source,
- Advanced features: "Auto-Led", "First peak", "Double frequency", "Hold last value", Temporal Averaging...
- Synchronisation: Master and/or slave

Functions	Application
"Auto-LED": The LED brightness adapts itself automatically	Samples with variations slope e.g lenses Samples with reflectivity variations
"First peak": The sensor locks on the first surface	Topography on transparent objets
"Double Frequency": The sensor selects the optimal measuring rate automatically	Samples with high sharp relectivity variations, e.g. mask for microelectronics
"Hold Last Value": Output data smoothing	Very difficult samples with many non measurable points



www.stilsa.com - Phone:+33 4 42 39 66 51 1504295  
 contact@stilsa.com - 595, rue Pierre Berthier - Domaine de Saint Hilaire - 13855 Aix en Provence - Cedex3 - FRANCE

## Non-contact "point" sensors

8

### ● The CCS Optima+ Controller

- New 2014 product
- Measuring rate: up to 10 KHz
- Very high sensitivity, allowing an EFFECTIVE high rate on many sample types
- All the advantages of the CCS controller line (see page 7)



### ● The CCS Prima Controller

- The most popular chromatic confocal controller
- Measuring rate: up to 2 KHz
- CCD photodetector with very high Signal to noise ratio
- 2 and 4 multiplexed channels models available (commutation time < 400ms)
- All the advantages of the CCS controller line (see page 7)



www.stilsa.com - Phone: +33 4 42 39 66 51

contact@stilsa.com - 595, rue Pierre Berthier - Domaine de Saint Hilaire - 13855 Aix en Provence - Cedex3 - FRANCE

1504295

## Non-contact "point" sensors

9

### ■ The STIL-VIZIR Controller

- New 2014 product
- The optimal solution for high accuracy, non contact Wafer thickness measurement
- Near IR spectral bande
- Up to 1 KHz
- Distance and Thickness modes
- Digital outputs: USB and RS232/RS422
- 2 0V-10V Analog outputs
- Synchronized reading of 3 external digital encoders
- Improved performances in thickness mode due to a specific Thickness calibration
- Long lifetime light source
- Advanced features: "First peak", "double frequency", "Hold last value", Temporal Averaging... (see page 7)



### ■ The CHR-150L Controller line

- Measuring rate: up to 1 KHz
- Compatible with all CL-MG, OP and ENDO optical pens
- Digital outputs: 2 RS232 ports (up to 115200 baud)
- 2 Analog outputs
- Long lifetime light source (light level adjustable manually with the aid of a knob)
- 2 or 4 simultaneous channels



www.stilsa.com - Phone: +33 4 42 38 66 51

contact@stilsa.com - 595, rue Pierre Berthier - Domaine de Saint Hilaire - I3855 Aix en Provence - Cedex3 - FRANCE

1504295

## Non-contact "point" sensors in the visible range



### Optical pens for chromatic confocal "point" sensors

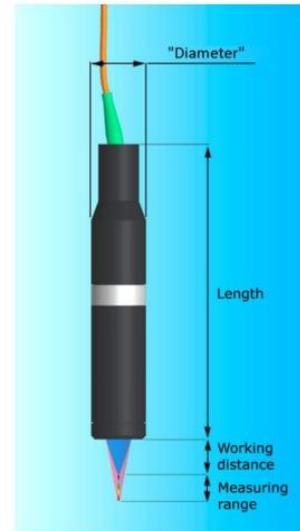
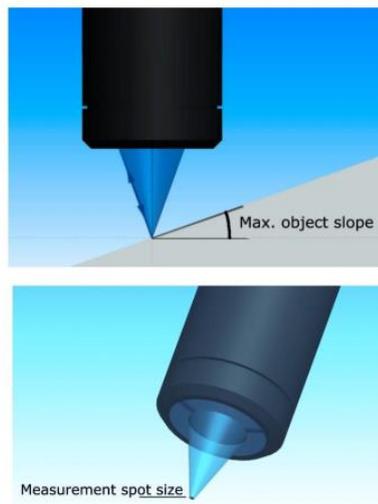
- The **CL-MG** Line consists of modular optical pens, comprising a chromatic lens (**CL**) and a magnifier lens (**MG**)
- Performance specifications supply for optical pens calibrated on STIL certified bench for a particular controller

CL-MG Line Specifications for CCS Optima+ Controller																
Model		CL0 <sup>(25)</sup>		CL1		CL2		CL3		CL4		CL5		CL6		
Measuring range <sup>(1)</sup>	µm	100		150		400		1300		4000		12000		24000		
Working distance <sup>(2)</sup>	mm	2.69		3.35		10.8		12.0		16.2		25.9		21.5		
Max. sample slope <sup>(3)</sup>	deg	±42°		±42.5°		±28°		±25°		±21°		±14°		±8.5°		
Reference plate <sup>(4)</sup>	-	No		No		Yes		Yes		Yes		Yes		No		
Axial model <sup>(5)</sup>	-	Standard Optional														
Radial model <sup>(5)</sup>	-															
Magnifier model		MG 210	MG 140	MG 210	MG 140	MG 210	MG 140	MG 70	MG 140	MG 70	MG 35	MG 20	MG 35	MG 20	MG 35	MG 20
NUMERICAL APERTURE																
Beginning of M.R.	-	0.76	0.76	0.72	0.72	0.47	0.47	0.47	0.43	0.43	0.35	0.35	0.25	0.25	0.19	0.19
Mid-range	-	0.75	0.75	0.71	0.71	0.46	0.46	0.46	0.41	0.41	0.33	0.33	0.21	0.21	0.14	0.14
End of M.R.	-	0.75	0.75	0.71	0.71	0.46	0.46	0.46	0.41	0.41	0.32	0.32	0.20	0.20	0.12	0.12
LATERAL (XY) PROPERTIES																
Spot size <sup>(12)</sup>																
Beginning of MR	µm	1.6	2.0	2.4	3.2	3.5	4.6	8.1	6.0	10.8	10.7	17.6	19.6	32.8	18.6	30.5
Center of MR	µm	1.8	2.2	2.7	3.5	4.0	5.2	8.8	6.8	11.9	12.3	19.9	24.3	40.0	26.8	43.0
End of MR	µm	1.9	2.4	3.0	3.8	4.4	5.7	9.3	7.4	12.6	13.4	21.3	27.2	44.2	32.7	51.4
Lateral resolution <sup>(6)</sup>	µm	1.1	1.0	1.1	1.3	1.7	1.8	3.7	2.6	4.5	4.6	7.0	11	14	11	18
PHOTOMETRIC EFFICIENCY <sup>(7)</sup>																
Collected energy (relative)		0.5	1.7	3.3	10	2.8	7.9	41	10	57	25	91	33	100	9.8	43
MECHANICAL INTERFACE																
Length <sup>(8)</sup>	mm	263.6	229	253.1	217.1	243.3	208.9	176.1	205.9	176.1	145.5	131.7	145.5	131.7	167.6	151.8
Diameter	mm	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Weight <sup>(8)</sup>	g	227	192	268	195	248	190	189	215	214	155	140	175	160	195	180
Performances																
DISTANCE MEASUREMENT																
Static Noise <sup>(9)</sup>																
With no averaging	nm	5.5	6.5	7.5	8.5	17	20	28	50	60	120	145	400	475	750	850
With averaging 10	nm	1.8	2.2	2.5	2.8	5.7	6.7	9.3	17	20	40	48	133	158	250	283
Accuracy <sup>(10)</sup>	nm	16	14	25	20	55	45	40	150	130	300	250	750	550	1600	1200
Measuring rough metal surfaces <sup>(11)</sup>	-	R	R	R	R	R	R	R	R	NR						
THICKNESS MEASUREMENT <sup>(13)</sup>																
Min. measurable thick <sup>(14)</sup>	µm	≤5	≤5	7.5	9	14	14	22	38	40	110	120	350	550	590	725
Max. measurable thick <sup>(14)</sup>	µm	≤100	≤100	175	175	510	510	510	2000	2000	5700	5700	16500	16500	34000	34000

For notes see page 15



www.stilsa.com - Phone: +33 4 42 39 66 51  
 contact@stilsa.com - 595, rue Pierre Berthier - Domaine de Saint Hilaire - 13855 Aix en Provence - Cedex3 - FRANCE



[www.stilsa.com](http://www.stilsa.com) - Phone: +33 4 42 39 66 51

[contact@stilsa.com](mailto:contact@stilsa.com) - 595, rue Pierre Berthier - Domaine de Saint Hilaire - 13855 Aix en Provence - Cedex3 - FRANCE

1504295

Fuente [2]

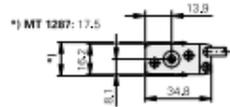
### 1.3. Catálogo sensor Heidenhain

## HEIDENHAIN-METRO

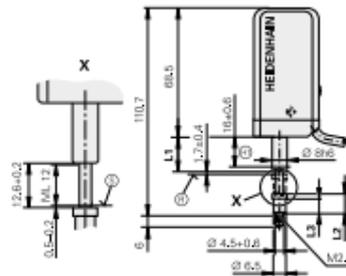
Incremental length gauges with  $\pm 0.2 \mu\text{m}$  accuracy

- High repeatability
- Plunger actuation by cable release, by the workpiece or pneumatically
- Ball-bush guided plunger

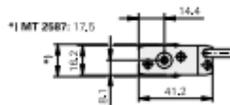
MT 1200



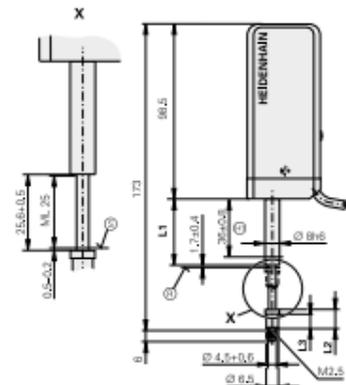
	MT 12x1	MT 1287
L1	18.5	22.0
L2	10.1	6.2
L3	8.1	4.2



MT 2500



	MT 25x1	MT 2587
L1	37.0	41.0
L2	10.1	6.2
L3	8.1	4.2



MT 1287  
MT 2587



mm  
Tolerancing ISO 8015  
ISO 2768 - m H  
< 6 mm:  $\pm 0.2$  mm

- Ⓧ = Reference mark position
- Ⓛ = Beginning of measuring length
- Ⓞ = Clamping area
- ⓐ = Air connection for 2 mm tube

Mechanical data	MT 1271  TTL MT 1281  1 V <sub>pp</sub>	MT 2571  TTL MT 2581  1 V <sub>pp</sub>	MT 1287  1 V <sub>pp</sub>	MT 2587  1 V <sub>pp</sub>
Plunger actuation Position of plunger at rest	By cable or measured object Extended		Pneumatic Retracted	
Measuring standard	DIADUR phase grating on Zerodur glass ceramic; grating period 4 μm			
System accuracy	± 0.2 μm			
Position error per signal period	≤ ± 0.02 μm			
Short-range accuracy typically	0.03 μm	0.04 μm	0.03 μm	0.04 μm
Reference mark	≈ 1.7 mm below upper stop			
Measuring range	12 mm	25 mm	12 mm	25 mm
Working pressure	-		0.9 bar to 1.4 bars	
Radial force	≤ 0.8 N (mechanically permissible)			
Fastening	Clamping shank Ø 8h6			
Operating attitude	Any; for version without spring and with low gauging force: vertically downward			
Vibration 55 Hz to 2 000 Hz Shock 11 ms	≤ 100 m/s <sup>2</sup> (EN 60068-2-6) ≤ 1 000 m/s <sup>2</sup> (EN 60068-2-27)			
Operating temperature	10 °C to 40 °C; reference temperature 20 °C			
Protection EN 60 529	IP50		IP64 (with sealing air)	
Weight without cable	100 g	180 g	110 g	190 g

Electrical data	MT 1271 MT 2571	MT 128x MT 258x
Interface	 TTL	 1 V <sub>pp</sub>
Integrated interpolation*	5-fold	10-fold
Signal period	0.4 μm	0.2 μm
Mech. permissible traversing speed	≤ 30 m/min	
Edge separation a at scanning frequency*/traverse speed <sup>1)</sup> 200 kHz ≤ 24 m/min 100 kHz ≤ 12 m/min 50 kHz ≤ 6 m/min 25 kHz ≤ 3 m/min	≥ 0.23 μs ≥ 0.48 μs ≥ 0.98 μs -	- ≥ 0.23 μs ≥ 0.48 μs ≥ 0.98 μs
Electrical connection* (Interface electronics integrated in connector)	Cable 1.5 m with D-sub connector (male), 15-pin	Cable 1.5 m with • D-sub connector (male), 15-pin • M23 connector (male), 12-pin
Cable length	≤ 30 m with HEIDENHAIN cable	
Voltage supply	5 V DC ± 0.5 V/< 160 mA (without load)	5 V DC ± 0.25 V/< 130 mA

\* Please select when ordering <sup>1)</sup> At the corresponding cutoff or scanning frequency

## 1.4. Catálogo posicionadora



### Precision Linear Stage

COMPACT DESIGN, FOR LOADS UP TO 10 KG

#### L-509

- Travel ranges from 26 to 102 mm (1" to 4")
- Repeatability to 0.05  $\mu\text{m}$
- Optional direct metrology linear encoder
- Stepper Motor or DC Gear Motor
- Direction- sensing reference point switch
- Integrated optical limit switches



#### Reference- class linear stage

High travel accuracy and load capacity due to crossed roller guides. Precision ball screw with 1 mm pitch. Compact design. Stress- relieved aluminum base for highest stability. Optical limit switches. Travel ranges L-509.2 versions: 26 mm (1"), L-509.4: 52 mm (2"), L-509.6: 102 mm (4")

#### Drive types

- .xxDG variant: DC servo motor with gearhead for high torques and resolution at low motor power
- .xxSD variant: 2- phase stepper motor for low velocity and high resolution

Noncontact limit switches. Noncontact, direction- sensing reference point switch in the middle of the travel range

#### Position measurement

- Integrated rotary encoder on motor shaft (variants with DC gear motor).
- Laterally mounted linear encoder. Direct position measurement of moved platform without impact on positioning precision due to mechanical play or hysteresis in the drive

#### Min. incremental motion and slow motion

In conjunction with the SMC Hydra controller, versions with stepper motor and integrated linear encoder (L-509.xASD00) achieve repeatable minimum incremental motion in the range of the sensor resolution. With this configuration, constant, low velocities of a few sensor steps per second can be attained

#### Fields of application

Precision positioning for science and industry, high duty cycles.

L-511 and L-509 precision stages can be combined without adapter plates for positioning on several axes.



Multi- axis setup consisting of L-511 (horizontal) and L-509 (vertical) precision stages.





**Specifications**

Preliminary Data	L-509.x0DG10	L-509.xASD00	L-509.x0SD00	Unit	Tolerance
	Linear stage with DC gear motor and rotary encoder	Linear stage with stepper motor and linear encoder (direct position measurement)	Linear stage with stepper motor		
<b>Motion and Positioning</b>					
Travel range #	26 / 52 / 102	26 / 52 / 102	26 / 52 / 102	mm	
Integrated sensor	Rotary encoder	Linear encoder	–		
Sensor resolution rotary encoder	4096	–	–	cts./rev.	typ.
Sensor resolution linear encoder	–	1#	–	nm	typ.
Minimum incremental motion	0.1	0.01	0.315*	µm	typ.
Unidirectional repeatability	0.1	0.1	0.3	µm	typ.
Backlash	0.3	0.1	0.5	µm	typ.
Crosstalk, angular error xry (pitch)	±120	±120	±120	µrad per 100 mm travel	typ.
Crosstalk, angular error xrz (yaw)	±100	±100	±100	µrad per 100 mm travel	typ.
Max. velocity	3	20	20	mm/s	
Min. velocity	–	0.05	–	mm/s	
<b>Mechanical Properties</b>					
Thread/ spindle pitch	1	1	1	mm	
Gear ratio	2401:81	–	–		
Load capacity	100	100	100	N	max.
Push / pull force	60	60	60	N	max.
Lateral force	50	50	50	N	max.
Holding force	40	80	80	N	max.
<b>Drive Properties</b>					
Motor type	DC gear motor	2- phase stepper motor	2- phase stepper motor		
Operating voltage	0 to ±12	24	24	V	
Motor power	8.5	10	10	W	nominal
Reference point and limit switches	Optical	Optical	Optical		
<b>Miscellaneous</b>					
Operating temperature range	-20 to 65	-20 to 65	-20 to 65	°C	
Material	Aluminum, steel	Aluminum, steel	Aluminum, steel		
Mass	1.4 / 1.6 / 1.9	1.4 / 1.6 / 1.9	1.4 / 1.6 / 1.9	kg	± 5%
Connector	HD Sub- D 26- pin (motor and rotary encoder) to Sub- D 15- pin, 3 m cable	HD Sub- D 26- pin (motor), Sub- D 9- pin (linear encoder), 3 m cable set	HD Sub- D 26- pin (motor) to Sub- D 15- pin, 3 m cable		
Recommended controller/ driver	C-863 (single- axis), C-884 (up to 4 axes)	SMC Hydra (double- axis)	C-663 (single- axis)		



**Order Information**

- L-509.10DG10**  
Precision Linear Stage, 85 mm Wide, DC Gear Motor, 26 mm (1") Travel Range, Optical Limit Switches
- L-509.10SD00**  
Precision Linear Stage, 85 mm Wide, 2- Phase Stepper Motor, 26 mm (1") Travel Range, Optical Limit Switches
- L-509.20DG10**  
Precision Linear Stage, 85 mm Wide, DC Gear Motor, 52 mm (2") Travel Range, Optical Limit Switches
- L-509.20SD00**  
Precision Linear Stage, 85 mm Wide, 2- Phase Stepper Motor, 52 mm (2") Travel Range, Optical Limit Switches
- L-509.40DG10**  
Precision Linear Stage, 85 mm Wide, DC Gear Motor, 102 mm (4") Travel Range, Optical Limit Switches
- L-509.40SD00**  
Precision Linear Stage, 85 mm Wide, 2- Phase Stepper Motor, 102 mm (4") Travel Range, Optical Limit Switches

**Stages with direct position measurement**

- L-509.1ASD00**  
Precision Linear Stage, 85 mm Wide, 2- Phase Stepper Motor, 26 mm (1") Travel Range, Linear Encoder with Sin/ Cos Signal Transmission, Optical Limit Switches
- L-509.2ASD00**  
Precision Linear Stage, 85 mm Wide, 2- Phase Stepper Motor, 52 mm (2") Travel Range, Linear Encoder with Sin/ Cos Signal Transmission, Optical Limit Switches
- L-509.4ASD00**  
Precision Linear Stage, 85 mm Wide, 2- Phase Stepper Motor, 102 mm (4") Travel Range, Linear Encoder with Sin/ Cos Signal Transmission, Optical Limit Switches

**Controllers / Drivers / Amplifiers**

- [C-863 Mercury Servo Controller](#)
- [C-863.20C885 DC Motor Controller Module](#)
- [C-884 Four Axis Motion Controller](#)
- [C-663 Mercury Step Controller](#)
- [SMC hydra SMC- series](#)
- [SMC pollux SMC- series](#)

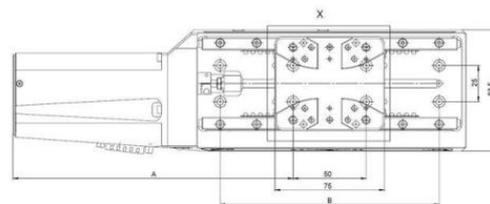
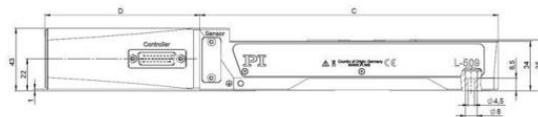
**Accessories**

- [L-500 Adapter Bracket](#)

**Related Products**

- [VT-80 Translation Stage](#)
- [M-404 Precision Translation Stage](#)
- [M-403 Precision Translation Stage](#)
- [M-605 High- Accuracy Translation Stage](#)
- [L-511 High- Precision Linear Positioning Stage](#)
- [PLS-85 Precision Linear Stage](#)

**Drawings / Images**



	A	B	C	D
L-509.10DG10	157.3	100	135.3	106
L-509.20DG10	186.8	100	154.3	106
L-509.40DG10	191.8	100	204.3	106



## 1.5. Catálogo muestra patrón

### Contour and roughness standards

Each measuring device is only as good as its reference. To monitor the precision and testing of contour measuring instruments, for instance in accordance with VDI/VDE 2629, we offer a wide range of contour and roughness standards.

Depending on the model, our standards are manufactured from hardened and aged gauge steel or hard metal.

As an additional option, our standards are also available with a nearly adamantine, extremely wear-resistant surface coating. Stable mounting blocks or mounts with precision tilt axes are available for safely supporting our standards.



KN180 contour standard

### We can offer you the following test certificates for our standards

- Works certificate (standard)
- DAkkS certificate
- PTB test certificate



### ^ KN15 :: Micro contour standard



KN15

Fuente [5]

## 2. Elementos Finitos

### 2.1. Informe sensor confocal

La única carga impuesta fue la de la gravedad:

Tabla 1. Cargas impuestas en el modelo del conjunto sensor confocal. Fuente: SolidEdge

Nombre de carga	Tipo de carga	Valor de carga	Dirección de carga
Gravedad 1	Gravedad	981 cm/s <sup>2</sup>	(0,0, 0,0, -1,0 )

A continuación, se observan las características de cada componente del conjunto. Estas fueron impuestas en el momento del diseño de cada componente:

Tabla 2. Características componentes conjunto sensor confocal. Fuente: SolidEdge.

Nombre del sólido	Material	Masa (Kg)	Volumen (mm <sup>3</sup> )	Peso (N)
Sensor con color.V.par:1	Acero, estructural (Ocurrencia)	0,155	76548,121	1,52
Base soporte.V.par:1	Aluminio, 6061-T6 (Ocurrencia)	2,279	840392,385	22,34
Cilindro soporte.V.par:1	Acero (Ocurrencia)	1,401	178831,585	13,73
Chaveta.V.par:1	Acero (Ocurrencia)	0,132	16800,000	1,29
Nanoposicionador.V.par:1	Aluminio, 1060 (Ocurrencia)	0,871	321048,212	8,53
PiezaInterna.V.par:1	Aluminio, 1060 (Ocurrencia)	0,159	58754,299	1,56
Portamuestras.V.par:1	Aluminio, 6061-T6 (Ocurrencia)	0,059	21685,239	0,58
Enganche4 aligerado.V.par:1	Aluminio, 6061-T6 (Ocurrencia)	0,386	142312,049	3,78

El programa también facilita las características de cada material del modelo:

Aluminio, 6061-T6

Tabla 3. Características aluminio 6061-T6. Fuente: SolidEdge

Propiedad	Valor
Densidad	2712,000 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0,000023 /C
Conductividad térmica	0,180 kW/m-C
Calor específico	920,000 J/kg-C

Módulo de elasticidad	68947,570 MPa
Coefficiente de Poisson	0,330
Límite elástico	275,790 MPa
Tensión de rotura	310,264 MPa
% de elongación	0,000

#### Acero

Tabla 4. Características acero. Fuente: SolidEdge

Propiedad	Valor
Densidad	7833,000 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0,000012 /C
Conductividad térmica	0,032 kW/m-C
Calor específico	481,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	199947,953 MPa
Coefficiente de Poisson	0,290
Límite elástico	262,001 MPa
Tensión de rotura	358,527 MPa
% de elongación	0,000

#### Aluminio, 1060

Tabla 5. Características aluminio 1060. Fuente: SolidEdge

Propiedad	Valor
Densidad	2712,000 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0,000023 /C
Conductividad térmica	0,221 kW/m-C
Calor específico	920,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	68947,570 MPa
Coefficiente de Poisson	0,330
Límite elástico	27,579 MPa
Tensión de rotura	68,948 MPa
% de elongación	0,000

#### Acero, estructural

Tabla 6. Características acero estructural. Fuente: SolidEdge

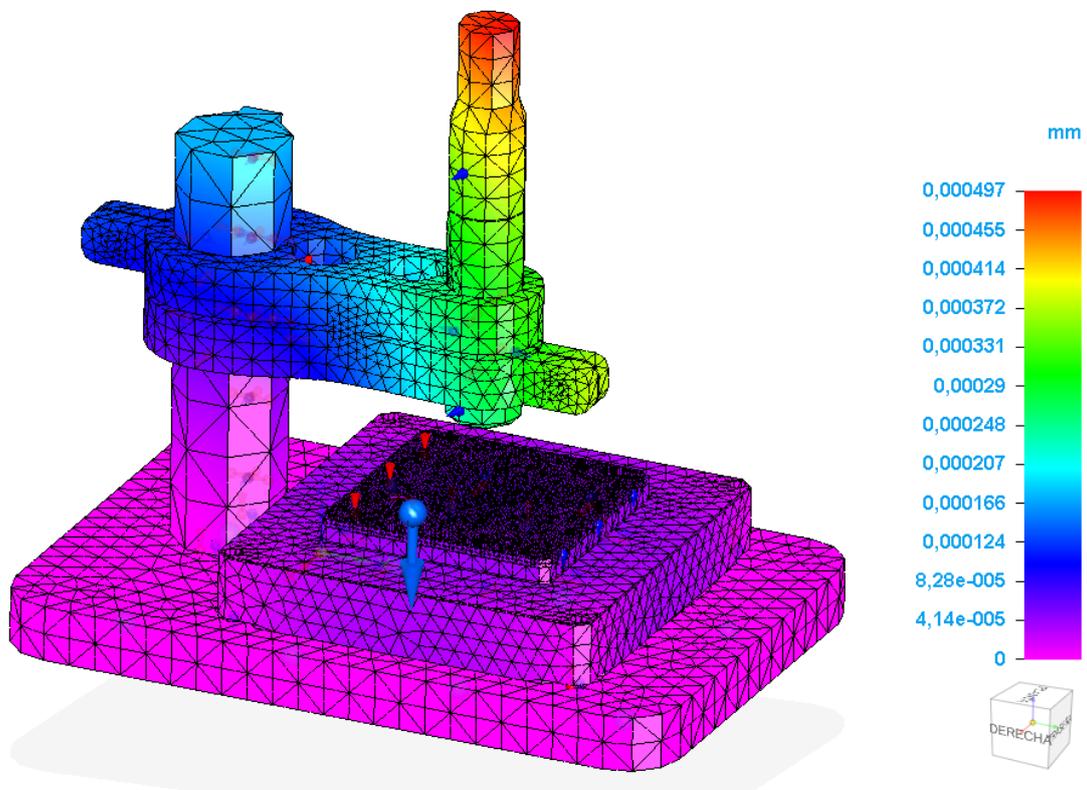
Propiedad	Valor
Densidad	2025,000 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0,000013 /C
Conductividad térmica	0,032 kW/m-C
Calor específico	481,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	199947,953 MPa
Coefficiente de Poisson	0,290
Límite elástico	262,001 MPa
Tensión de rotura	358,527 MPa
% de elongación	0,000

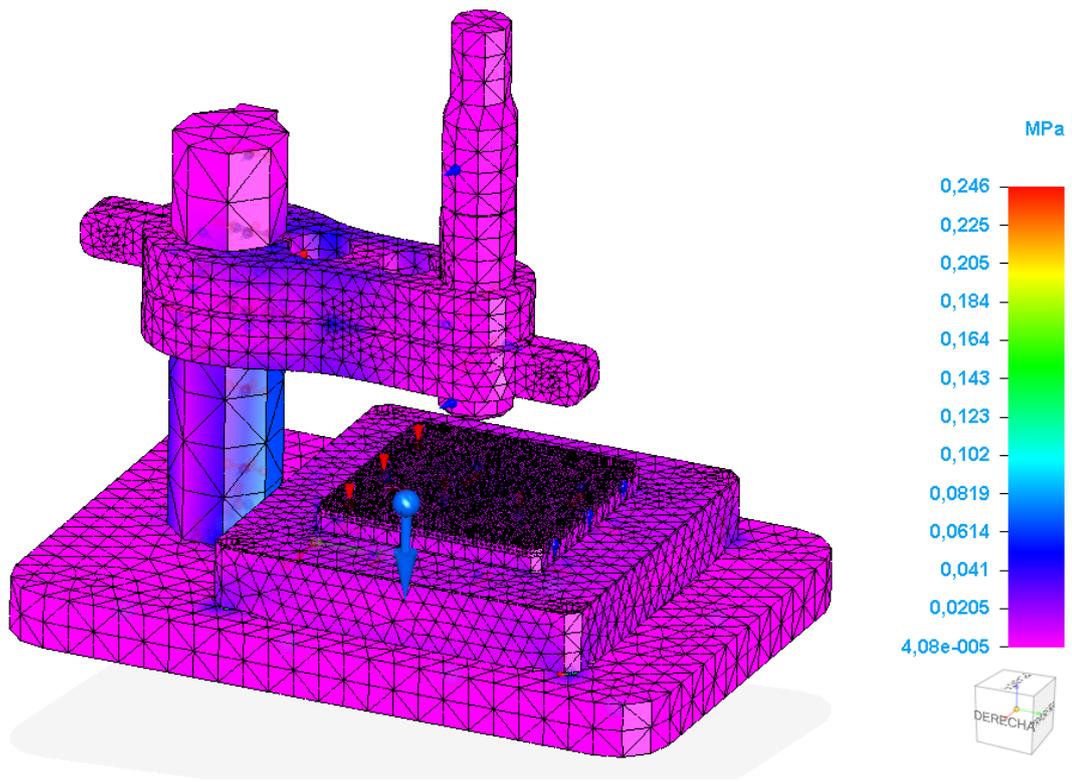
Por último, se observan las características del mallado:

Tabla 7. Características mallado. Fuente: SolidEdge

Tipo de mallado	Tetraédrico
Número total de cuerpos mallados	8
Número total de elementos	172.952
Número total de nodos	275.213
Tamaño subjetivo de malla (1-10)	1

A continuación, se observan los resultados del desplazamiento y tensión del conjunto:





## 2.2. Informe sensor táctil Heidenhain

La única carga impuesta fue la de la gravedad:

Tabla 8. Carga impuesta en el conjunto sensor táctil

Nombre de carga	Tipo de carga	Valor de carga	Distribución de carga	Dirección de carga	Opción de dirección de carga
Gravedad 1	Gravedad	981 cm/s <sup>2</sup>		( 0,00, 0,00, -1,00 )	A lo largo del vector

A continuación, se observan las características de cada componente del conjunto. Estas fueron impuestas en el momento del diseño de cada componente:

Tabla 9. Características componentes sensor táctil. Fuente: SolidEdge

Nombre del sólido	Material	Masa	Volumen	Peso
posicionadora 50Ac50Al.par:1	Aluminio, 2024-T4 (Ocurrencia)	1,794 kg	648443,016 mm <sup>3</sup>	17,58 N
Base soporte.V.par:1	Aluminio, 1060 (Ocurrencia)	2,279 kg	840392,385 mm <sup>3</sup>	22,34 N
Cilindro soporte.V.par:1	Acero (Ocurrencia)	1,401 kg	178831,585 mm <sup>3</sup>	13,73 N
Chaveta.V.par:1	Acero (Ocurrencia)	0,132 kg	16800,000 mm <sup>3</sup>	1,29 N
enganche heidenhain.par:1	Aluminio, 6061-T6 (Ocurrencia)	0,135 kg	49679,349 mm <sup>3</sup>	1,32 N
Sensor Heidenhain simple.par:1	Acero inoxidable, 420 (Ocurrencia)	0,180 kg	39502,102 mm <sup>3</sup>	1,76 N

El programa también facilita las características de cada material del modelo:

Aluminio, 1060

Tabla 10. Características aluminio 1060. Fuente: SolidEdge

Propiedad	Valor
Densidad	2712,000 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0,000023 /C
Conductividad térmica	0,221 kW/m-C
Calor específico	920,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	68947,570 MPa
Coefficiente de Poisson	0,330
Límite elástico	27,579 MPa
Tensión de rotura	68,948 MPa
% de elongación	0,000

Acero

Tabla 11. Características acero. Fuente: SolidEdge

Propiedad	Valor
Densidad	7833,000 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0,000012 /C
Conductividad térmica	0,032 kW/m-C
Calor específico	481,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	199947,953 MPa
Coefficiente de Poisson	0,290
Límite elástico	262,001 MPa
Tensión de rotura	358,527 MPa
% de elongación	0,000

Aluminio, 6061-T6

Tabla 12. Características aluminio 6061-T6. Fuente: SolidEdge.

Propiedad	Valor
Densidad	2712,000 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0,000023 /C
Conductividad térmica	0,180 kW/m-C
Calor específico	920,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	68947,570 MPa
Coefficiente de Poisson	0,330
Límite elástico	275,790 MPa
Tensión de rotura	310,264 MPa
% de elongación	0,000

Acero inoxidable, 420

Tabla 13. Características acero inoxidable 420. Fuente: SolidEdge.

Propiedad	Valor
Densidad	4556,700 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0,000010 /C
Conductividad térmica	0,025 kW/m-C
Calor específico	502,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	199947,953 MPa
Coefficiente de Poisson	0,290
Límite elástico	344,738 MPa
Tensión de rotura	655,002 MPa
% de elongación	0,000

## Aluminio, 2024-T4

Tabla 14. Características aluminio 2024-T4. Fuente: SolidEdge

Propiedad	Valor
Densidad	2767,000 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0,001225 /C
Conductividad térmica	0,189 kW/m-C
Calor específico	920,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	73084,424 MPa
Coefficiente de Poisson	0,330
Límite elástico	289,580 MPa
Tensión de rotura	427,475 MPa
% de elongación	0,000

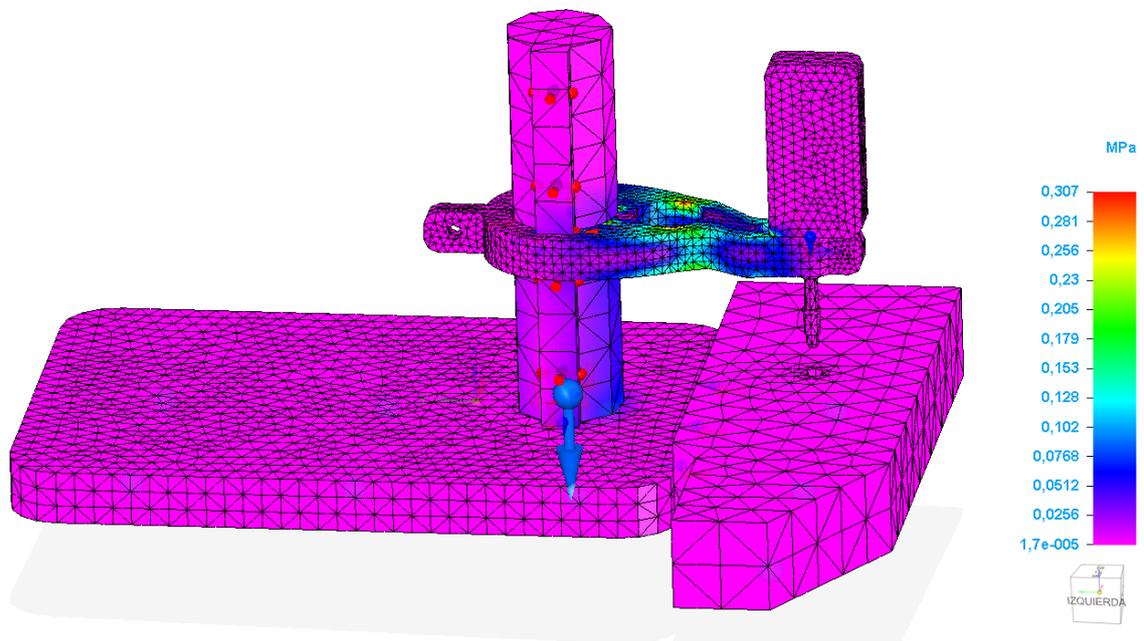
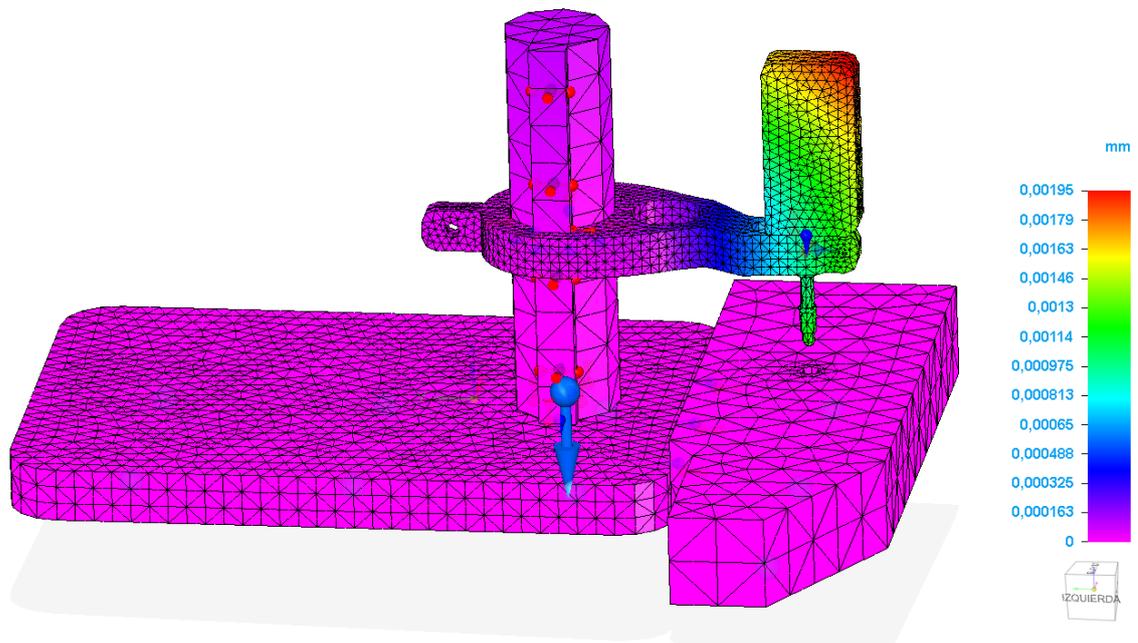
Por último, se observan las características del mallado:

## Información de mallado

Tabla 15. Características mallado. Fuente: SolidEdge

Tipo de mallado	Tetraédrico
Número total de cuerpos mallados	6
Número total de elementos	47.174
Número total de nodos	75.494
Tamaño subjetivo de malla (1-10)	2

A continuación, se observan los resultados del desplazamiento y tensión del conjunto:



### 3. Estudios de expansión térmica

#### 3.1. Estudio conjunto sensor confocal

Muestra [mm]	$\Delta L_x$ [mm]	X
0	-0,000239998	20
1	-0,000215998	21
2	-0,000191998	22
3	-0,000167998	23
4	-0,000143998	24
5	-0,000119998	25
6	-0,000095998	26
7	-7,1998E-05	27
8	-4,7998E-05	28
9	-0,000023998	29
10	2E-09	30
11	2,4002E-05	31
12	0,000048002	32
13	7,2002E-05	33
14	9,6002E-05	34
15	0,000120002	35
16	0,000144002	36
17	0,000168002	37
18	0,000192002	38
19	0,000216002	39
20	0,000240002	40
21	0,000264002	41
22	0,000288002	42
23	0,000312002	43
24	0,000336002	44
25	0,000360002	45
26	0,000384002	46
27	0,000408002	47
28	0,000432002	48
29	0,000456002	49
30	0,000480002	50

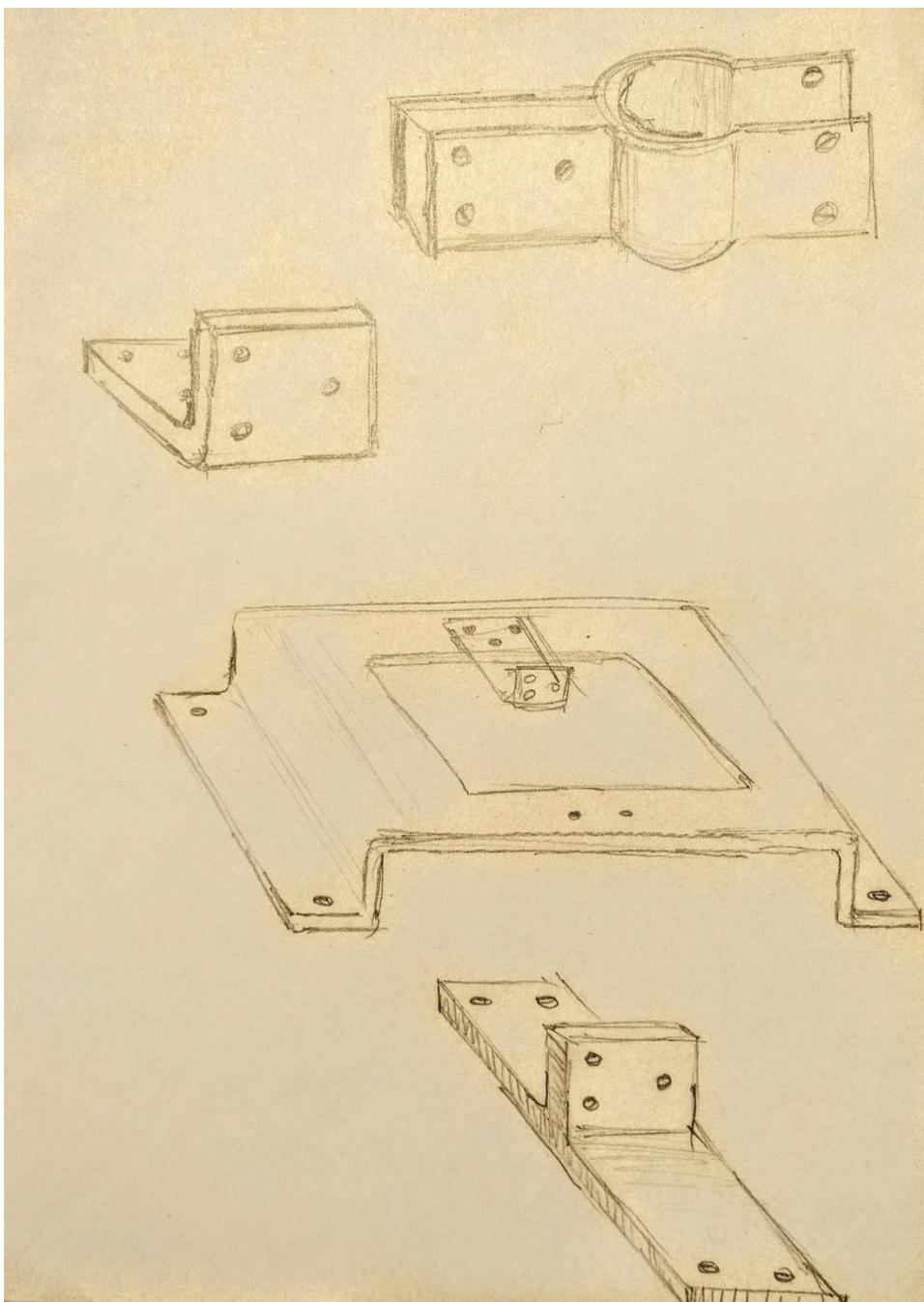
Fuente: elaboración propia mediante Excel

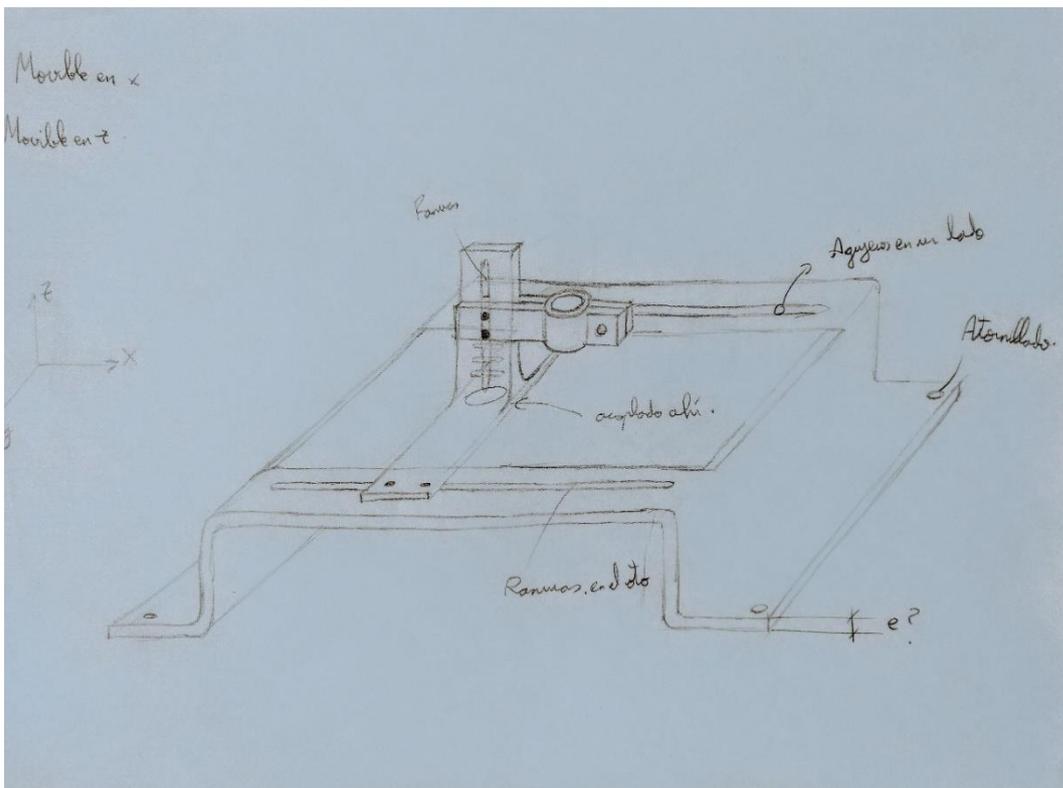
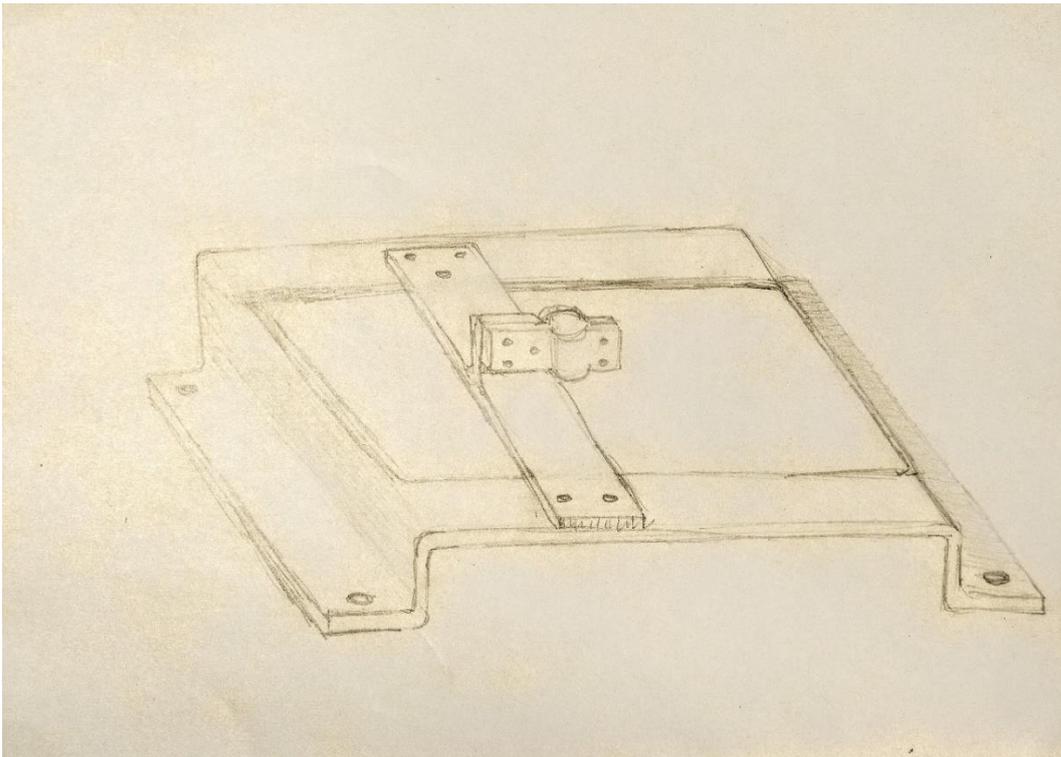
### 3.2. Estudio conjunto sensor táctil

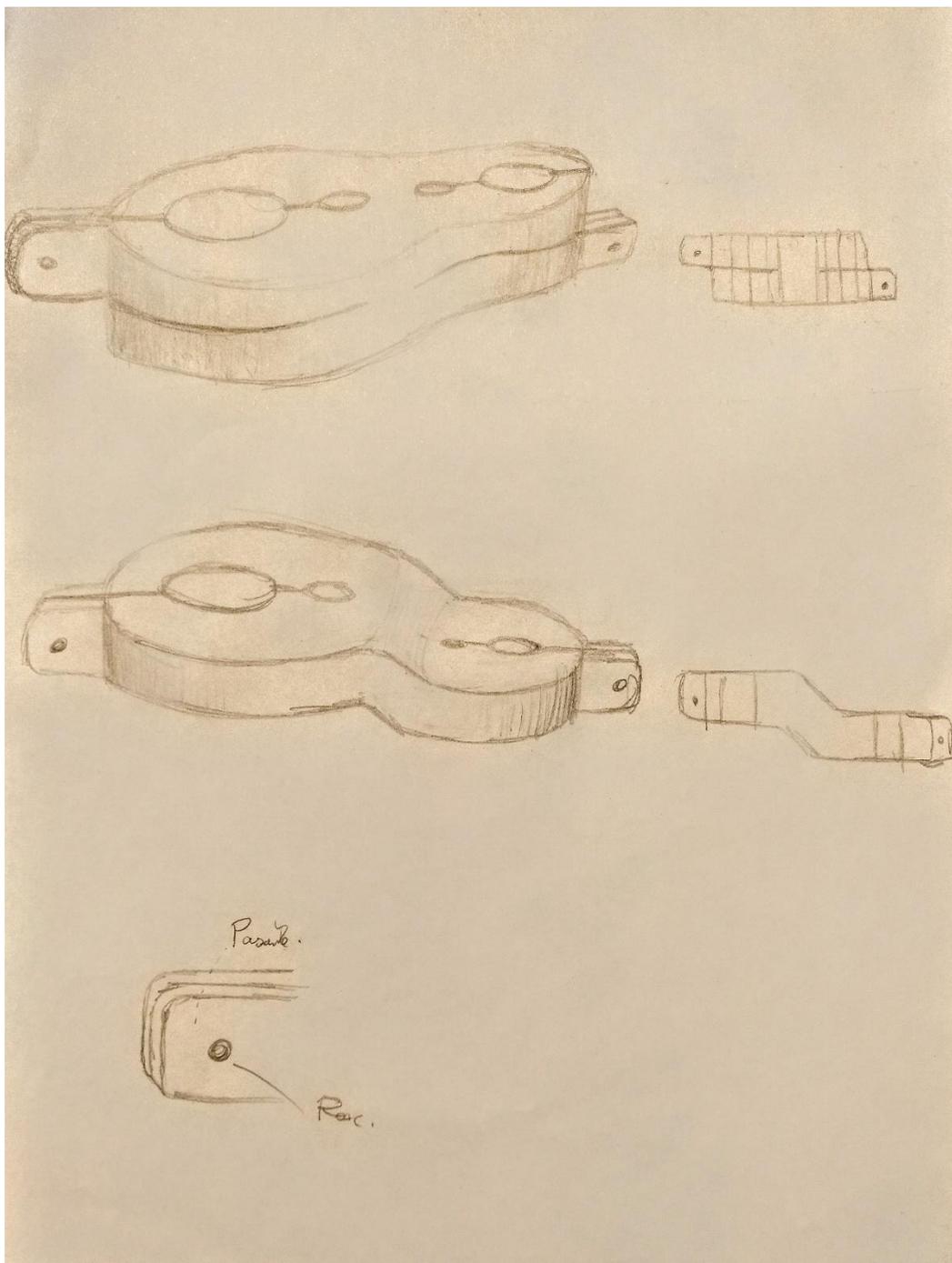
Muestra [mm]	$\Delta L_x$ [mm]
0	-0,000239998
1	-0,000215998
2	-0,000191998
3	-0,000167998
4	-0,000143998
5	-0,000119998
6	-9,5998E-05
7	-7,1998E-05
8	-4,7998E-05
9	-2,3998E-05
10	2E-09
11	0,000024002
12	4,8002E-05
13	7,2002E-05
14	0,000096002
15	0,000120002
16	0,000144002
17	0,000168002
18	0,000192002
19	0,000216002
20	0,000240002
21	0,000264002
22	0,000288002
23	0,000312002
24	0,000336002
25	0,000360002
26	0,000384002
27	0,000408002
28	0,000432002
29	0,000456002
30	0,000480002

Fuente: elaboración propia mediante Excel

#### 4. Bocetos



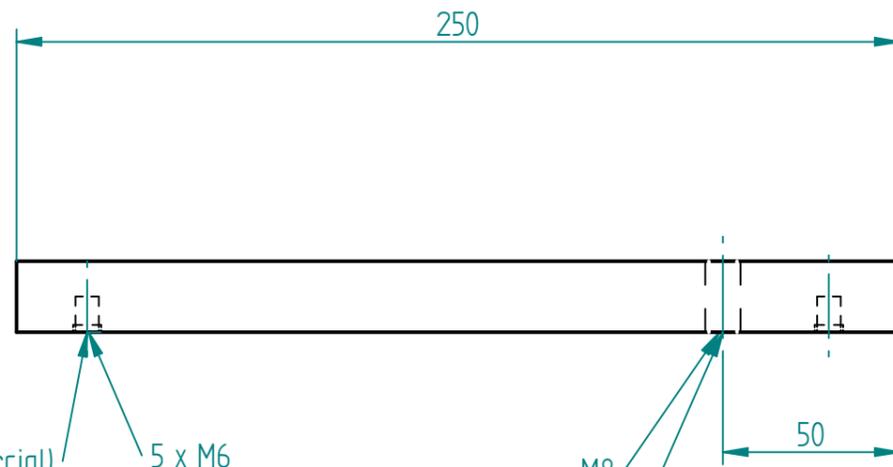




Fuente: elaboración propia

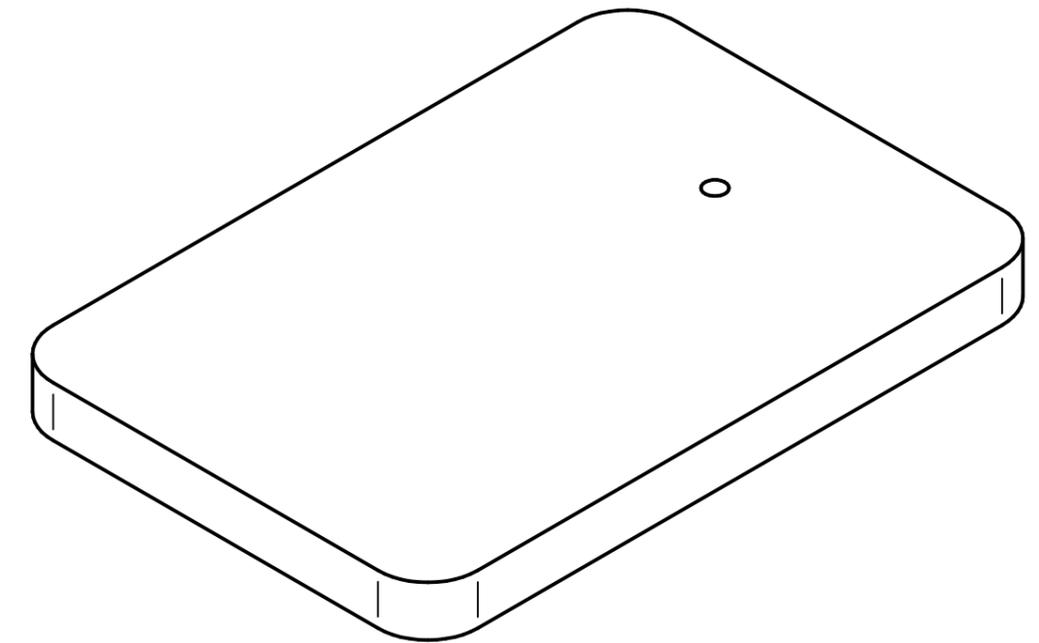
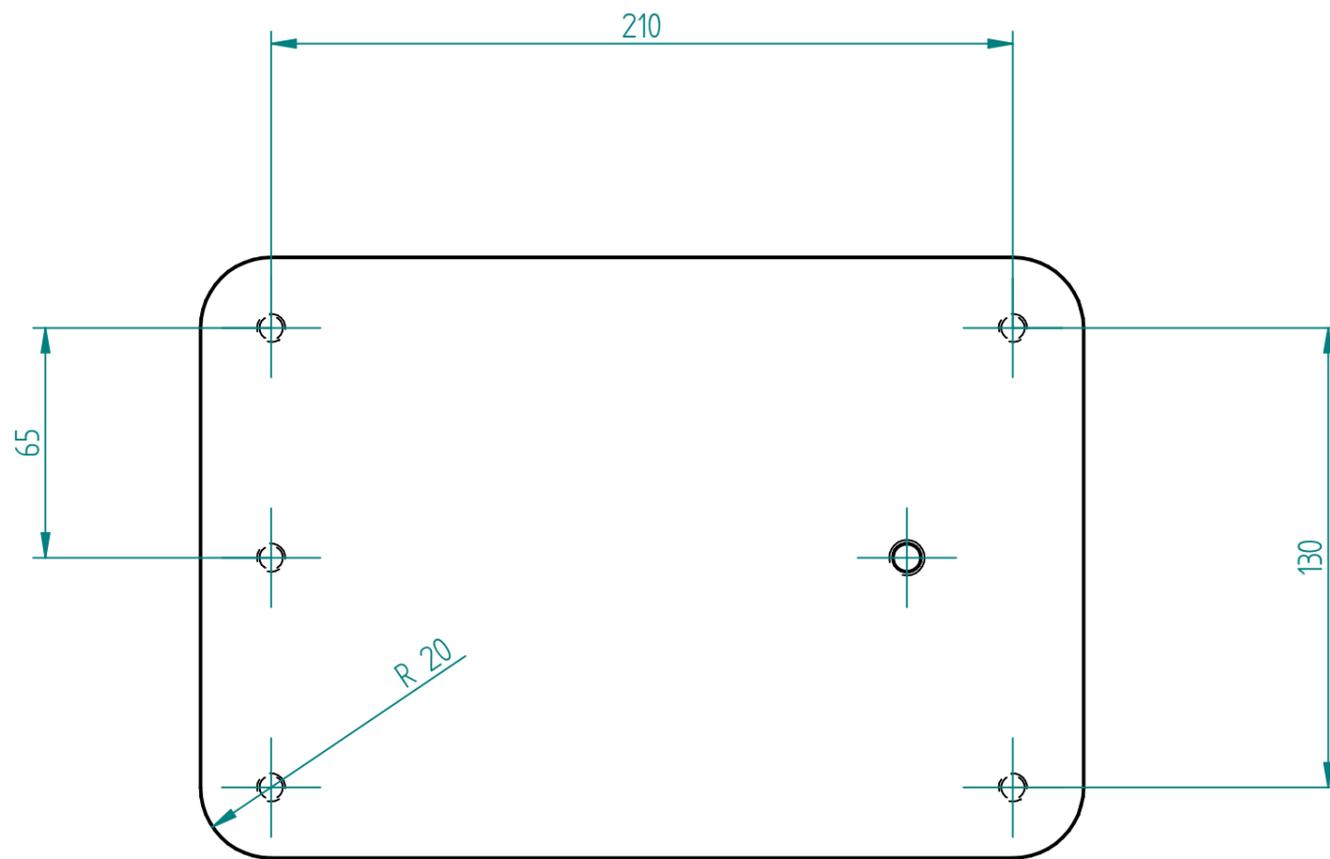
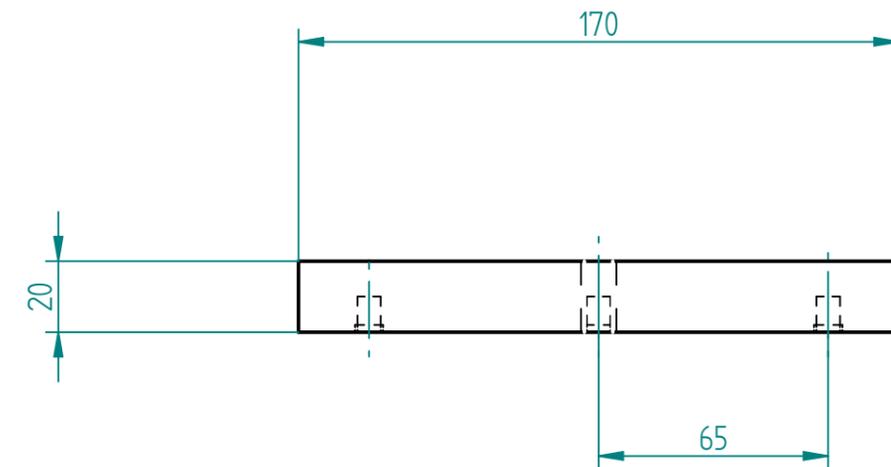
## **5. Planos**

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



5 x Patas (Comercial) 5 x M6

M8  
Agujero por donde se atornilla el cilindro

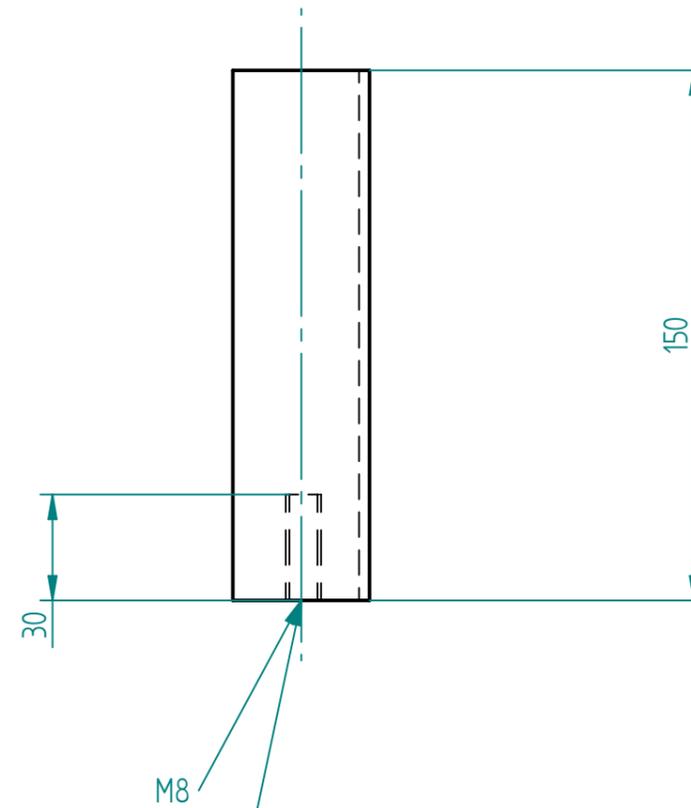
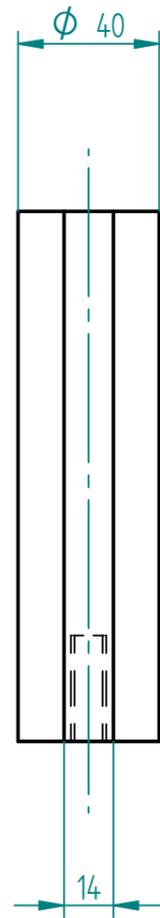


Duraluminio 6082 - Anodizado blanco

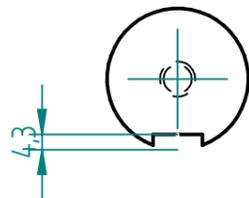
	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Javier Camino	23/06/18			
Comprobado			Título Base soporte		
Aprobado 1					
Aprobado 2			A3	Plano 1	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Archivo: Base soporte.V.dft		
			Escala 1:2	Peso 2,279 kg.	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Agujero para atornillar barra a la base

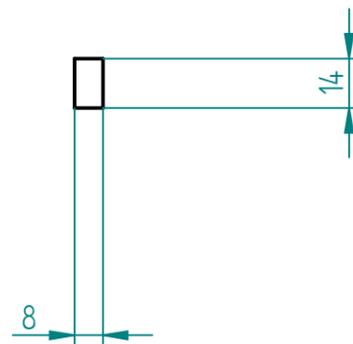
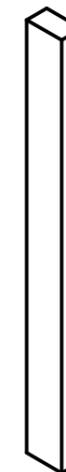
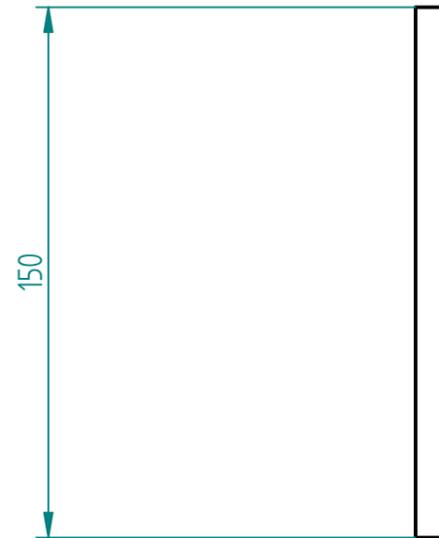


Acero niquelado - F-118 - F-114

	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Javier Camino	22/06/18			
Comprobado			Título Cilindro soporte		
Aprobado 1					
Aprobado 2			A3	Plano 2	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			Archivo: Cilindro soporte.V.dft		
			Escala 1:2	Peso 1,389 kg.	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

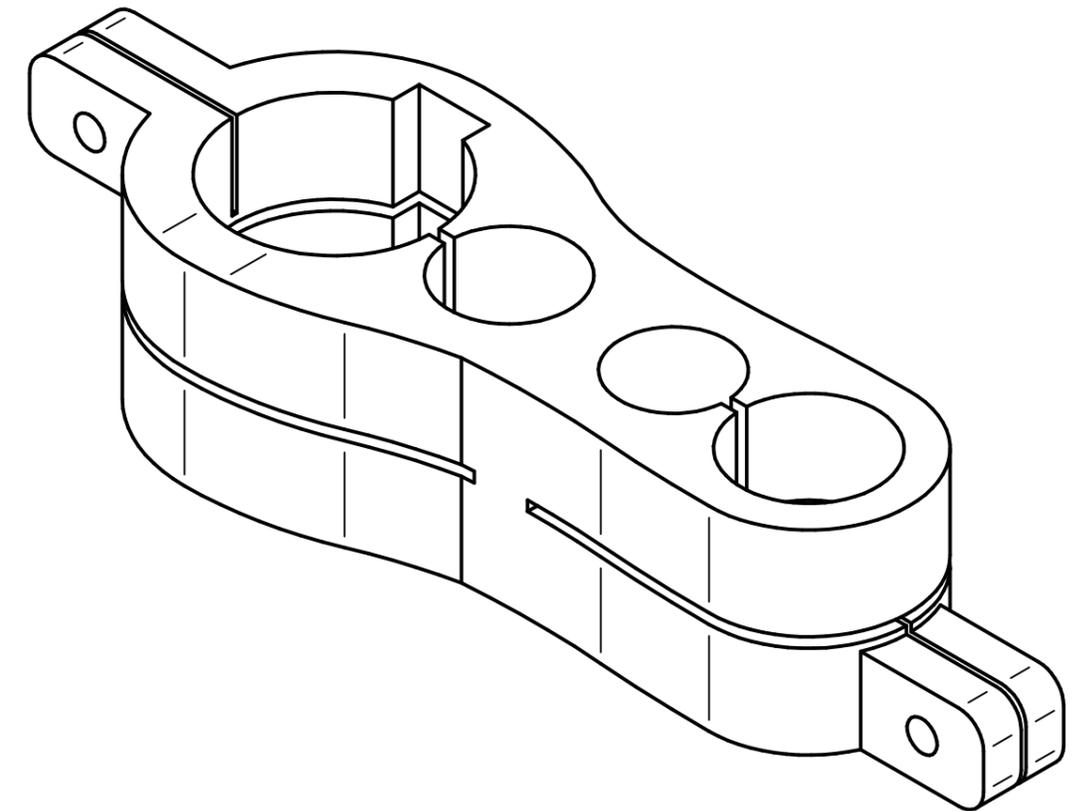
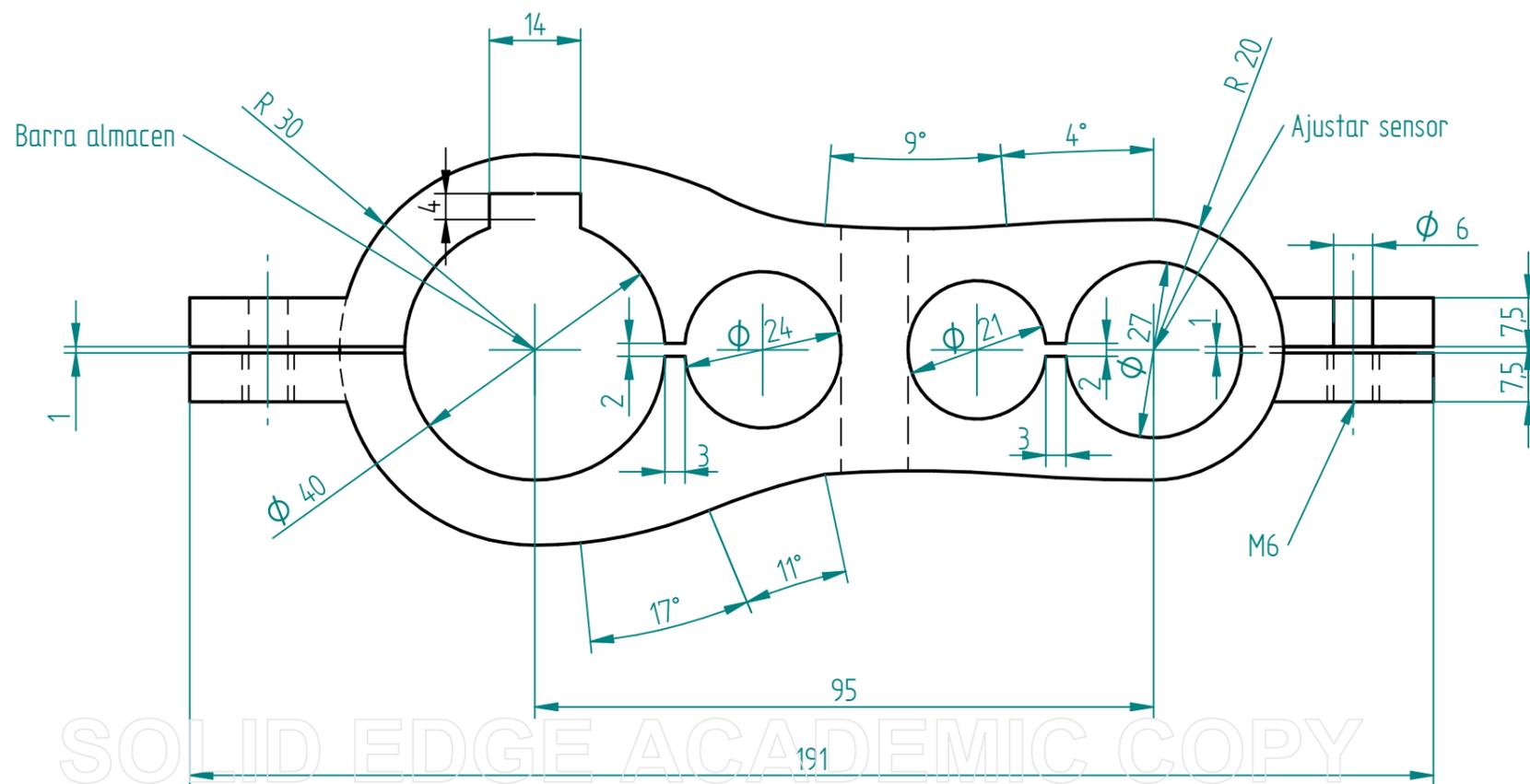
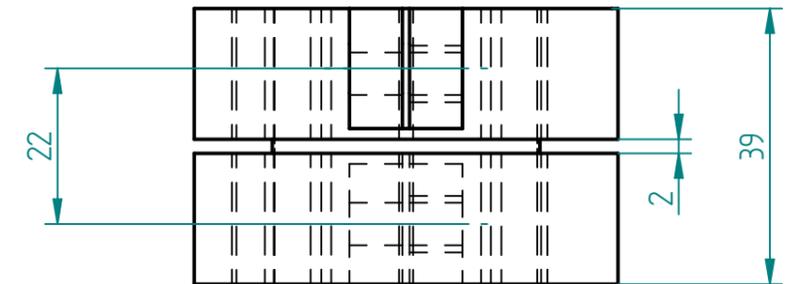
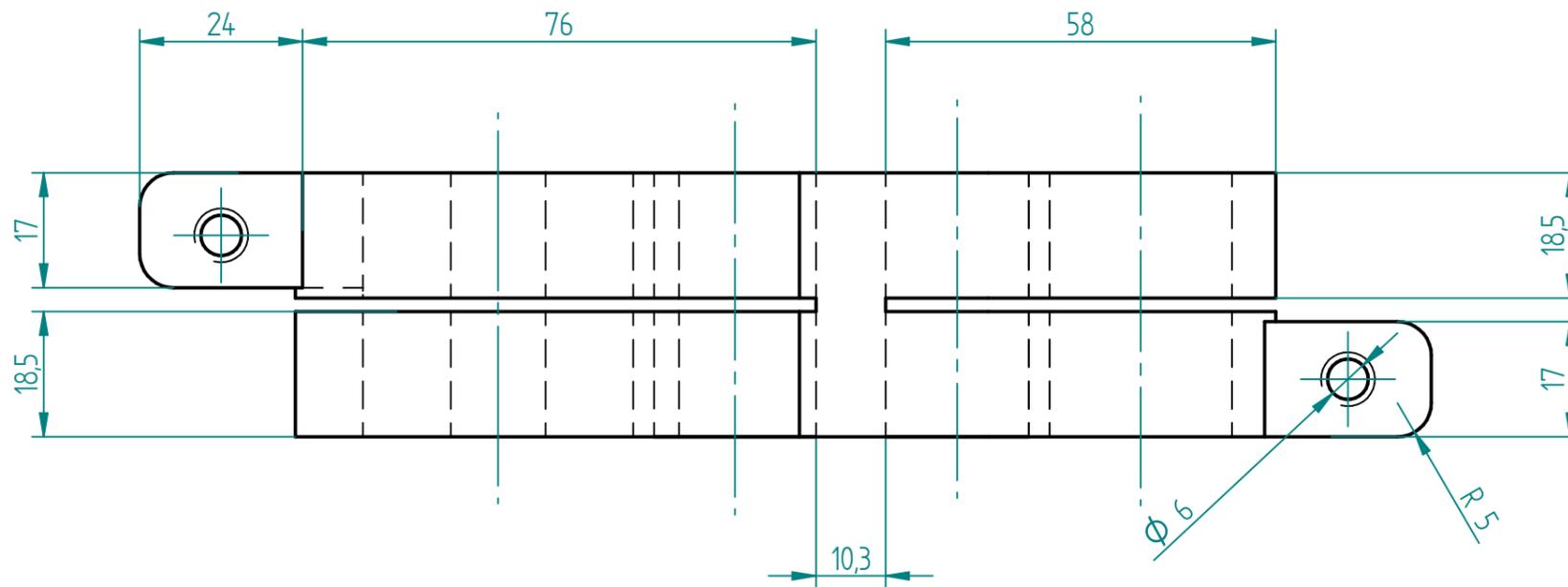


Acero niquelado - F-114

	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Javier Camino	19/05/18			
Comprobado			Título Chaveta		
Aprobado 1					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			A3	Plano 3	Rev
			Archivo: Chaveta.V.dft		
			Escala 12	Peso 0,132 kg.	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

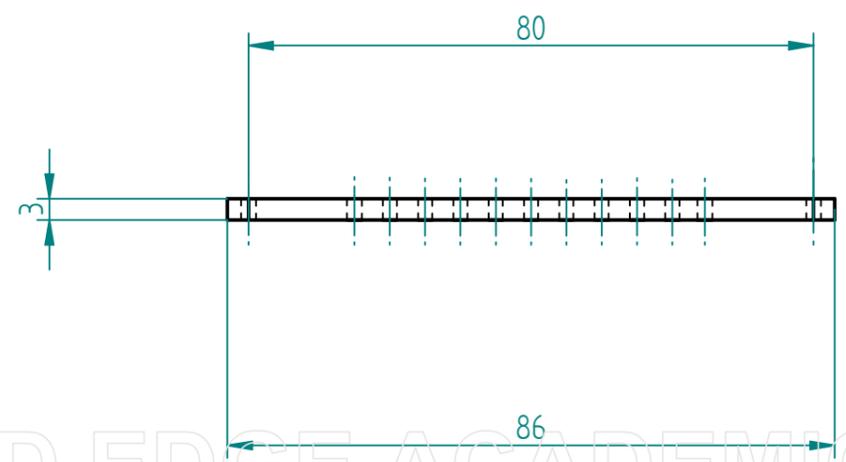
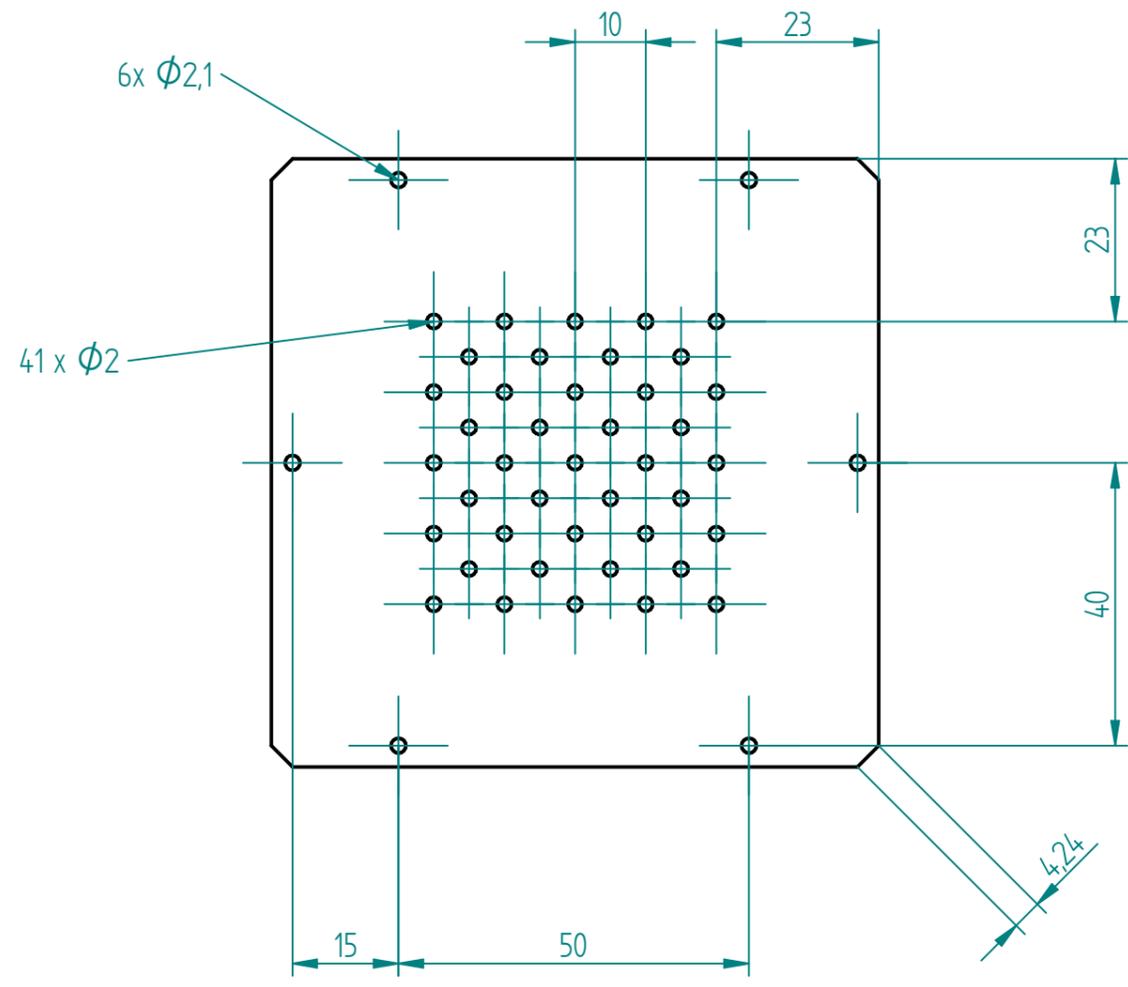
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



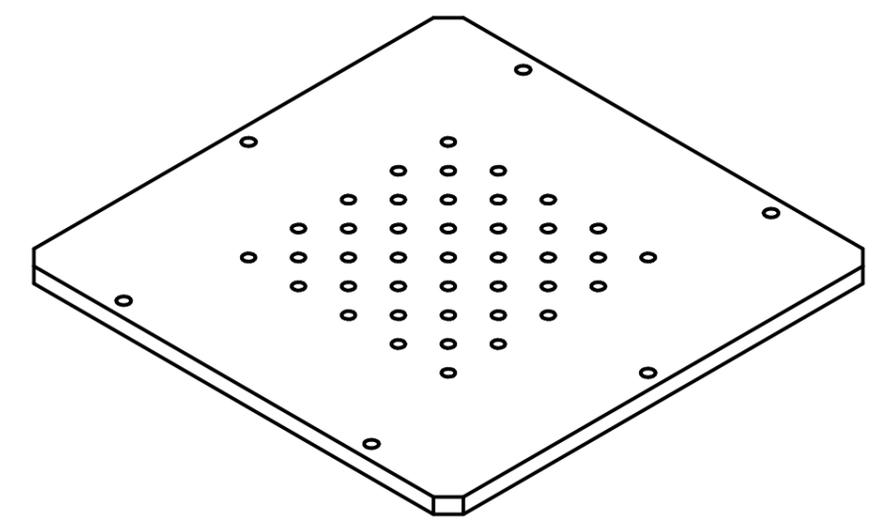
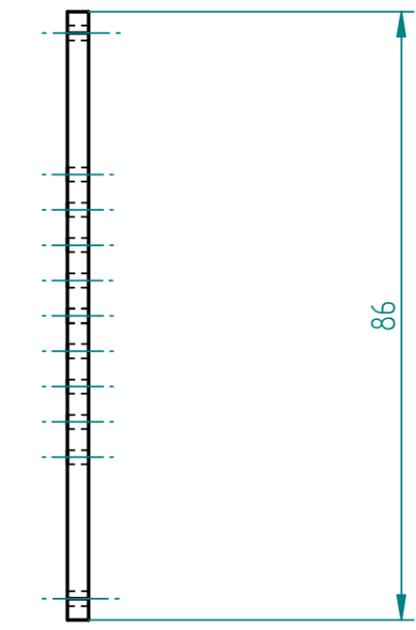
Duraluminio 6082 - Anodizado blanco

	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b>	
Dibujado	Javier Camino	22/06/18	Siemens PLM Software	
Comprobado			Título	
Aprobado 1			Enganche sensor	
Aprobado 2			A3	Plano 4
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Rev	
			Archivo: Enganche4 aligerado.V.dft	
Escala 1:1			Peso 0,386 kg.	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

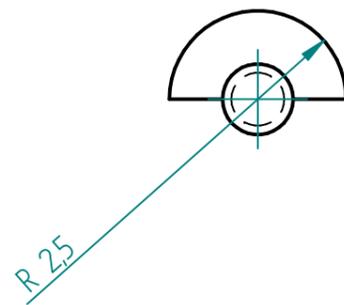
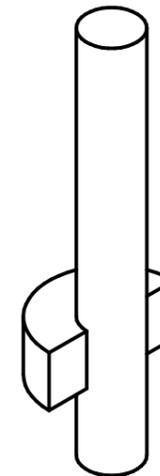
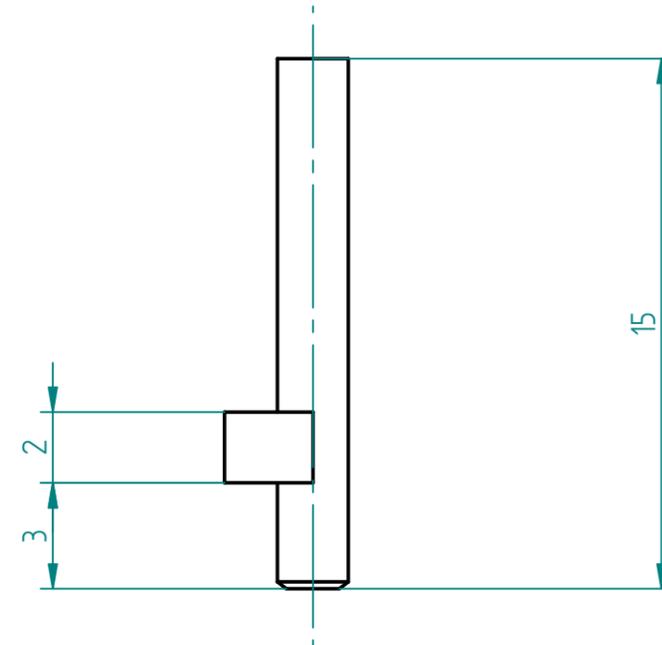
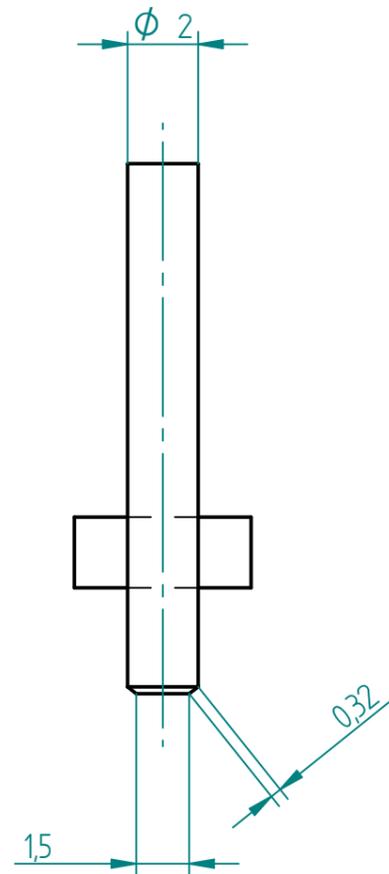


Duraluminio 6082 - Anodizado blanco

Dibujado	Nombre Javier Camino	Fecha 23/06/18	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Comprobado			Título Portamuestras	
Aprobado 1			A3	Plano 5
Aprobado 2			Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Archivo: Portamuestras.V.dft	
Escala 1:1		Peso 0,059 kg.	Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Varillas (x5) Latón

	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Javier Camino	23/06/18		
Comprobado			Título Varilla	
Aprobado 1			A3 Plano 6 Rev	
Aprobado 2			Archivo: Varilla.V.dft	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Escala 5:1	Peso 0,01 kg
			Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

