

**Institución:** Universidad Nacional de La Pampa – Facultad de Ingeniería

**Actividad curricular:** PPS – Práctica profesional supervisada de Ingeniería Electromecánica (2004)

**Título del trabajo:** Ensamble y puesta en operación de un posicionador nanométrico con amplificación de recorrido

**Autor:** Juan Eugenio Isasti

**Grado académico alcanzado:** Ingeniero Electromecánico

**Nombre del tutor:** Ing. Gustavo Marcelo Flores

**Nombre del co-tutor:** Dr. Rogelio L. Hecker

**Lugar de presentación:** General Pico, La Pampa

**Año:** 2022

**Fecha de aprobación:** 25 de febrero de 2022

**Jurado:**  
Pablo Ascona  
Hugo Berti  
Alejandro Massolo

**Resumen:** El objetivo del trabajo es el montaje y la puesta en funcionamiento de un posicionador nanométrico accionado por un actuador piezoeléctrico a través de un sistema de brazo-palanca. El montaje se realizó sobre un flexure stage diseñado en la Facultad. Con la ayuda de una mesa de medición tridimensional se realizó el control dimensional del flexure stage. Se calculó experimentalmente la rigidez del sistema. Con una impresora 3D se fabricaron soportes para un correcto montaje y alineación de los piezoeléctricos. Se realizaron pruebas con el posicionador y se analizaron los resultados.

**Palabras claves:** Sistemas de posicionamiento, Actuadores piezoeléctricos, Brazo-Palanca.

**Abstract:** The main objective of this work is the assembly and commissioning of a nanometric positioner activated by a piezoelectric actuator through a lever-arm system. The assembly was carried out on a flexure stage designed at the University. The dimensional control of the flexure stage was made with the help of a three-dimensional measurement table. The stiffness of the system was experimentally calculated. With a 3D printer, supports were made for the piezoelectrics correct assembly and alignment. Tests were carried out with the positioner and the results were analyzed.

**Key Words:** Positioning systems, Piezoelectric actuators, Lever arm.



FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

## PRÁCTICA PROFESIONAL SUPERVISADA – PPS

Ensamble y puesta en operación de un posicionador  
nanométrico con amplificación de recorrido

**AUTOR**

JUAN EUGENIO ISASTI

**TUTOR DE LA FACULTAD**

ING. GUSTAVO M. FLORES

**TUTOR DEL PROYECTO**

DR. ROGELIO L. HECKER

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	4
1.1 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO .....	5
CONTROL DIMENSIONAL DEL SISTEMA FLEXIBLE DE GUIADO Y MEDICIÓN DE LA RIGIDEZ.....	6
2.1 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS.....	6
2.2 DIMENSIONES CONTROLADAS.....	7
2.3 RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES .....	9
2.4 MEDICIÓN DE LA RIGIDEZ.....	9
2.5 VERIFICACIÓN DE LA RIGIDEZ MEDIANTE SIMULACIÓN .....	13
MONTAJE DE LOS ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS Y SENSORES DE POSICIÓN.....	15
3.1 ALINEACIÓN DE LOS PIEZOELÉCTRICOS .....	15
3.2 CÁLCULO DE LA PRECARGA .....	16
3.3 MONTAJE DE LOS PIEZOELÉCTRICOS Y APLICACIÓN DE LA PRECARGA .....	17
3.4 FIJACIÓN DE LA PRECARGA .....	19
3.5 SENSOR DE POSICIÓN.....	19
EXPERIMENTACIÓN .....	22
4.1 INTRODUCCIÓN AL ENSAYO .....	22
4.2 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN.....	23
4.3 SIMULACIÓN.....	26
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	27
CONCLUSIONES .....	29
REFERENCIAS.....	30
CONTROL DIMENSIONAL.....	31
PLANOS.....	32

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas áreas de la ciencia y la tecnología requieren de manipulación de muy alta precisión, como es el caso de microscopía, micro fabricación, biotecnología, metrología de precisión, entre otras. Estos sistemas de manipulación deben lograr desplazamientos controlados del orden de los nanómetros e inclusive, en algunos casos, recorridos totales que pueden llegar a algunos milímetros. Un posicionador nanométrico es un instrumento capaz de realizar movimientos de algunos micrones con una precisión de nanómetros. En nuestro país han surgido en los últimos años campos de aplicación con demandas concretas. Entre los ejemplos, podemos citar la manipulación de piezas para micromaquinado mediante litografía y mediante haz de iones pesados (Centro Atómico Constituyente)[1], metrología de precisión (INTI-Córdoba y CEMETRO UTN-FRC)[2] y otros potenciales usuarios como centros de fabricación de MEMS (dispositivos electromecánicos, por sus siglas en ingles), microelectrónica, área satelital, laboratorio de biotecnología y laboratorios de microscopía.

Una manera muy utilizada para realizar pequeños desplazamientos con resoluciones muy altas es por medio de actuadores piezoeléctricos y estructuras elásticas o “flexure stage” para el guiado del movimiento. Los piezoeléctricos se caracterizan por generar altos esfuerzos con bajas deformaciones (0,1 % de su longitud) y por tener una resolución teórica ilimitada. En aplicaciones donde se requieren recorridos mayores al desplazamiento útil del piezoeléctrico, se utilizan ampliificaciones mecánicas del tipo brazo de palanca o puente [3].

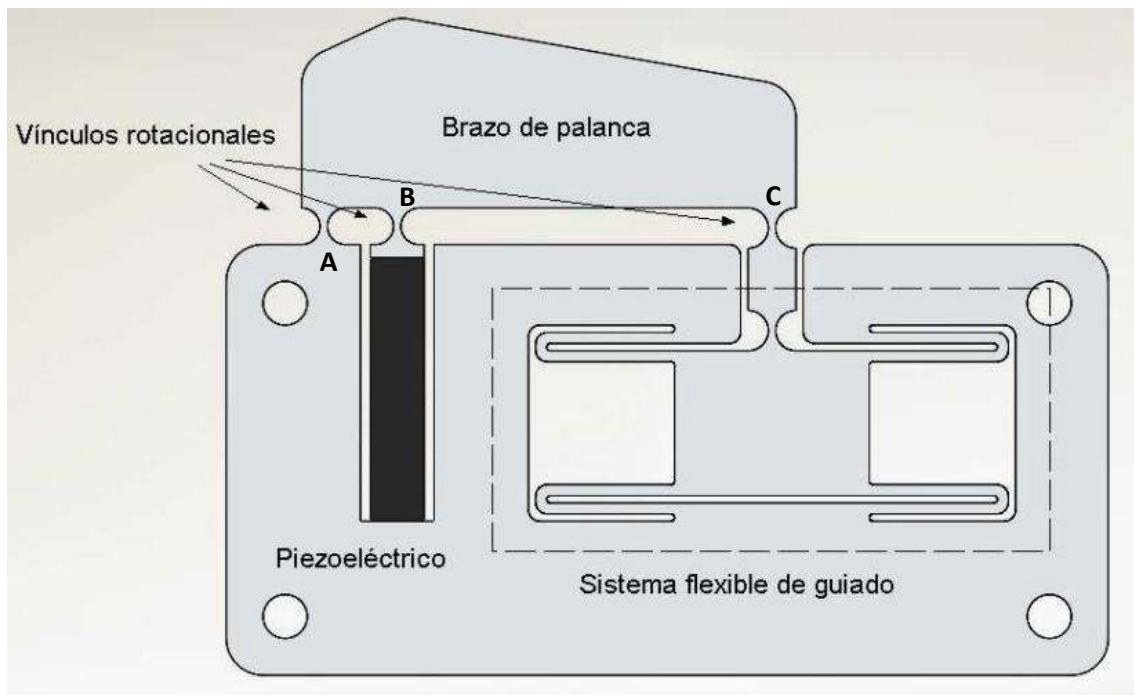


Figura 1 - Sistema de amplificación de recorrido para un piezoeléctrico

La Figura 1 representa a un sistema de amplificación de recorrido para un piezoeléctrico, en ella pueden distinguirse los siguientes componentes del sistema: el piezoeléctrico, los vínculos rotacionales, el brazo palanca y el sistema flexible de guiado. El piezoeléctrico ejercerá fuerza sobre el vínculo rotacional B, esto hará rotar al brazo de palanca sobre el vínculo A, y provocará un desplazamiento mayor sobre el vínculo C, y finalmente este desplazamiento se transmitirá al sistema flexible de guiado.

Este sistema cuenta en realidad con dos piezoeléctricos, uno que producirá la deformación, y otro que medirá la fuerza aplicada por el primero.

El proyecto de investigación dentro del cual se plantea la realización de esta PPS, propuso el diseño y fabricó un sistema flexible de guiado con brazo de palanca para amplificar el bajo recorrido de un actuador piezoeléctrico [4][5]. El objetivo del presente trabajo consiste en la puesta en marcha del sistema de posicionamiento nanométrico diseñado y construido en marco del proyecto de investigación. Hay una tarea concreta a realizar que consiste en el ensamble del actuador con el sistema de guiado y la instrumentación del mismo para la medición de los desplazamientos. Los actuadores piezoeléctricos por sus características constructivas son frágiles y no soportan ciertos tipos de esfuerzos. Esto exige una planificación adecuada del proceso de montaje siguiendo las instrucciones del fabricante del actuador.

## 1.1 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

La primera etapa del trabajo es el control dimensional del sistema flexible de guiado con brazo de palanca diseñado y fabricado para este proyecto de investigación. A esta etapa se le agregó la medición de la rigidez real del sistema flexible con el objetivo de compararla con la de diseño. Diferencias en la rigidez del sistema traerían problemas en el montaje de los piezoeléctricos y en los resultados de las mediciones.

Para el control dimensional de las piezas fue necesaria una capacitación para el uso de la mesa de medición TESA Micro-Hite. La capacitación fue realizada en el departamento de mecánica de la Facultad de Ingeniería.

La segunda etapa es el montaje de los piezoeléctricos y la precarga del sistema. Esta es la parte más crítica del trabajo por la fragilidad de los piezoeléctricos. Estos deben quedar perfectamente alineados para evitar que sufran esfuerzos que puedan dañarlos.

Finalmente, una vez realizado el montaje, se realizaron pruebas y se analizaron los resultados.

## CAPÍTULO 2

# CONTROL DIMENSIONAL DEL SISTEMA FLEXIBLE DE GUIADO Y MEDICIÓN DE LA RIGIDEZ

Se realizó el control dimensional de las principales secciones que afectan al comportamiento del sistema flexible de guiado (Figura 2). Los desvíos respecto a las condiciones de diseño pueden afectar a los resultados. Es fundamental realizar estas mediciones antes de comenzar con el montaje del resto de los componentes.

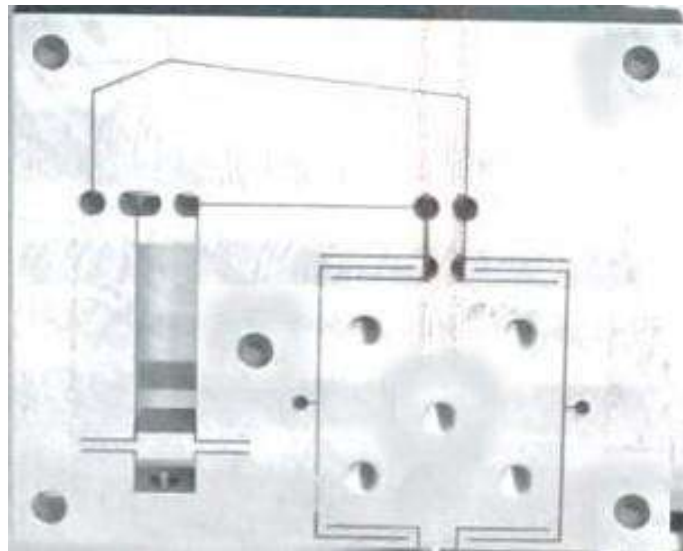


Figura 2 - Flexure stage con brazo de palanca

## 2.1 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS

Para controlar las dimensiones del flexure y corroborar que se cumplen las exigencias del diseño se utilizaron 3 instrumentos de medición diferentes:

- TESA Micro-Hite 3D: Es una mesa de medición tridimensional. Cuenta con un brazo que se mueve de forma manual en tres direcciones a través de guías con rodamientos neumáticos que minimizan la fricción y permiten obtener mayor precisión. En el brazo se colocan las diferentes puntas de medición (pueden colocarse más de una a la vez) según lo que se deba medir. La TESA Micro-Hite 3D tiene resolución de  $1 \mu\text{m}$  y precisión de  $3 \mu\text{m}$ . [6]

La TESA Micro-Hite 3D se utilizó para medir el espesor del flexure, las distancias y alineación entre los centros de los agujeros donde actúa el brazo de palanca, y la distancia y el paralelismo entre las dos superficies en donde apoya el piezoeléctrico.

- Calibre digital Mitutoyo: Esta herramienta posee un rango de medición desde 0 a 150 mm, con una resolución de 0,01 mm y un error máximo de  $\pm 0,02$  mm. Se utilizó para medir los espesores de los vínculos flexibles y de las ranuras del flexure en donde la punta de la TESA Micro-Hite 3D no entraba.
- Lupa calibrada: La lupa puede medir hasta 10 mm, con una precisión de 0,1 mm y un error de  $\pm 0,1$  mm. Con esta herramienta se midió lo mismo que con el calibre para tener una segunda medición y compararlas.
- Morsa: Se usó una morsa para fijar el flexure a la mesa de medición. Esta morsa estaba fabricada con una impresora 3D del laboratorio de la facultad.

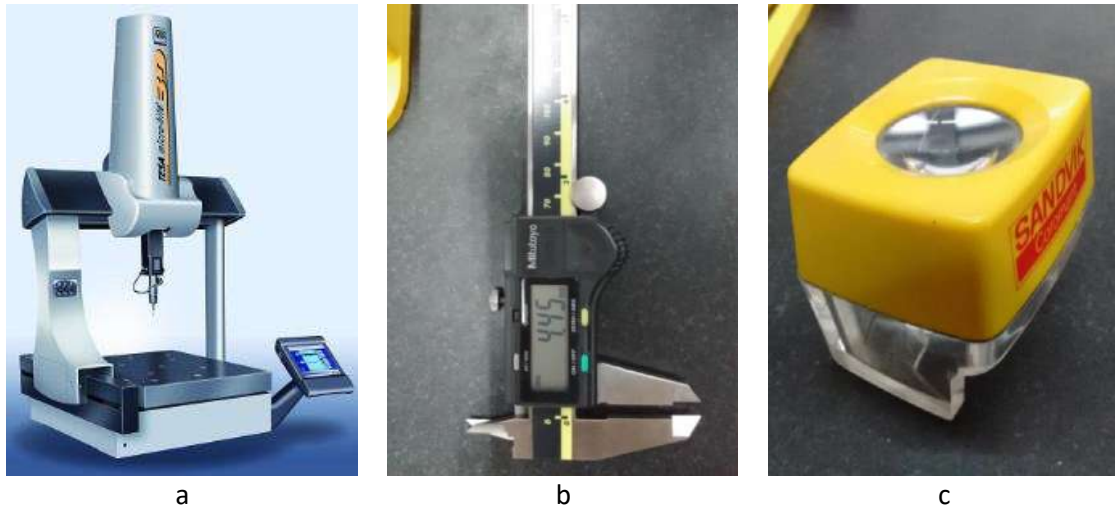


Figura 3 - a) TESA Micro-Hite 3D. b) Calibre digital Mitutoyo. c) Lupa calibrada.

## 2.2 DIMENSIONES CONTROLADAS

Las dimensiones medidas se identificaron con un código alfanumérico y se marcaron en los planos de la pieza (ver planos en ANEXO II PLANOS - PLANOS - FLEXURE). Se utilizaron los instrumentos mencionados anteriormente para controlar cada una de las medidas:

- TESA Micro-Hite 3D: Con este instrumento se controlaron los diámetros y las distancias entre los vínculos rotacionales. Estas secciones se identificaron con los códigos A1, A2, A3, A4, A5, P2, P3 y P4. También se midió la distancia y el paralelismo entre las superficies donde se posiciona el piezoeléctrico que producirá la deformación (P1), y el espesor y paralelismo de toda la pieza (P5). Para controlar el espesor fue necesario colocar una punta de medición doble, mientras que el resto de las secciones se midieron con una punta simple.

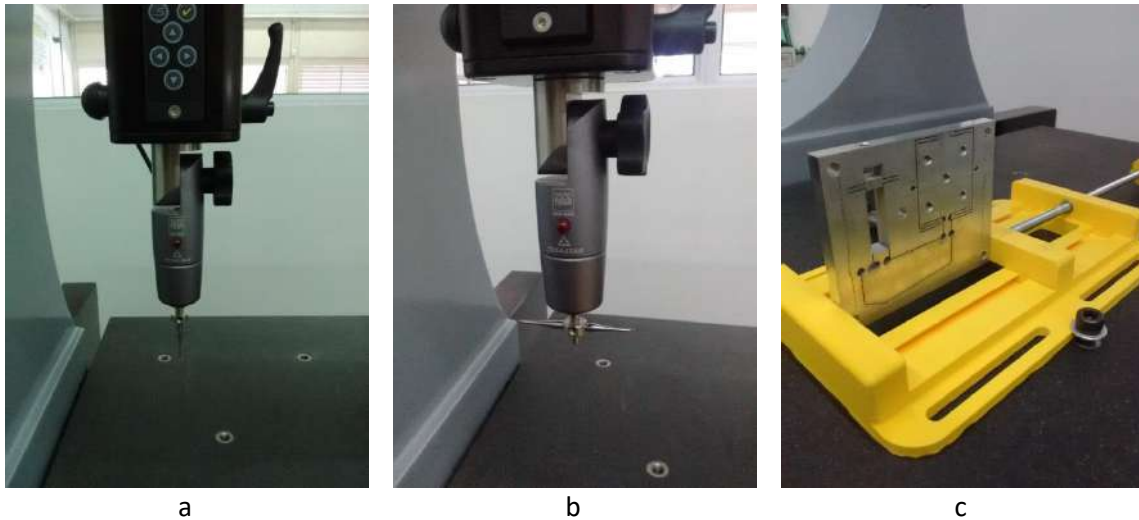


Figura 4 - a) Punta simple. b) Punta doble. c) Flexure colocado para medir P5 con la punta doble.

- Calibre digital Mitutoyo: Con esta herramienta se midieron los espesores y las longitudes de los vínculos articulares del flexure stage (B1, B2, B3, B4, D1, D2, D3 y D4), y los espesores de la sección que interactúa entre los dos piezoeléctricos (C1, C2 y C3). Para estas dimensiones no fue posible utilizar la TESA Micro-Hite 3D ya que la punta de medición es mayor que las hendiduras de estos vínculos articulares.
- Lupa calibrada: Este instrumento se utilizó para controlar algunas de las medidas tomadas con el calibre digital Mitutoyo (B3, B4, C1, C3, D3 y D4).

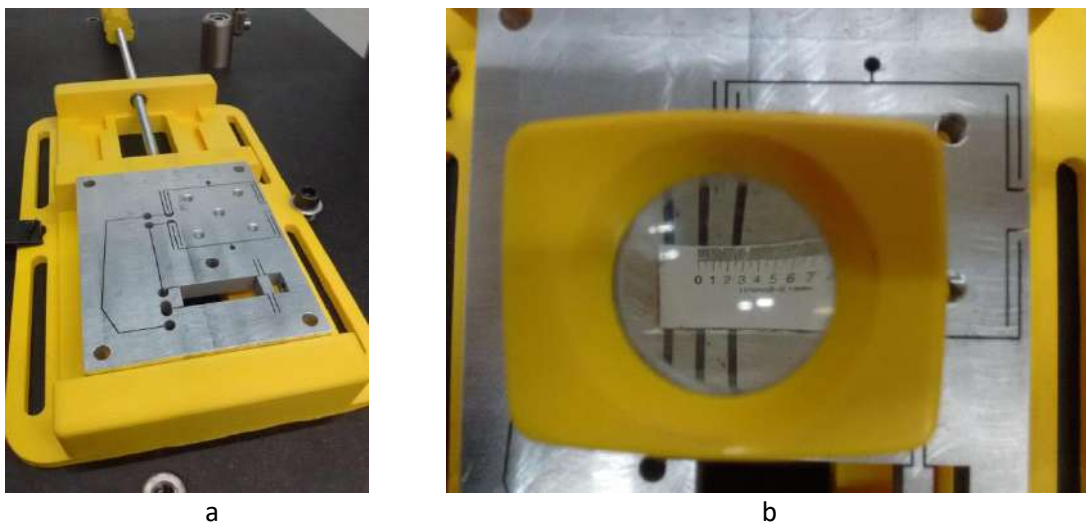


Figura 5 - a) Morsa sujetando al flexure. b) Medición con lupa.

Con la máquina TESA Micro-Hite 3D se hicieron 3 mediciones distintas de cada sección, mientras que con el calibre y la lupa se hicieron 2 mediciones en distintas partes de cada sección. Luego estos resultados se promediaron para obtener una única medida.



## 2.3 RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES

Las secciones medidas se controlaron con lo detallado en los planos de la pieza (VER PLANOS EN ANEXO II - FLEXURE). La tabla con los resultados obtenidos se encuentra en el ANEXO I – CONTROL DIMENSIONAL.

Las mediciones de los vínculos articulares dieron resultados aceptables considerando las tolerancias de diseño. Estas mediciones se identifican con las secciones A1, A2, A3, A4, A5, P2, P3 y P4 (VER PLANOS EN ANEXO II). Por otro lado, la medición de la separación y el paralelismo entre las superficies en dónde apoya el piezoeléctrico (sección P1) también dio un resultado dentro de la tolerancia. Todas estas secciones son las más importantes del flexure, ya que de ellas depende el comportamiento del piezoeléctrico y del brazo de palanca. Estas dimensiones fueron medidas con la máquina TESA Micro-Hite 3D.

En las ranuras que articulan el movimiento del cuerpo del área móvil de trabajo y la sección que interactúa entre los dos piezoeléctricos (todas las secciones B, C y D) los desvíos encontrados fueron mayores. Estas diferencias pueden deberse tanto a errores de fabricación como al error de los instrumentos de medición utilizados. No fue posible usar la máquina TESA Micro-Hite 3D para medir estas secciones y se usaron herramientas de menor precisión.

## 2.4 MEDICIÓN DE LA RIGIDEZ

Se realizó un ensayo para determinar la rigidez del flexure y compararlo con las condiciones de diseño. Este ensayo consistió en aplicarle una determinada fuerza al flexure y medir su desplazamiento.

La fuerza aplicada  $F$  será igual a la deformación en el flexure  $\Delta l$  por la rigidez  $k_f$  (ecuación 1).

$$F = \Delta l * k_f \quad (1)$$

Con los valores de  $F$  y  $\Delta l$  se determinará  $k_f$ .

### 2.4.1 CALIBRACIÓN DE PESAS

Previo a la realización de la prueba se debieron calibrar las cargas que se iban a utilizar para aplicarle fuerza al flexure. Se utilizó una balanza OHAUS, modelo de TRIPLE BRAZO, SERIE 700. Esta es una balanza mecánica con una capacidad máxima de 610 g y una resolución de 0,1 g. Se calibraron 12 pesas y todos los elementos que intervienen en el sistema de poleas a través del cual se le aplicará la fuerza al flexure.

Se pesaron todos los elementos del sistema de poleas que intervinieron en el ensayo y las 12 pesas de acero. Los pesos se muestran en las Tabla 2 y Tabla 1:

Tabla 2 - Elementos del sistema de poleas

<u>Item</u>	<u>Peso (g)</u>
Balde	56,6
Cable de acero (67 cm)	3,8
Gancho	13,5
Grampas (c/u)	3,4



Figura 6 - Balanza OHAUS.

Tabla 1 - Pesas de acero

<u>Pesas</u>	<u>Peso (g)</u>
Probeta 1	386,2
Probeta 2	382,6
Probeta 3	385,6
Probeta 4	382,8
Probeta 5	382,8
Probeta 6	385,8
Probeta 7	383,5
Probeta 8	389,4
Probeta 9	383,4
Probeta 10	386,9
Probeta 11	376,4
Probeta 12	382,1

La carga total a aplicar sería de 4,6 Kg aproximadamente. Con este peso y un valor de diseño de  $K_f=0,72 \text{ N}/\mu\text{m}$  se espera que la deformación sea de unos  $62 \mu\text{m}$ .

## 2.4.2 MONTAJE DEL SISTEMA DE POLEAS

Una vez calibradas las pesas se procedió a armar un sistema de poleas que permitiera aplicarle carga al flexure en la dirección correcta y así medir su deformación. Se comenzó fijando una base de aluminio a la mesa de trabajo, y luego sobre esta base se colocó el flexure. Posteriormente se fijó la polea a la mesa y se controló la alineación de esta con la dirección de desplazamiento del flexure. Es muy importante que la dirección de desplazamiento del sistema flexible quede alineada con la polea para que las deformaciones se produzcan en una sola dirección.

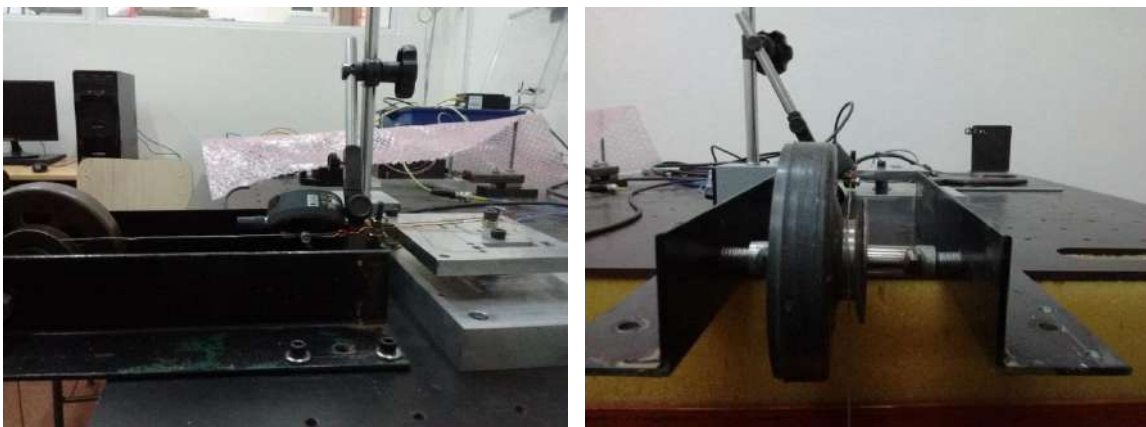


Figura 7 – Montaje y alineación del sistema para el ensayo de rigidez.

Posteriormente, terminado el montaje y la alineación, se controló que el flexure estuviera bien agarrado a la mesa para asegurar que en la prueba se midan deformaciones y no desplazamientos. Para esta comprobación se colocaron cargas sobre el sistema de poleas y se midió el desplazamiento de la parte rígida del sistema flexible. El flexure se apretó cada vez más a la mesa hasta que se logró que el desplazamiento fuera cero.

Los desplazamientos se midieron con un comparador MITUTOYO S112M. El comparador tiene una resolución de 0,001 mm (1  $\mu$ m) y una precisión de 0,003 mm (3  $\mu$ m). Se utilizó una base magnética MITUTOYO 7010-10 para fijar el comparador a la mesa de trabajo. Para medir el desplazamiento el comparador se colocó sobre la parte del flexure que permanece rígida y no se deforma como se muestra en la Figura 8. Con este mismo instrumento también se midieron las deformaciones del flexure.

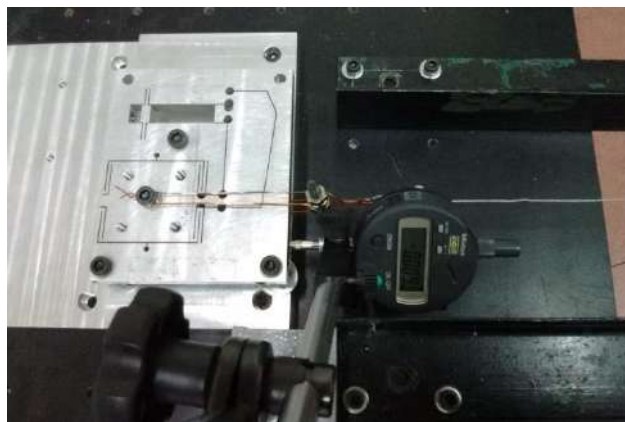


Figura 8 - Medición del desplazamiento con comparador y base magnética MITUTOYO.

### 2.4.3 ENSAYO DE RIGIDEZ

Finalizado el montaje de todo el sistema se procedió a realizar el ensayo para determinar la rigidez del flexure. Se contaba con 12 pesas calibradas que se fueron agregando una por una y se fue midiendo la deformación que producían en el flexure. Para realizar las mediciones fue necesario cambiar de posición al comparador y colocarlo sobre el área móvil de trabajo del flexure.

Antes de realizar los ensayos se realizaron una serie de pruebas para ver el funcionamiento del sistema. Se detectó que al ir agregando las pesas una por una la polea ejercía cierta resistencia y distorsionaba los valores de la deformación. Esto se corrigió volviendo la carga a cero entre pesaje y pesaje (por ejemplo, si había 2 pesas, en lugar de agregar una tercera se sacaban las 2 que ya estaban para que la carga quede en cero y luego se ponían las 3 pesas juntas).

Solucionado el problema anterior, se procedió a realizar 4 ensayos y se promediaron los resultados de los mismos. En cada uno de estos ensayos se tomaron 12 valores, uno por cada pesa que se iba agregando. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 - Datos obtenidos en los ensayos de rigidez ( $g=9.81 \text{ m/s}^2$ )

<b>Peso x prob.</b>	<b>Acum. (g)</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>Medic. 1</b>	<b>Medic. 2</b>	<b>Medic. 3</b>	<b>Medic. 4</b>	<b>Promedio</b>
0,0	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
386,2	386,2	3,789	0,003	0,002	0,003	0,005	0,003
382,6	768,8	7,542	0,008	0,007	0,009	0,009	0,008
385,6	1154,4	11,325	0,012	0,011	0,012	0,013	0,012
382,8	1537,2	15,080	0,017	0,016	0,016	0,017	0,017
382,8	1920,0	18,835	0,021	0,021	0,020	0,022	0,021
385,8	2305,8	22,620	0,025	0,026	0,024	0,026	0,025
383,5	2689,3	26,382	0,029	0,030	0,028	0,031	0,030
389,4	3078,7	30,202	0,034	0,035	0,034	0,035	0,035
383,4	3462,1	33,963	0,038	0,040	0,037	0,040	0,039
386,9	3849,0	37,759	0,043	0,045	0,042	0,044	0,044
376,4	4225,4	41,451	0,047	0,050	0,046	0,048	0,048
382,1	4607,5	45,200	0,052	0,055	0,050	0,052	0,052

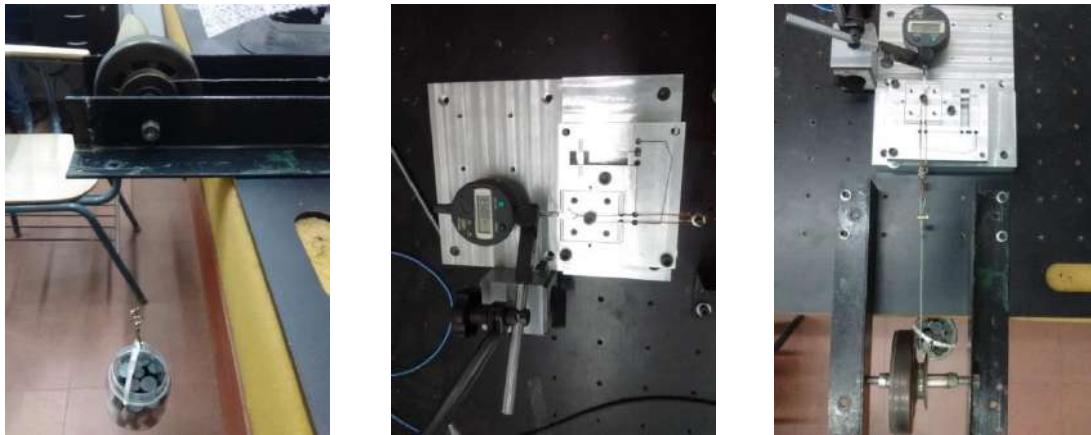


Figura 9 - Ensayo de deformación.

#### 2.4.4 CÁLCULO DE RIGIDEZ

Con la fuerza aplicada y los valores promedio de deformación es posible calcular la rigidez del sistema. Estos valores se volcaron sobre un gráfico y se aproximaron por mínimos cuadrados a una recta. Se forzó a la recta a pasar por el origen (cero deformación a cero esfuerzo). La pendiente de esta recta es el valor de la rigidez del sistema. En la Figura 10 se muestran los resultados.

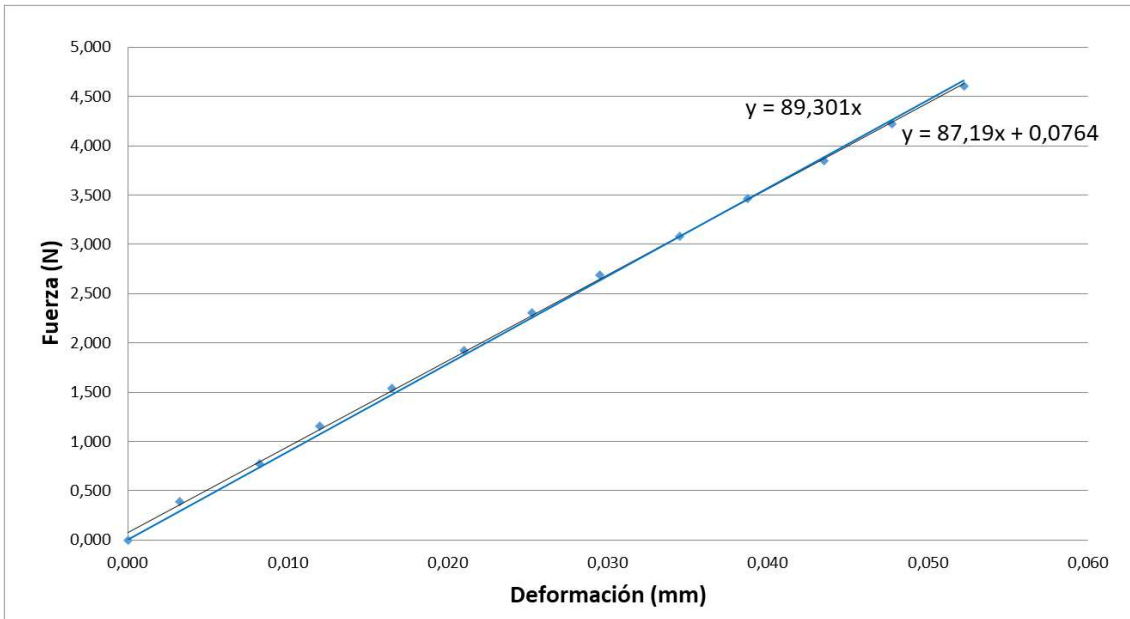


Figura 10 - Relación esfuerzo/deformación (Rigidez)

La rigidez del flexure por diseño debería ser de  $K_f=0,72 \text{ N}/\mu\text{m}$ . El presente ensayo dio por resultado que la rigidez es de  $K_f=0,87 \text{ N}/\mu\text{m}$ , un 20% superior a la del diseño.

## 2.5 VERIFICACIÓN DE LA RIGIDEZ MEDIANTE SIMULACIÓN

Con la ayuda del software Solid Works se hizo una simulación por elementos finitos para verificar la rigidez del flexure. Se aplicó una carga sobre el área móvil de trabajo de 45,2 N (Figura 11), lo que produjo un desplazamiento de 53  $\mu\text{m}$  (Figura 12 y Figura 13). Esto da por resultado una rigidez de  $K_f=0,85 \text{ N}/\mu\text{m}$ , muy aproximado a lo obtenido experimentalmente.

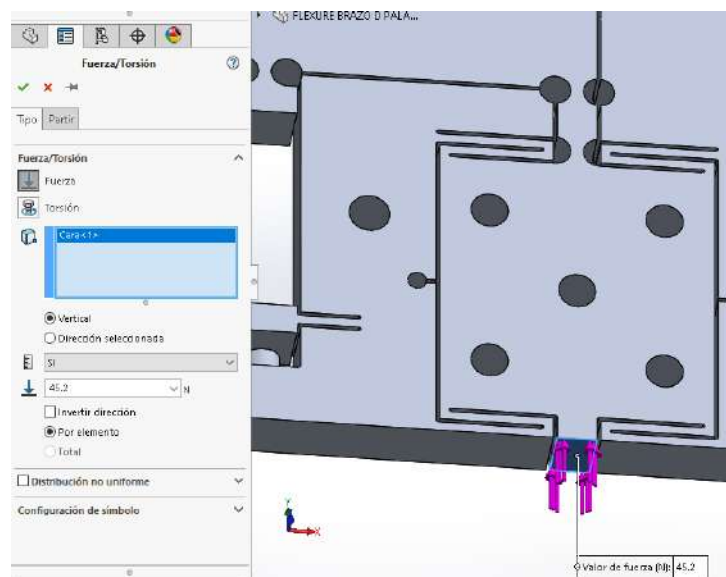


Figura 11 - Aplicación de carga al área móvil de trabajo del flexure.

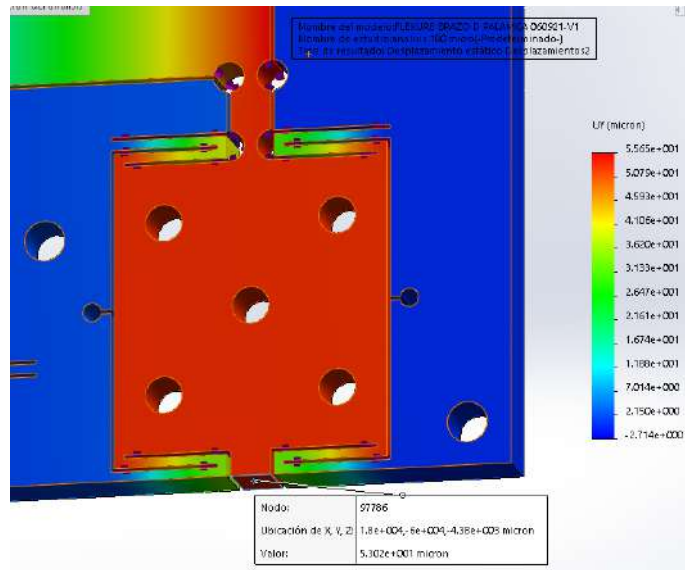


Figura 12 - Desplazamiento del área móvil de trabajo.

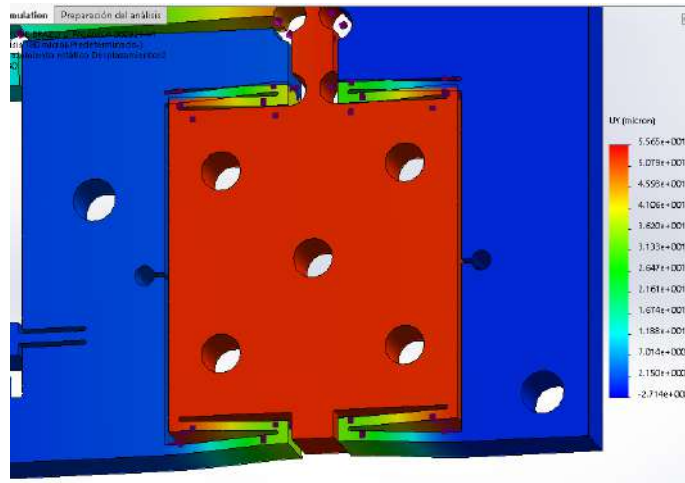


Figura 13 - Deformación del flexure stage.

## CAPÍTULO 3

# MONTAJE DE LOS ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS Y SENSORES DE POSICIÓN

Para el correcto montaje de los actuadores piezoeléctrico se deben tener en cuenta principalmente dos aspectos importantes: la alineación de los piezoeléctricos y la precarga que se les da a los mismos. La alineación es crítica porque los piezoeléctricos no soportan esfuerzos de tracción, flexión o corte, solo soportan esfuerzos de compresión. Es por esto que deben quedar perfectamente alineados con el sistema flexible. La precarga se debe hacer en simultáneo con la alineación. Además, la manipulación de los piezoeléctricos debe hacerse con mucho cuidado para que no se dañen las conexiones.

### 3.1 ALINEACIÓN DE LOS PIEZOELÉCTRICOS

Se colocarán dos piezoeléctricos del fabricante THORLABS, los modelos PK4FYC2 y PA4FEW. En la Tabla 4 se detallan las principales características de cada piezoeléctrico. El piezoeléctrico PK4FYC2 será utilizado como actuador, es decir, al aplicarle tensión se producirá una deformación que desplazará el brazo de palanca del flexure stage. Por otro lado, en el piezoeléctrico PA4FEW se medirá la diferencia de tensión que genera la deformación producida por el piezoeléctrico actuador. Con esta tensión el piezoeléctrico PA4FEW se utilizará cómo sensor de la fuerza generada por el piezoeléctrico actuador.

Tabla 4 - Características de los piezoeléctricos

Modelo	Dimensiones (mm) (ancho X ancho X largo)	Máxima deformación ( $\mu\text{m}$ )	Carga de bloqueo (N)	Rigidez ( $\text{N}/\mu\text{m}$ )
PK4FYC2	5 X 5 X 36	38,5	1000	26
PA4FEW	5 X 5 X 2	2,5	1000	400

Los piezoeléctricos deben quedar alineados tanto en el plano horizontal como en el vertical para optimizar su funcionamiento y evitar esfuerzos que puedan dañarlos. Como los espacios en donde van colocados son muy pequeños se diseñaron soportes (Figura 14 a, b y c) en los cuales se apoyan los piezoeléctricos durante el montaje y así quedar alineados. Estos soportes se hicieron con una impresora 3D del laboratorio de la Facultad.

La precarga se da durante la alineación con un tornillo que presiona a los piezoeléctricos contra el brazo de palanca del flexure. Para no dañar los piezoeléctricos se colocó un suplemento metálico para que no estén en contacto con el tornillo (Figura 14 d). Este suplemento se hizo en el taller de la Facultad a partir de una barra cuadrada de acero. La barra se cortó con sierra y se mecanizó con una rectificadora de copa para garantizar el paralelismo



entre las dos caras. Una vez alineado y con la precarga necesaria se asegura el tornillo con una contratuerca.

### 3.2 CÁLCULO DE LA PRECARGA

Como no se puede medir la presión o la fuerza que se aplica a los piezoeléctricos lo que se hace es medir la deformación que dicha carga produce en el sistema flexible de guiado. La deformación en el flexure para esa carga se calcula con la rigidez determinada anteriormente.

El fabricante de los piezoeléctricos recomienda una precarga de 15 MPa. La superficie de los piezoeléctricos es de 25 mm<sup>2</sup> (cuadrado de 5 mm de lado). Teniendo la precarga  $P$  y la superficie  $S$  se puede calcular la fuerza  $F_p$  que se debe ejercer sobre el piezoeléctrico.



Figura 14 -a) Diseño de soporte en impresora 3D. b) Soporte de piezo chico. c) Soporte de piezo grande. d) Suplemento metálico.

$$F_p = P * S = 15 \text{ Mpa} * 25 \text{ mm}^2 = 375 \text{ N} \quad (2)$$

Con la fuerza sobre el piezo y la relación geométrica de amplificación  $r$  se calcula la fuerza sobre flexure  $F_f$ . Siendo  $r = 6$ ,



$$F_F * r = F_P \rightarrow F_F = \frac{F_P}{r} = \frac{375 N}{6} = 62,5 N \quad (3)$$

Reemplazando  $F_F$  en la ecuación 1 y con el  $k_f$  hallado se calcula la deformación que se producirá en el flexure.

$$F_F = \Delta l * k_f \rightarrow \Delta l = \frac{F_F}{k_f} = \frac{62,5 N}{0,876 N/\mu m} = 71 \mu m \quad (4)$$

Es decir, se aplicará la precarga apretando el tornillo hasta que el desplazamiento del flexure sea de 71  $\mu m$ .

### 3.3 MONTAJE DE LOS PIEZOELECTRICOS Y APLICACIÓN DE LA PRECARGA

El montaje de ambos piezoeléctricos se hace conjuntamente con la precarga del sistema. Es la precarga la que hace que los piezoeléctricos queden fijos. Se decidió no utilizar ningún pegamento entre el flexure y los piezoeléctricos para que puedan usarse en otras aplicaciones o ser reemplazados por otros.

Se comenzó fijando la estructura del sistema flexible a una mesa de trabajo y se colocó el comparador MITUTOYO S112M de forma tal de poder medir el desplazamiento del flexure. La mesa de granito de la TESA Micro-Hite 3D por ser una superficie plana fue la utilizada para el montaje de los piezoeléctricos. Se analizó si era conveniente apoyar directamente el flexure sobre la mesa de trabajo o si era preferible colocar soportes calibrados entre la mesa y el flexure. Finalmente se decidió apoyarlo directamente sobre la mesa de trabajo para usarla como referencia para alinear a los piezoeléctricos. La desventaja de esta opción es que no se puede ajustar la contratuerca de la precarga.

Una vez asegurados el flexure y el comparador a la mesa se colocaron los soportes de cada piezoeléctrico y el suplemento metálico. Se fijaron 2 borneras al flexure stage para hacer las conexiones de los piezoeléctricos y sus strain gauges y reducir al mínimo la manipulación de los cables (Figura 15 a). Por último, cuando todo quedó en posición, se pusieron los piezoeléctricos sobre los soportes y se comenzó a dar la precarga. La precarga se da con un tornillo prisionero que empuja el suplemento metálico y este va presionando a los piezoeléctricos. Una vez alcanzada la deformación (precarga) deseada se le coloca al prisionero una contratuerca para que quede fijo.

Primero se colocó el suplemento metálico y el soporte del piezoeléctrico sensor (PA4FEW). Una vez que estos estaban en su posición se procedió a colocar el piezoeléctrico sensor (Figura 15 b).

Luego de varios intentos de dar la precarga y de notar que el piezoeléctrico actuador (PK4FYC2) no quedaba perfectamente alineado se detectó que el soporte del mismo se había deformado por algún problema propio del material o de su fabricación. Esto hizo que se cambie el método de montaje del piezoeléctrico actuador, en lugar de usar el soporte diseñado para eso se decidió usar galgas calibradas. Se colocaron galgas debajo del

piezoeléctrico y a los costados para que quede fijo en su posición. Su utilizaron varias galgas y se combinaron de forma tal de sumar 1,6 mm debajo del piezoeléctrico y 2,4 mm a cada costado.

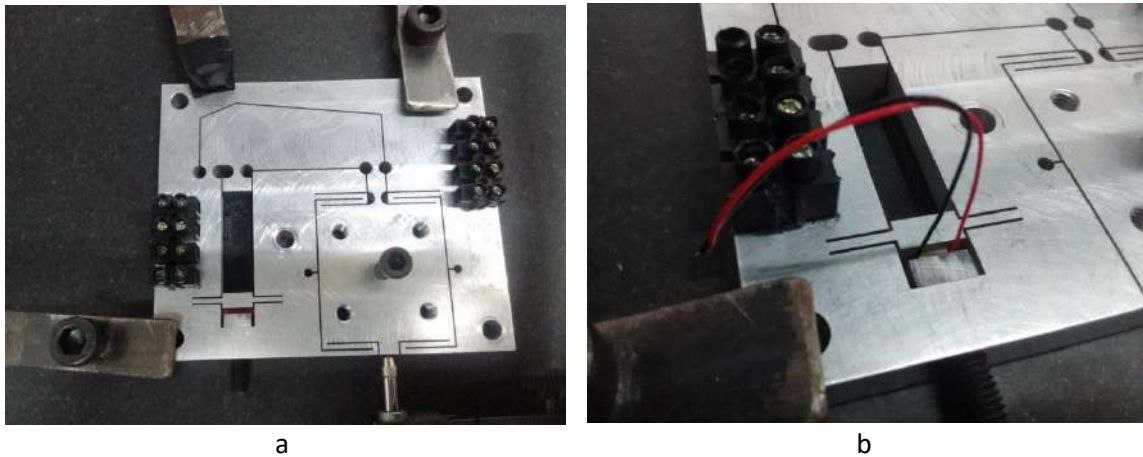


Figura 15 - a) Flexure stage con borneras fijado a la mesa de trabajo. b) Piezoeléctrico PA4FEW colocado sobre el soporte y suplemento metálico.

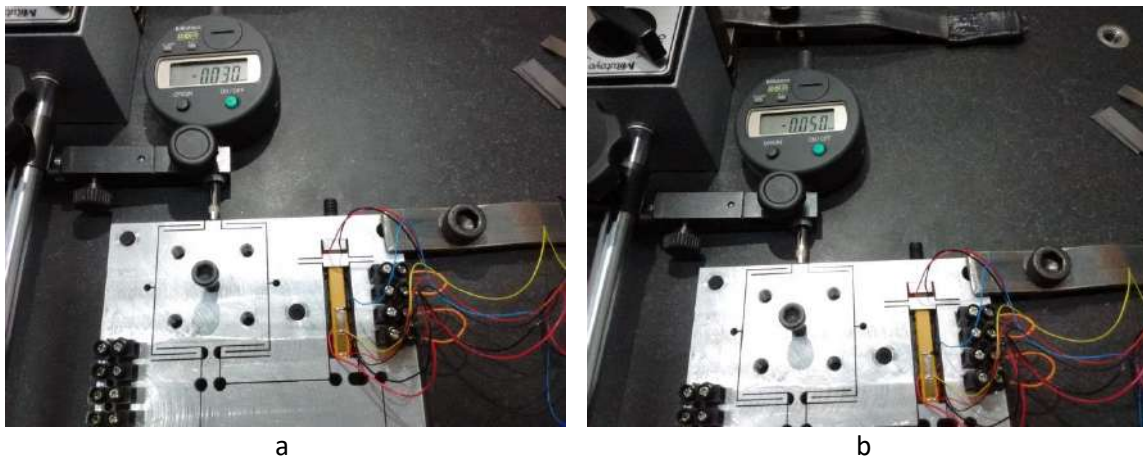


Figura 16 - a) Precarga de 30  $\mu\text{m}$ . b) Precarga de 50  $\mu\text{m}$ .

Con los piezoeléctricos fijos y alineados se procedió a dar la precarga. Se hizo en tres etapas, primero se le dio una precarga hasta que la deformación en el flexure fuera de 10  $\mu\text{m}$ , luego 30  $\mu\text{m}$ , y finalmente se llevó a una deformación de 50  $\mu\text{m}$  (Figura 16 a y b). Se decidió darle menos precarga a la recomendada por el fabricante (72  $\mu\text{m}$ ) para forzar menos a los piezoeléctricos. La precarga se hizo en dos etapas para que el flexure y los piezoeléctricos se adapten a las nuevas condiciones de trabajo sin sufrir daños.

Con 50  $\mu\text{m}$  de deformación, según la ecuación 4, la fuerza sobre el flexure sería la siguiente:

$$F_F = \Delta l * k_f \rightarrow F_F = 50 \mu\text{m} * 0,876 \text{ N}/\mu\text{m} = 43,80 \text{ N}$$

La fuerza sobre los piezoeléctricos es (ecuación 3):

$$F_F * r = F_p \rightarrow F_p = 43,80 \text{ N} * 6 = 262,80 \text{ N}$$

La precarga de los piezoeléctricos queda así (ecuación 2):

$$F_p = P * S \rightarrow P = \frac{F_p}{S} = \frac{262,80 \text{ N}}{25 \text{ mm}^2} = 10,51 \text{ Mpa}$$

El sistema tendrá una precarga de 10,5 MPa, un 30 % menor a la precarga recomendada por el fabricante de 15 MPa. Esa precarga es suficiente para que el piezoeléctrico no se vea afectado ante una contracción.

### 3.4 FIJACIÓN DE LA PRECARGA

Como se dijo anteriormente, no es posible colocar la contratuerca con el flexure apoyado sobre la mesa, por lo que se pasó el flexure a una base diseñada específicamente para este. El flexure se trasladó de la mesa a la base con mucho cuidado para que no haya variaciones en la precarga (ya que aún no estaba asegurado con la contratuerca). Posteriormente se colocó el comparador MITUTOYO S112M en posición para medir la deformación del flexure. Se espera que cuando se coloque la contratuerca la deformación disminuya y con esto la precarga (Figura 17).

Con el comparador en posición, se ajustó la contratuerca y como era de esperar la deformación disminuyó en 5  $\mu\text{m}$ , es decir que ahora la precarga sería de 45  $\mu\text{m}$ . A continuación se sacó la contratuerca y se le dio al sistema 5  $\mu\text{m}$  más de deformación, llevándolo hasta 55  $\mu\text{m}$ . De este modo, al volver a ajustar la contratuerca la precarga queda en 50  $\mu\text{m}$ .



Figura 17 - Flexure fijado a la base con contratuerca y comparador para medir la precarga.

### 3.5 SENSOR DE POSICIÓN

Para medir los desplazamientos del flexure stage se utilizará un sensor capacitivo del fabricante PI modelo D-510.051 (Figura 18). Este sensor tiene un rango de medición de 50  $\mu\text{m}$  y resolución de 1 nm.



Figura 18 - Sensor capacitivo D-510.051.

Para una correcta medición el fabricante recomienda que la superficie contra la cual mide el sensor debe ser al menos un 50% mayor que la superficie activa del mismo. La alternativa de colocar el sensor contra la parte móvil del flexure donde se coloca el comparador no es viable porque esa superficie es menor al tamaño mínimo recomendado por el fabricante.

Fue necesario diseñar un suplemento metálico para atornillar al cuerpo del flexure con una superficie lo suficientemente grande para que el sensor mida correctamente. Además se diseñó un soporte para el sensor que se fija junto con el flexure. Al suplemento metálico sobre el que mide el sensor se lo diseño de manera tal que se pueda colocar un medidor láser sobre él (Figura 19). Es fundamental mantener el paralelismo entre el sensor y la superficie de medición. Se debe controlar esto en la fabricación de las dos piezas y en el montaje del sensor.

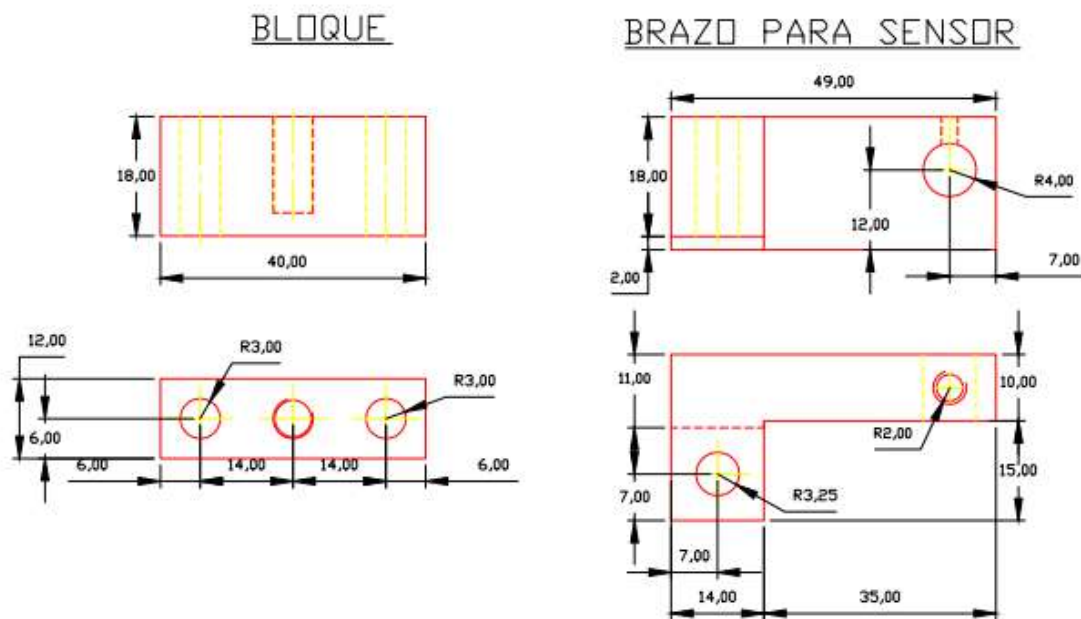


Figura 19 - Diseño de bloque y soporte de sensor.

Por cuestiones de tiempo estas dos piezas no se enviaron a fabricar, por lo que se descartó la medición con el sensor capacitivo. Las mediciones se realizarán con un comparador Mitutoyo modelo LGF-125L (Figura 20). Este comparador tiene un rango de medición de 25 mm, una resolución de 0,5  $\mu\text{m}$ , y un error máximo de 2  $\mu\text{m}$ .



Figura 20 - Comparador Mitutoyo LGF-125L

## CAPÍTULO 4

# EXPERIMENTACIÓN

Finalizado el montaje se realizaron experimentaciones aplicando tensión en el piezoeléctrico actuador y midiendo los desplazamientos en el flexure stage. También se calcularon los resultados teóricos esperados y se los compararon con los obtenidos en el ensayo.

Además se realizó la simulación por elementos finitos del ensayo para determinar las deformaciones y compararlas con las reales.

### 4.1 INTRODUCCIÓN AL ENSAYO

El piezoeléctrico actuador tiene un máximo desplazamiento en vacío de  $38,5 \mu\text{m}$ , a esa magnitud se la denomina  $\Delta L_0$ . Cuando el piezoeléctrico actúa contra una carga de rigidez conocida  $K_f$  (Figura 21 a), el desplazamiento se reduce mediante la siguiente ecuación [4]:

$$\Delta L_p = \Delta L_0 * \left( \frac{K_p}{K_p + K_f} \right) \quad (5)$$

Donde,

$\Delta L_p =$  Desplazamiento efectivo

$\Delta L_0 =$  Desplazamiento en vacío

$K_p =$  Rigidez del piezoeléctrico

$K_f =$  Carga de rigidez conocida

En este ensayo, el piezoeléctrico no actúa directamente sobre una carga, sino contra un brazo de palanca que amplifica el desplazamiento como se muestra en la Figura 21 b. El piezoeléctrico ejercerá una fuerza  $F$  sobre el vínculo rotacional B que hará rotar el brazo de palanca sobre el vínculo rotacional A, aumentando el recorrido del punto C.

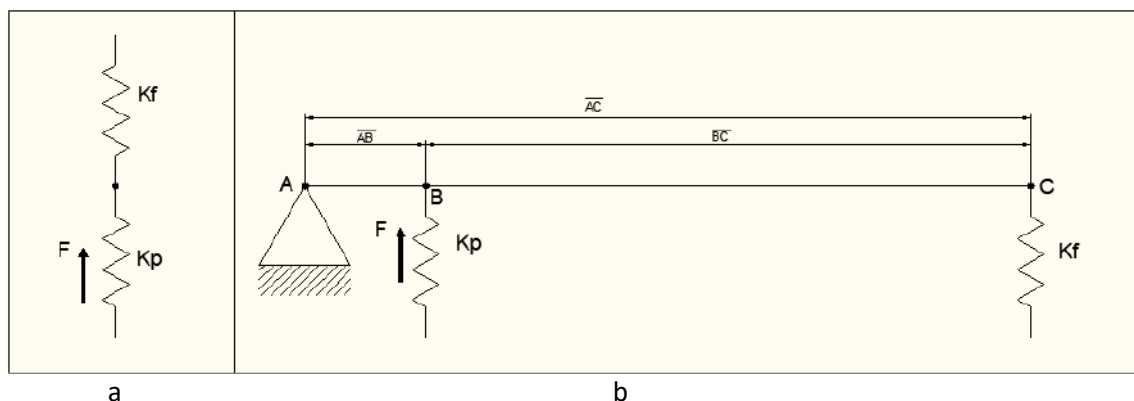


Figura 21 - a) Piezoeléctrico actuando directamente sobre una carga. b) Piezoeléctrico actuando sobre brazo de palanca.

Este aumento de desplazamiento producido por el brazo de palanca se denomina relación geométrica de amplificación y se lo identifica con la letra  $r$ , siendo:

$$r = \frac{AC}{AB}$$

Donde  $AC$  es la distancia entre los vínculos A y C, y  $AB$  es la distancia entre A y B. En el presente sistema de brazo de palanca la relación geométrica de amplificación es  $r = 6$ .

Teniendo en cuenta la relación de los desplazamientos de los puntos B y C en su rotación sobre el punto A, la fuerza que aplica el piezoeléctrico, la resistencia que ejerce el área móvil de trabajo del flexure stage, y planteando el equilibrio de momentos, se obtiene que [4]:

$$\Delta B = \Delta L_0 * \left( \frac{K_p}{K_p + K_f * r^2} \right) \quad (6)$$

Siendo  $\Delta B$  el desplazamiento del punto B, es decir, del piezoeléctrico.

El desplazamiento  $\Delta L_0$  depende linealmente de la tensión aplicada al piezoeléctrico. El máximo desplazamiento de  $38,5 \mu m$  se produce a la máxima tensión de 150 V. Por precaución se aplicará una tensión de 100 V y por lo tanto el nuevo  $\Delta L_0 = 25,7 \mu m$ .

Con el nuevo máximo desplazamiento, la relación geométrica de amplificación, la rigidez del piezoeléctrico y del flexure stage, y reemplazando todo en la ecuación 6, se obtiene que  $\Delta B = 11,6 \mu m$ . El brazo de palanca amplificará el desplazamiento en el punto C de esta manera:

$$\Delta C = \Delta B * r = 69,8 \mu m$$

Es decir que el área móvil de trabajo se desplazará  $69,8 \mu m$  a una tensión de 100V. De esta manera la amplificación real del sistema  $R$  será la siguiente [4]:

$$R = \frac{\Delta C}{\Delta L_0} = \frac{69,8}{25,7} = 2,72$$

## 4.2 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

El ensayo consistió en aplicarle tensión al piezoeléctrico actuador y medir el desplazamiento producido en el área móvil de trabajo del flexure stage. La tensión máxima utilizada fue de 100 V y se aplicó de forma escalonada, en cinco escalones de 20 V cada uno. El desplazamiento se midió con un comparador Mitutoyo LGF-125L. En la Figura 22 se observa el sistema completo preparado para realizar los ensayos.

En las pruebas se midieron la tensión en los strain-gauges del piezoeléctrico actuador, la fuerza en el piezoeléctrico sensor y el desplazamiento del área móvil de trabajo del flexure stage.



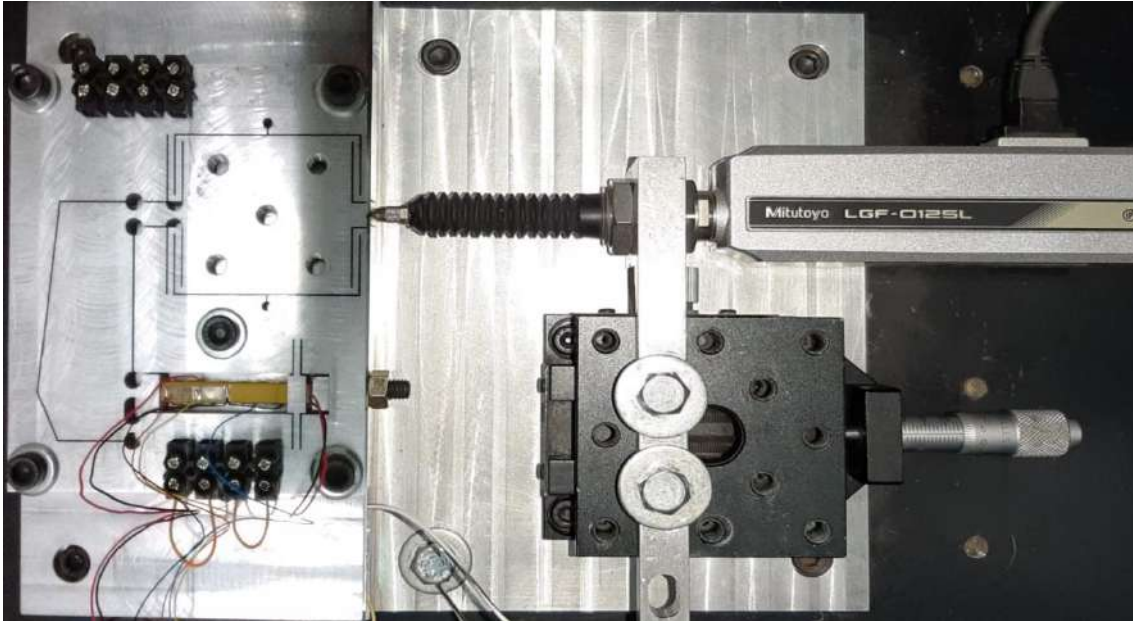


Figura 22 – Ensayo de medición

La tensión en los strain-gauges está directamente relacionada con la deformación del piezoeléctrico actuador y con el desplazamiento del área móvil de trabajo. Con esto es posible realizar una calibración y medir el desplazamiento del área móvil de trabajo con los strain-gauges sin necesidad de utilizar un comparador o un sensor capacitivo.

En la Figura 23 se observan los escalones de tensión (escala de 1:10) aplicados al piezoeléctrico actuador. En la Figura 24 se muestra la tensión medida en los strain-gauges.

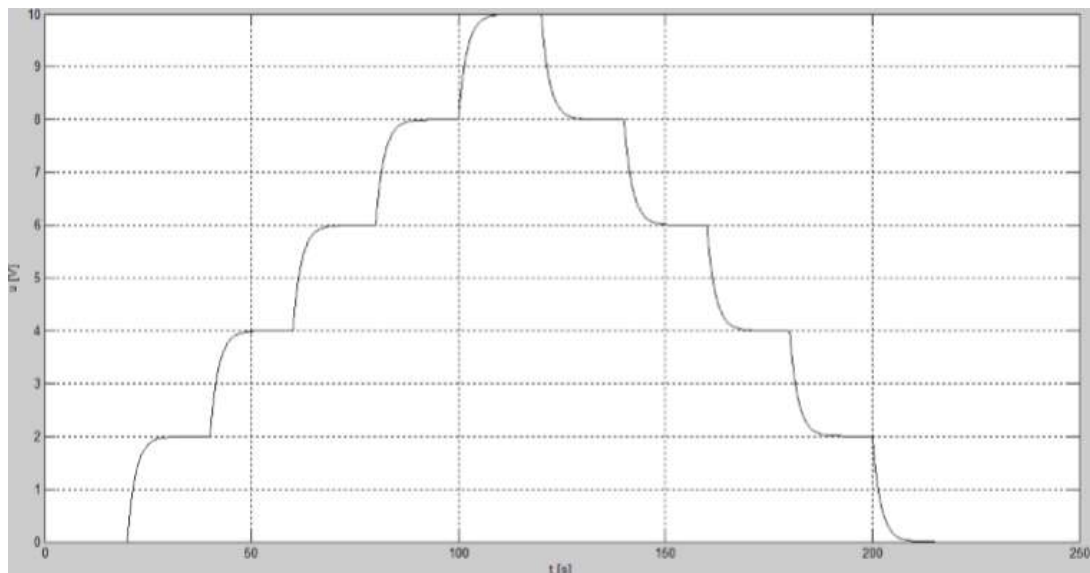
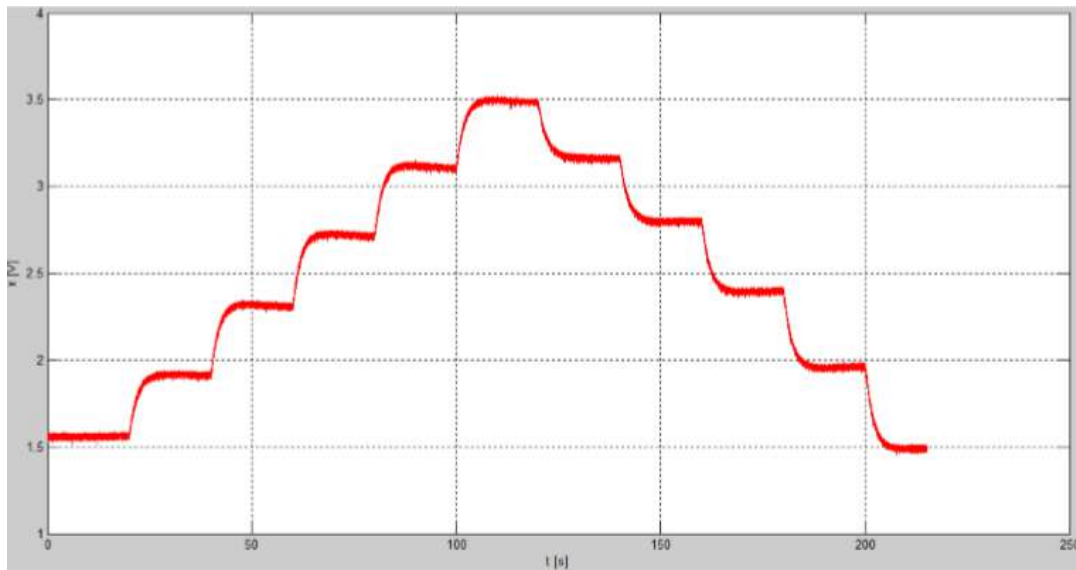


Figura 23 - Tensión aplicada en función del tiempo (la tensión está en escala 1:10).

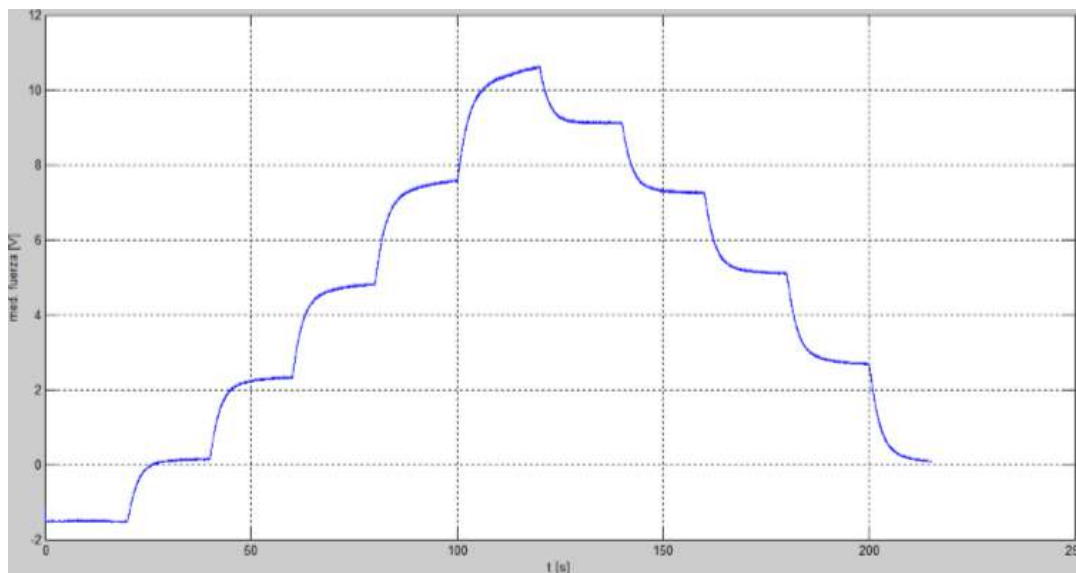




**Figura 24 - Tensión en los strain-gauges del piezoeléctrico (PK4FYC2).**

En la Figura 25 se observa la fuerza obtenida en el piezoeléctrico sensor. En este piezoeléctrico se mide en realidad la tensión. Con la tensión es posible conocer la deformación del mismo, y como la rigidez es conocida, se puede determinar la fuerza a la que está sometido.

La Figura 26 indica el desplazamiento del área móvil de trabajo del flexure stage. Aquí se observa que el máximo desplazamiento logrado en el área móvil de trabajo fue de 45  $\mu\text{m}$ .



**Figura 25 - Fuerza aplicada según el piezoeléctrico PA4FEW.**



Figura 26 - Desplazamiento del área móvil de trabajo del flexure stage.

### 4.3 SIMULACIÓN

Para corroborar los resultados obtenidos experimentalmente y poder encontrar explicaciones a las diferencias con el modelo teórico se realizó la simulación por computadora [1] a través del método de cálculo por elementos finitos. Lo primero que se hizo fue verificar y cargar al sistema las medidas y propiedades de los piezoeléctricos. Se le dio una precarga al piezoeléctrico sensor de 62,5 N.

El piezoeléctrico actuador tiene una carga de bloqueo de 1000 N a 150 V. Como en la experimentación solo se aplicó una tensión de 100 V, la carga aplicada en la simulación fue de 666,66 N, proporcional a la tensión del ensayo.

La simulación dio por resultado un desplazamiento en la base del área móvil de trabajo del flexure de 42,7  $\mu\text{m}$ , muy aproximado a los 45  $\mu\text{m}$  del ensayo. También se observa un desplazamiento hacia atrás (en el sentido opuesto a la actuación) del tornillo de la precarga de 3,55  $\mu\text{m}$  (Figura 27).

Además, de la simulación se obtiene que el máximo desplazamiento en una sección del área móvil de trabajo fue de 45  $\mu\text{m}$ , superior a la observada en la base. Esto quiere decir que el brazo de palanca y el área móvil de trabajo no actúan como un sistema rígido, sino que sufren pequeñas deformaciones. En la Figura 28 se muestran las deformaciones de la simulación amplificadas en una escala de 30:1.

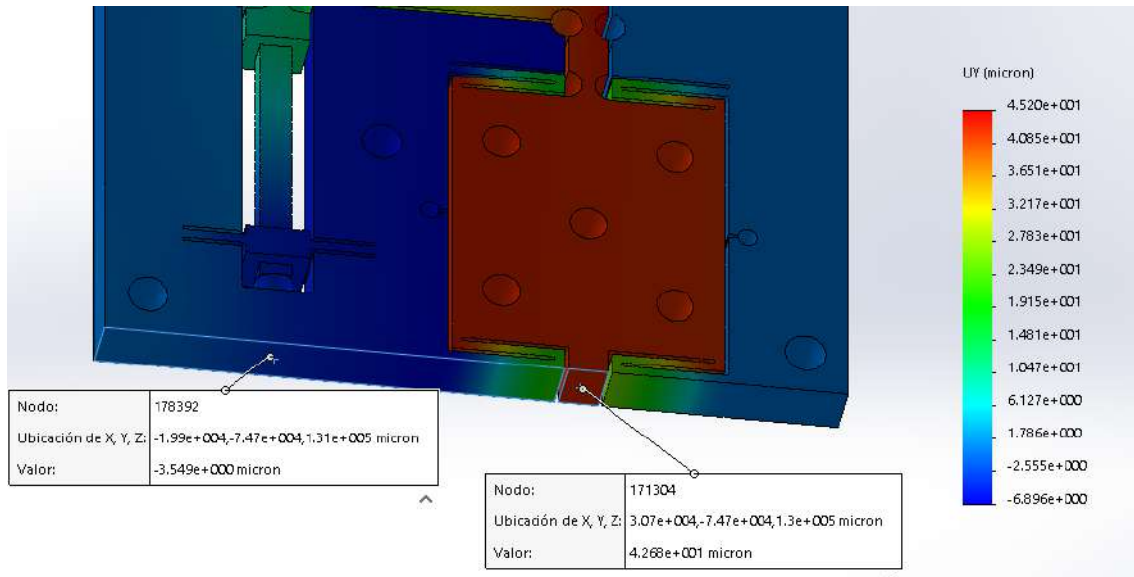


Figura 27 - Resultado de la simulación.

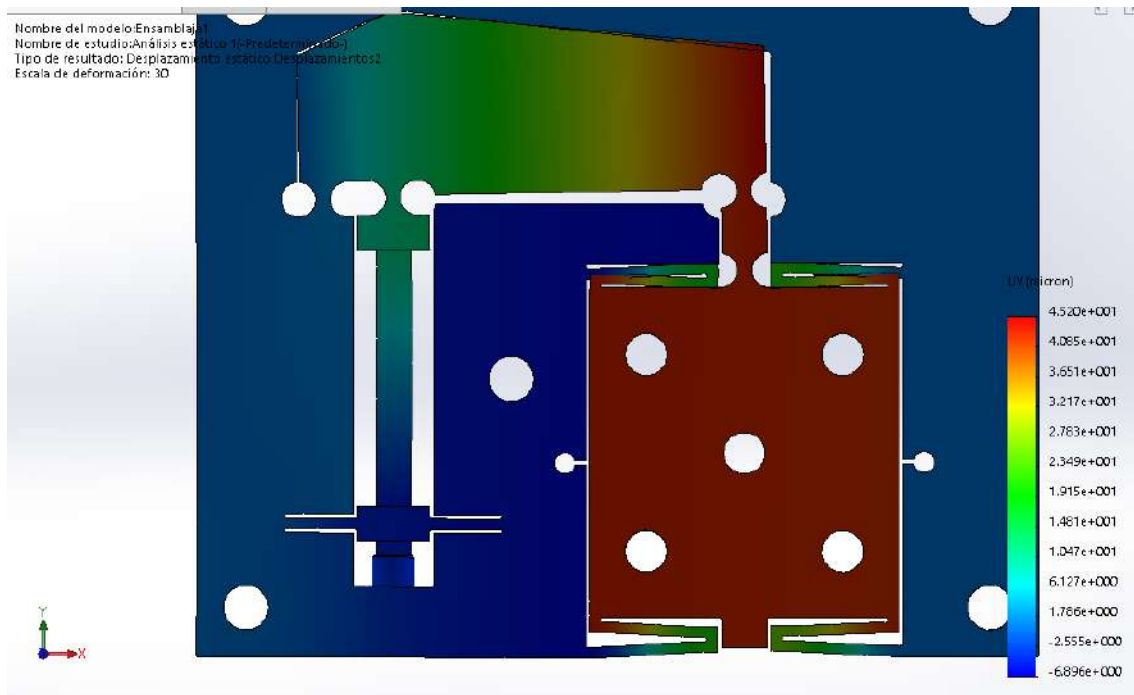


Figura 28 - Deformación de la simulación en escala 30:1.

## 4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El ensayo tuvo como resultado un desplazamiento del área móvil de trabajo de 45  $\mu\text{m}$  cuando se esperaba que fuera de aproximadamente 70  $\mu\text{m}$ . Es decir que se desplazó solamente un 65% en relación a lo esperado. Por su parte, en la simulación se produjo un desplazamiento del área móvil de trabajo de 42,7  $\mu\text{m}$ , muy parecido a lo obtenido en el ensayo.

Esta diferencia de desplazamiento se explica en gran medida a dos factores: el desplazamiento hacia atrás del piezoeléctrico debido a la baja rigidez del sistema de precarga, considerado

rígido en el modelo analítico (Figura 16 y Figura 17); y la deformación de los vínculos articulares B y C (Figura 1).

En primer lugar, como se observó en la simulación, el tornillo de la precarga se desplazó en el sentido opuesto a la actuación del piezoeléctrico  $3,55 \mu\text{m}$  (este sería el desplazamiento del piezoeléctrico en el sentido opuesto a la actuación pero medido en el tornillo). Este corrimiento hacia atrás de la precarga hace que la expansión del piezoeléctrico se produzca en las dos direcciones: en la dirección de la actuación, moviendo el brazo de palanca; y en la dirección contraria por falta de rigidez de la precarga, reduciendo el movimiento del brazo de palanca. Es decir, el movimiento en la dirección contraria a la actuación genera un menor desplazamiento del brazo de palanca y en el área móvil de trabajo (amplificado por la relación geométrica  $r = 6$ ). Es decir, se reduce el desplazamiento del área móvil de trabajo en  $21,3 \mu\text{m}$ .

El segundo factor que influye en las diferencias entre el ensayo y el resultado teórico esperado es la deformación de los vínculos articulares. El vínculo B sufrió un esfuerzo de compresión producto de la fuerza ejercida por el piezoeléctrico. La compresión del vínculo B generó un menor desplazamiento del brazo de palanca. A su vez, el movimiento del brazo de palanca produjo un esfuerzo de tracción y con esto un alargamiento del vínculo C. Esta deformación del vínculo C hace que el brazo de palanca no pueda transmitir el desplazamiento en su totalidad al área móvil de trabajo. Ambas deformaciones en los vínculos articulares influyen conjuntamente para un menor desplazamiento del área móvil de trabajo [5].

Otro punto que no se tuvo en cuenta fue la deformación del piezoeléctrico sensor. A pesar de tener una rigidez 15 veces mayor que la del piezoeléctrico actuador, sufrirá una deformación de aproximadamente  $0,8 \mu\text{m}$ . Esta deformación se traducirá en un menor movimiento del brazo de palanca y se amplificará en el área móvil de trabajo, disminuyendo el desplazamiento real en  $5 \mu\text{m}$  aproximadamente ( $r = 6$ ).

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el montaje y puesta en funcionamiento de un posicionador nanométrico con amplificación de recorrido.

El trabajo se comenzó realizando el control dimensional del flexure stage y se verificó que las dimensiones se encontraban dentro de los valores de diseño. Los valores de las principales secciones medidas se encontraban dentro de tolerancia.

Se realizó un ensayo para medir la rigidez del flexure stage y compararlo con el valor teórico de diseño. El resultado del ensayo fue que la rigidez era mayor a la de diseño. Este dato fue corroborado mediante simulación en computadora, que dio una rigidez muy parecida a la del ensayo.

Se realizó el montaje de los piezoeléctricos y su precarga. Para el montaje se utilizaron soportes diseñados exclusivamente para esto, de forma tal de lograr que los piezoeléctricos queden correctamente alineados. Se dio una precarga menor a la recomendada por el fabricante para no generar demasiada presión en los piezoeléctricos.

Luego del montaje se realizaron ensayos para verificar el funcionamiento del sistema. Estos ensayos arrojaron una diferencia significativa entre el desplazamiento del modelo analítico y el real. Según el modelo analítico se esperaba un desplazamiento del área móvil de trabajo del flexure stage de 70  $\mu\text{m}$ , mientras que el ensayo dio una deformación real de 45  $\mu\text{m}$ . Se concluyó que estas diferencias se deben principalmente a dos factores: la falta de rigidez en la base de apoyo del piezoeléctrico; y a la deformación de los vínculos articulares.

Estos resultados se compararon con una simulación realizada a través del método de cálculo por elementos finitos que arrojó un desplazamiento de 42,7  $\mu\text{m}$ , similar a lo obtenido en el ensayo real. Mediante la simulación también se pudo comprobar que las diferencias se debían principalmente a los dos motivos mencionados anteriormente.

Finalmente, tomando una deformación de 25,7  $\mu\text{m}$  del piezoeléctrico a 100 V y una deformación en el área móvil de trabajo del flexure stage de 45  $\mu\text{m}$ , se tiene que la relación real de amplificación del sistema de brazo-palanca es de  $R_{ensayo} = 1,75$ . Comparado con la amplificación real teórica  $R_{teórica} = 2,72$ , el ensayo logró un 65% del desplazamiento esperado.

# REFERENCIAS

- [1] Nesprías F., Venturino M., Debray M., Davidson J., Davidson M., Kreiner A., Minsky D., Fischer M., y Lamagna A. Heavy ion beam micromachining on linbo3, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 267(1):69 – 73, 2009. ISSN 0168-583X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.10.083>.
- [2] Bottero F., Pucheta M., y Schurrer C. Diseño de un flexor de precisión para un dispositivo generador de ángulos pequeños para aplicaciones de calibración en metrología, ENIEF 2016 - XXII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, 34(39):2559 – 2714, 2016.
- [3] Changhai Ru, Xinyu Liu, Yu Sun, Nanopositioning Technologies: Fundamentals and Applications, ISBN 978-3-319-23853-1, DOI 10.1007/978-3-319-23853-1, Springer International Publishing, 2016.
- [4] Flores, Gustavo; Ramirez, Pablo; Lamas, Lucas y Hecker, Rogelio, Diseño de un posicionador nanométrico con amplificación de recorrido. VI Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, VI CAIM 2018, Tucumán, Argentina, Oct. 2018.
- [5] Gustavo M. Flores, Luis P. Ramirez, Lucas I. Lamas, Rogelio L. Hecker, Estudio Preliminar de un Posicionador Nanométrico con Brazo de Palanca. XII Congreso Argentino de Mecánica Computacional, MECOM 2018, Tucumán, Argentina, Nov. 2018.
- [6] TESA Micro-Hite 3D Software Manual.

## ANEXO 1

# CONTROL DIMENSIONAL

Nombre de la pieza:	FLEXURE		Cantidad:	1
Nº de plano/s:	2		Posición:	
OT:	Componente:			

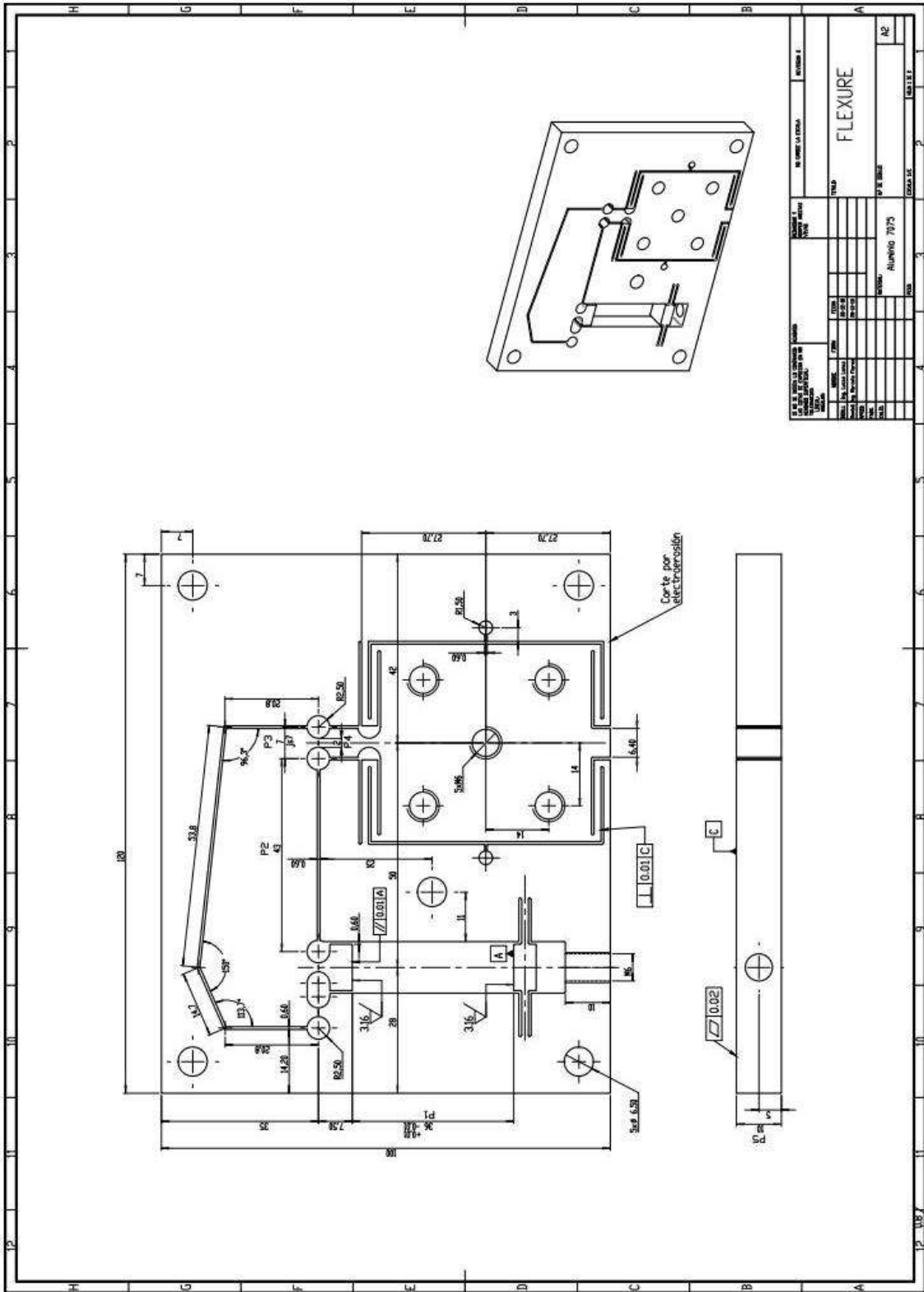
Dimensión	Dimensiones por plano (mm)		Resultados (mm)					
	Min.	Max.	PN°1	PN°2	PN°3	PN°4	Promedio	Verifica
A1	6,993	7,007	6,998	6,999	6,996		6,998	SI
A2	2,995	3,005	2,991	2,992	3,001		2,995	SI
A3	6,993	7,007	7,009	7,005	7,003		7,006	SI
A4	1,995	2,005	2,011	2,011	2,008		2,010	NO
A5	1,995	2,005	2,017	2,014	2,008		2,013	NO
B1	18,195	18,205	18,22				18,220	NO
B2	17,295	17,305	17,24				17,240	NO
B3	1,495	1,505	1,51	1,53	1,5	1,5	1,520	NO
B4	1,495	1,505	1,53	1,54	1,5	1,5	1,535	NO
C1	1,480	1,520	1,53	1,54	1,5	1,5	1,535	NO
C2	10,280	10,320	10,27	10,29			10,280	SI
C3	4,995	5,005	5,05		5		5,050	SI
D1	18,195	18,205	18,21				18,210	NO
D2	17,295	17,305	17,27				17,270	NO
D3	1,495	1,505	1,53	1,52	1,5	1,5	1,525	NO
D4	1,495	1,505	1,57	1,58	1,5	1,5	1,575	NO
P1	35,990	36,010	35,994	35,998	36,003		35,998	SI
P1 (paralelismo)		0,010	0,001	0,001	0,003		0,002	SI
P2	42,088	43,012	42,992	42,995	42,998		42,995	SI
P3	6,993	7,007	6,983	6,991	6,985		6,986	NO
P4	1,995	2,005	2,005	2,007	1,999		2,004	SI
P5	9,993	10,007	10,084	10,098	10,092		10,091	NO
P5 (paralelismo)		0,020	0	0	0		0,000	SI
Observaciones:								

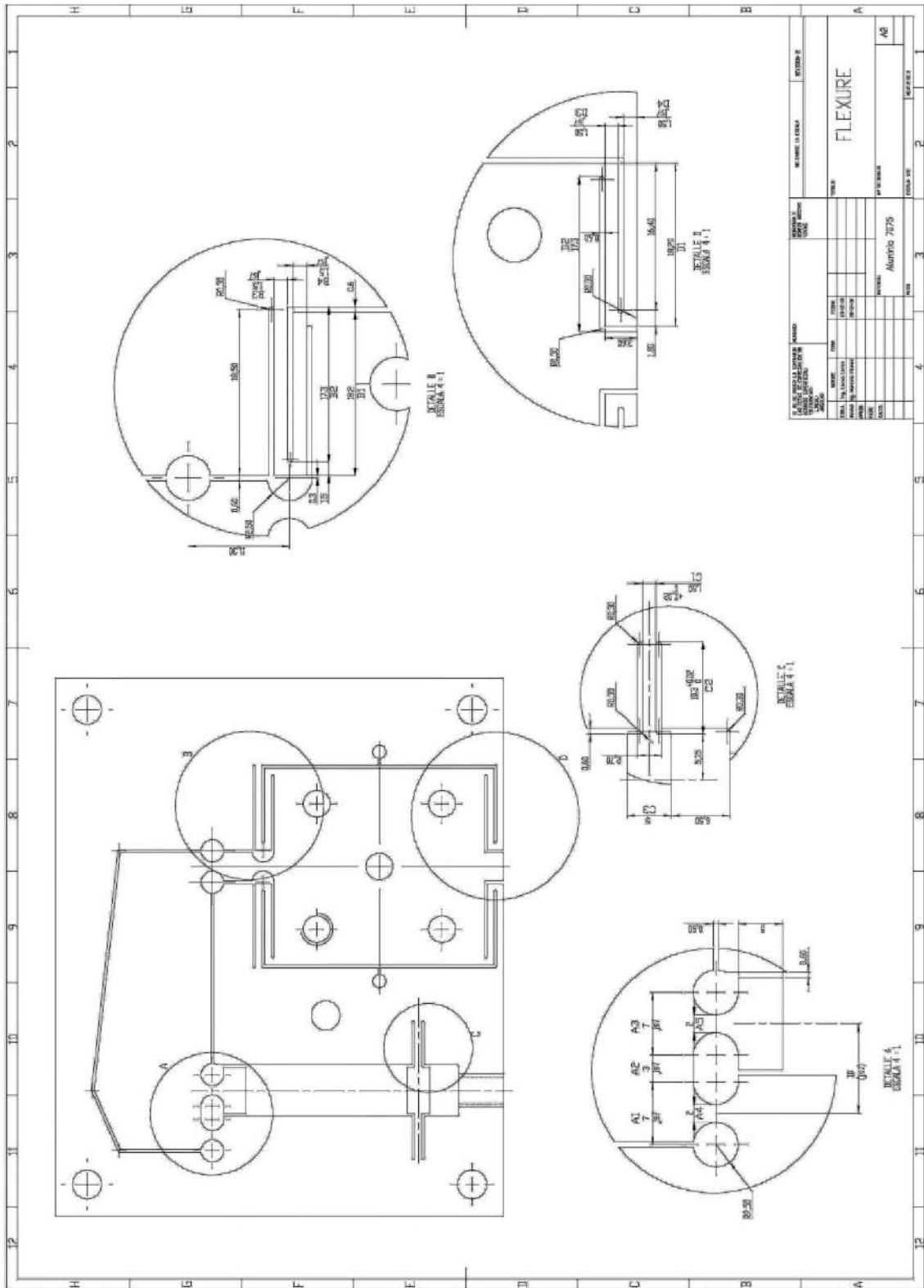
CONTROL DE CALIDAD				JEFE DE FABRICACIÓN				RESP. DE INGENIERÍA			
APROBADO	SI	NO	FECHA:	REPARA	SI	NO	FECHA:	APROBADO	SI	NO	FECHA:
FIRMA:				FIRMA:				FIRMA:			

ANEXO 2

# PLANOS







AUTORIA		REVISÃO		APROVAÇÃO	
NOME	DATA	NOME	DATA	NOME	DATA
ALUNO	DATA	PROFESSOR	DATA	COORDENADOR	DATA
NOME DO ALUNO		NOME DO PROFESSOR		NOME DO COORDENADOR	
NÚMERO DO ALUNO		NÚMERO DO PROFESSOR		NÚMERO DO COORDENADOR	
TURMA		DISCIPLINA		MATERIAL	
TÍTULO		NÚMERO DE FOLHAS		NÚMERO DE FOLHAS	
AUTORIA		REVISÃO		APROVAÇÃO	
Aluno: 7075		Aluno: 7075		Aluno: 7075	
DATA: 14		DATA: 14		DATA: 14	
FOLHAS: 2		FOLHAS: 2		FOLHAS: 2	
TÍTULO: FLEXURE		TÍTULO: FLEXURE		TÍTULO: FLEXURE	