



Facultad de
Ingeniería
Universidad Nacional de Mar del Plata

Análisis de funcionamiento y optimización de máquina de ensayos de fretting- corrosion

CARRERA: Ingeniería Mecánica

AUTORES: Miramont, Marcos

Sosa Salas, Esteban Ezequiel

TUTORES: Escalada, Lisandro

Sosa, Daniel Amadeo

JURADOS: Arenas, Gustavo

Colombo, Diego

Martínez Gamba, Matías



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo pudo ser realizado gracias a personas muy importantes en nuestras vidas como ser familiares: porque festejaron buenos momentos, fueron pilares de apoyo en los malos, fueron sponsors a lo largo de nuestra carrera, ayudando a nunca darnos por vencido y siempre salir adelante; amigos: son los encargados de hacer todo más divertido y menos complicado, siempre bancando en las malas y alentando, poniéndose al lado de uno para ver cómo ayudarte, y siempre listos para poner un tinte cómico a cualquier situación; profesores: a los que dejan el alma por enseñar sus conocimientos y sabiduría y lo hacen con una sonrisa en la cara, haciendo mención especial al Dr Daniel Amadeo Sosa, por cumplir con todas las expectativas como profesor, y tranquilamente podríamos haberle agradecido en el apartado de “amigos”; a todas las personas especiales que fueron de gran ayuda para que este trabajo pueda ser realizado, y lo hicieron con toda la buena voluntad y predisposición que se puede esperar: no podemos dejar de nombrar a Lisandro Escalada, alguien que conocimos para este proyecto pero es como si hubiera estado en toda la carrera, a Gustavo Arenas, por brindar su experiencia en ámbitos en los que nosotros no tenemos.

Simplemente... ¡Muchas gracias!

INDICE

Resumen	6
Conceptos básicos necesarios para rediseñar y modificar una máquina de ensayos de fretting-corrosion	8
Introducción	8
Antecedentes	8
Fretting	9
Régimen de fretting	11
Corrosión	13
Fretting-Corrosion	15
Máquinas existentes de ensayos de fretting-corrosion	16
Sensores	19
Sensor de tipo “Y”	20
Origen y motivación	24
Objetivos	26
Análisis y pruebas de funcionamiento del diseño anterior	27
Análisis de funcionamiento y diseño	27
Funcionamiento general	27
Estado de componentes	28
Análisis de resultados	33
Búsqueda bibliográfica sobre máquinas comerciales	38
Optimización	45
Propuesta de cambios	45
	3

Modelo anterior	45
Modelo brazo pivotante	48
Modelo Cantilever	49
Verificación del funcionamiento del software inventor	50
Modelo con viga simple	51
Modelo complejo	55
Modelo en T	62
Modelo complejo	63
Comparación entre modelos	63
Relación entre desplazamiento de la punta y la carga	64
Sistema de carga	68
Sensores	71
Soporte tope micrométrico	75
Soporte de sensores	76
Porta-esferas	79
Fabricación y compra de componentes	81
Cantilever	81
Guías superiores	85
Guías inferiores	87
Varillas	88
Bujes	89
Tuercas	90
Sensores	92
Soporte para sensores	97

Tope micrométrico	98
Soporte para tope micrométrico	98
Porta-esferas	99
Esferas de contacto	99
Ensamble	101
Sensores	101
Máquina final	103
Trabajos futuros	109
Conclusiones	110
Bibliografía	111
ANEXO 1	112
Planos de fabricación de componentes estructurales	112
ANEXO 2	113
Manual de operación y mantenimiento	113

Resumen

El estudio del desgaste producido por la acción sinérgica del fretting y la corrosión es de gran importancia en la industria en la actualidad. Esto se debe a que este mecanismo de daño aparece en la mayoría de las máquinas con motores o bien donde se producen vibraciones, afectando a conjuntos de piezas que no deberían presentar movimiento relativo entre sí.

En el mercado se puede encontrar equipos de ensayos de fretting (comúnmente llamados tribómetros), a los que se les puede hacer adaptaciones para someter las probetas a un ambiente corrosivo. Las marcas Nanovea, Anton Paar, son proveedores de las mismas y, como es de esperarse, los costos resultan elevados.

Debido a esto, se contempló la posibilidad de poner en valor una máquina de ensayos de fretting - corrosión existente en el laboratorio IIBio del INTEMA fabricada por un estudiante de la Facultad de Ingeniería UNMdP en su proyecto final. Para esto, fue necesario analizar su funcionamiento y, a continuación, actualizar la misma, mediante una serie de optimizaciones realizadas en este proyecto.

Se trabajó en la mejora del sistema de carga, para lo cual se evaluaron diversas alternativas basadas en la modificación del funcionamiento de la máquina inicial, o bien en el diseño de esta. Para eso, se simuló el comportamiento de las distintas opciones, mediante el software Autodesk Inventor y se verificó la respuesta del sistema a las posibles solicitaciones que podría tener en funcionamiento. Esto permitió realizar la selección de un sistema de doble cantilever, opción que optimizaría el costo, tiempo y funcionalidad requerida.

Adicionalmente, se fabricaron dos sensores láser de desplazamiento, y se calibraron para poder registrar los desplazamientos horizontales y verticales que tiene la punta del sistema de carga. Esto permitirá al usar el dispositivo final, la posibilidad de realizar ensayos cuyos resultados sean repetitivos y trazables a otros equipos similares.

Se mecanizaron las piezas necesarias para el ensamblado completo. Se realizó dicho ensamblado y se generó un manual de armado y uso, que facilitará la utilización

de la máquina actualizada para la evaluación del daño por fretting-desgaste y corrosión simultáneamente.

Para concluir la máquina se instaló en el laboratorio IIBio de INTEMA y se puso en funcionamiento, a la espera de que la situación permita utilizarla para realizar pruebas de funcionamiento y ensayos en muestras, siendo esta una tarea futura que excede el alcance de este trabajo final.

Conceptos básicos necesarios para rediseñar y modificar una máquina de ensayos de fretting-corrosion

Introducción

Antecedentes

El movimiento relativo oscilatorio microscópico de alta frecuencia (sin desplazamiento macroscópico) y el daño asociado al mismo fue reportado por primera vez en el año 1911, y posteriormente denominado “fretting” en 1927.

En piezas que no deberían tener movimiento relativo entre sí, como pueden ser elementos montados a presión mediante un ajuste por interferencia, se da esta condición de funcionamiento.

Con la aparición de las primeras máquinas para realizar ensayos que simulaban estas condiciones de funcionamiento, se descubrió el efecto del fretting en conjunto con otros mecanismos, como ser fatiga, corrosión, etc. Hoy en día se sabe que la vida a la fatiga de los elementos mecánicos se ve gravemente afectada cuando hay presencia de fretting y disminuye de forma drástica. Para el caso de fretting-corrosión ocurre un efecto sinérgico que es mayor a los que provocan cada uno por separado.

Para sólidos en contacto bajo movimientos relativos de baja amplitud, se demostró que los tres mecanismos principales de daño son el desgaste, la fatiga y la corrosión. Si bien ocurren todos simultáneamente, se debe estudiar con precaución cuál de ellos predomina.

Tanto para poder determinar el tipo de daño que predomina o para realizar correctamente las pruebas, surgió la necesidad de normalizar los ensayos para poder optimizar el comportamiento de los elementos en servicio.

Fretting

El fretting se define como un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud, entre dos superficies sólidas en contacto. Es una forma de desgaste que ocurre en el área de contacto entre dos piezas bajo carga (montaje con apriete o ajuste por interferencia), y sujetas a un movimiento relativo de muy baja amplitud, en general $\delta < 100 \mu\text{m}$, por vibración o alguna otra fuerza. La dirección de este movimiento es usualmente, pero no siempre, tangencial a las superficies. El daño alcanza todo tipo de materiales (metales, cerámicos, polímeros). [i]

El fretting ocurre cuando las asperezas de las superficies en contacto continuamente se sueldan (adhesión) y luego esta unión se rompe por efecto de la vibración. Esto produce la transferencia de material de una superficie a la otra y, por lo tanto, la aparición de protuberancias duras que producen abrasión, generando pequeñas partículas de desgaste o debris. [i]

Debido a la baja amplitud de los movimientos, las partículas generadas por el desgaste permanecen en el área de contacto, agravando la acción abrasiva. Siempre ocurren simultáneamente *fretting fatigue*, *fretting wear* y *fretting corrosion*, pero por lo general predomina uno de los efectos sobre los otros, posibilitando en condiciones de laboratorio separar el estudio de cada caso de falla en particular. [vii]

En las áreas afectadas se ven pequeñas cavidades (pits) o surcos rodeados de productos de corrosión (las partículas de corrosión de metales ferrosos suelen ser rojizas, negras las de aluminio, las de metales nobles no se oxidan). [vii]

El fretting promueve una pérdida de material muy pequeña por lo que el análisis por disminución de peso es impracticable. Usualmente se monitorean otras variables como resistencia eléctrica, rugosidad superficial o perfilometría, o fuerza de fricción. [i]

A continuación, se puede apreciar una imagen de un rodamiento desgastado (figura 1) debido al fretting. Este se produjo por el ajuste prieto de la pista exterior de un rodamiento contra su alojamiento. En este caso el origen del movimiento relativo entre la

pista exterior y su alojamiento no se encuentra en las vibraciones, sino en la flexión alternativa del eje rotante (figura 2). [i]



Figura 1. Aspecto de pista exterior de rodamiento desgastado por fretting. [i]

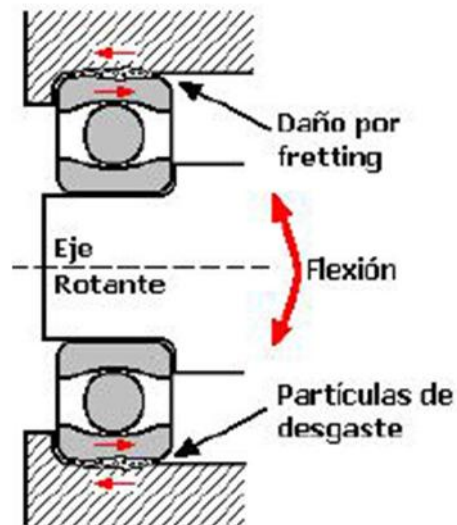


Figura 2. Origen de desgaste por fretting en un rodamiento. [i]

En primera instancia, el desgaste por fretting produce la pérdida de material, con la consiguiente disminución del apriete de montaje. Consecuentemente, el movimiento de deslizamiento relativo aumenta, y también la velocidad de daño. [i]

Régimen de fretting

En fretting, el control del desplazamiento es particularmente importante debido a que la acomodación por deformación elástica de la zona de contacto es de gran influencia a bajas amplitudes de desplazamiento. El régimen de fretting puede determinarse mediante el relevamiento de la curva Fuerza Tangencial, T , versus el Desplazamiento, δ . T varía entre valores positivos y negativos por lo tanto la curva describe un lazo de histéresis con determinadas características para cada régimen (figura 3). [i,vii]

El área encerrada por la curva de histéresis, representa la energía disipada en el contacto.

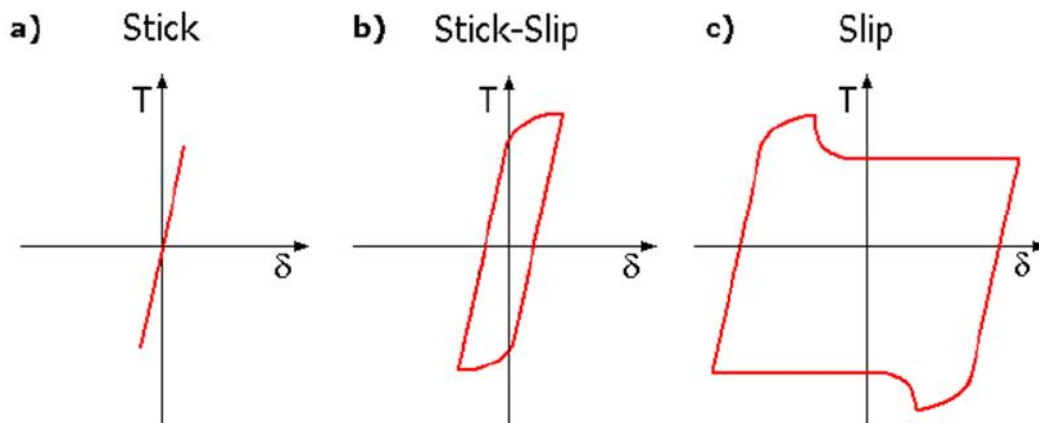


Figura 3. Curvas de histéresis correspondientes a los distintos regímenes de fretting. [i]

STICK REGIME

En la figura 3a) se observa una respuesta completamente lineal, correspondiente a un régimen sin deslizamiento, es decir, sólo hay deformación elástica del mismo. El esfuerzo tangencial aplicado se encuentra lejos del esfuerzo tangencial resistente $\mu \cdot P$ (siendo este el producto entre el coeficiente de fricción, μ , y la carga normal aplicada, P). [i]

STICK-SLIP REGIME

En la figura 3b) el esfuerzo tangencial crece en forma lineal debido a la deformación elástica de los cuerpos, hasta que se alcanza un valor de carga en que se pierde la linealidad, ya que comienza a manifestarse el deslizamiento parcial del área de contacto. A escala macroscópica este tipo de contacto es estático. En este régimen el daño se concentra en los márgenes donde ocurre el deslizamiento. [i, vii]

SLIP REGIME

La figura 3c) muestra la histéresis correspondiente al régimen con deslizamiento total. Las porciones horizontales de la curva representan los valores límite de la fuerza dinámica de fricción resistente. Las porciones inclinadas de la curva representan el comportamiento elástico inicial, correspondiente a cada cambio de dirección del contacto. El esfuerzo T aumenta en forma lineal hasta que comienza el deslizamiento parcial del área de contacto, la pendiente disminuye y T alcanza su valor máximo en el punto que comienza el deslizamiento total del área de contacto. En este punto el coeficiente de fricción pasa de estático a dinámico, produciendo una caída de T hasta hacerse constante. [i]

La energía disipada (área encerrada dentro de la curva en el gráfico T vs D) está directamente relacionada con el daño de los cuerpos en el contacto. Para la condición de deslizamiento total, el desgaste es proporcional a la suma de energía disipada en cada ciclo. [i]

Al superponer una fuerza tangencial en un contacto Hertziano tipo esfera sobre plano puede ocurrir un poco de desplazamiento anular cerca del borde del área de contacto, mientras que el centro permanece adherido (*'stick-slip regime'*). Dadas estas condiciones parece ocurrir daño material sólo en la zona donde hay deslizamiento y se agrava al aumentar la amplitud de desplazamiento. [vii]

El régimen de desplazamiento dominante (total o parcial) debe ser identificado para correlacionar el comportamiento del *fretting* con propiedades de los materiales, factores mecánicos u otros que sean de relevancia. El control de las condiciones de corrosión se logra mejor mediante la aplicación, con una fuente externa, de un potencial definido, medido con respecto a un electrodo de referencia. El potencial aplicado determina la reactividad del metal así como la presencia, o no, de una película superficial pasiva y su composición y grosor. [vii]

Corrosión

La corrosión es la disolución de un metal en un ambiente acuoso. Es una forma de degradación de los materiales (en su mayoría metales) capaz de deteriorar sus propiedades o inutilizar el sistema en que estén aplicados por su natural interacción fisicoquímica con el entorno donde se hallan.

Desde el punto de vista de la mecánica de materiales, la corrosión tiene algunos efectos directos:

- (a) Reducción del espesor efectivo del material.
- (b) Microfisuración y cambios en fisuración.
- (c) Cambios en la resistencia a fatiga.
- (d) Concentración de esfuerzos.

Tanto la corrosión como el desgaste, actuando conjuntamente o individualmente, ocasionan pérdidas importantísimas. Si bien puede haber corrosión sin que haya mecanismos de desgaste, es prácticamente imposible que haya desgaste sin presencia de corrosión.

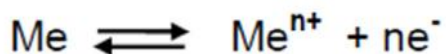
Existen métodos para prevenir y controlar la corrosión que pueden reducir su impacto.

Hay tres métodos principales para prevenir la corrosión:

- 1- El aislamiento de los electrolitos de los electrodos por medio de superficies protectoras.
- 2- Evitar los pares galvánicos.
- 3- El uso de protección galvánica.

La ciencia del control y prevención de la corrosión es muy compleja ya que este tipo de degradación ocurre de formas muy diversas y es influenciada por muchos factores externos como condiciones medioambientales (conductividad, humedad, salinidad del medio), tipos de materiales, geometría de los componentes, tipo de corrosión, productos involucrados en los procesos y corrientes parásitas cercanas.

La naturaleza electroquímica de los procesos de corrosión involucra la oxidación de un metal **M** para formar un ion disuelto **Mⁿ⁺** y la transferencia de *n* electrones **e⁻** por cada átomo oxidado. La reacción que sigue a continuación es válida para metales que se disuelven en contacto directo con la solución (metales activos):



El proceso de corrosión es natural y espontáneo, y cuanto mayor es la energía gastada en la obtención del metal a partir del mineral, tanto más fácilmente el metal revierte al estado combinado, es decir, tanto más favorecida termodinámicamente está la reacción de corrosión.

La fuerza impulsora para la corrosión es la diferencia de potencial eléctrico establecido a través de la interfaz metal – electrolito. Como no puede haber acumulación de carga en la interfase, la velocidad de la reacción catódica debe igualar a la de la anódica. Cuando esto ocurre a este potencial se lo denomina potencial de corrosión y a la velocidad de la reacción anódica, densidad de corriente de corrosión o velocidad de corrosión.

En la práctica el potencial de corrosión de un componente metálico es influenciado por factores como la cinética de las reacciones de reducción y oxidación, las condiciones

de transporte de masa, la temperatura, la formación de películas superficiales pasivas, las corrientes externas, el contacto galvánico con otros metales.

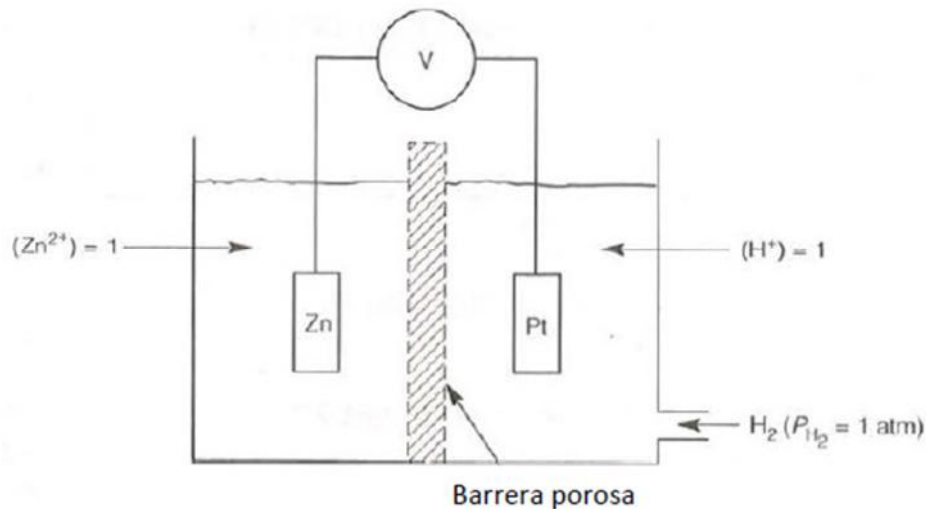


Figura 4. Esquema de celda electroquímica. [vii]

Cualquier celda electroquímica utilizada para medir el potencial de corrosión de un metal consiste en dos semi-celdas, como puede verse en la figura 4. Tomando una de estas semi-celdas como referencia conocida (llamada *electrodo de referencia*), estamos en condiciones de aislar la otra mitad para su estudio y medición, es decir, conocer su potencial de electrodo respecto de la celda de referencia.

Fretting-Corrosion

El efecto combinado de corrosión y desgaste producen un marcado incremento en el daño superficial, de tal forma que resultaría mayor que el que producirían separadamente ambos fenómenos.

Los medios corrosivos, como soluciones con cloruros, aceleran los procesos de degradación. Cuando hay *fretting* entre dos superficies que están en contacto en un medio acuoso, puede ocurrir un efecto sinérgico conocido como *fretting corrosión* y está relacionado con la estabilidad de la película pasiva de un metal o aleación. Una aleación

pasiva puede ser susceptible al *fretting* ya que la fricción mecánica puede destruir la capa de óxido protectora más rápidamente que su tasa de regeneración sobre el metal desprotegido induciendo, por lo tanto, la despasivación.

El fretting se vuelve un aspecto importante para los diseñadores cuando la funcionalidad de un componente se ve deteriorada o su vida útil es reducida por el daño ocasionado en el material. Debido a las graves consecuencias que puede causar, el estudio de este fenómeno ha crecido en relevancia tanto que, en la actualidad, se están adaptando y desarrollando máquinas para realizar exclusivamente ensayos de fretting corrosión.

La ocurrencia de fretting corrosión es de gran variedad en cuanto a localización y condiciones lo cual dificulta la normalización de los ensayos, pero por ejemplo, para el caso de prótesis de caderas existen prácticas y ensayos normalizados.

El paso más importante es entender por separado los efectos de la corrosión y el fretting y diferenciar estos resultados con respecto a la acción simultánea de ambos: fretting corrosion. Las técnicas electroquímicas permiten determinar en tiempo real la velocidad de oxidación electroquímica durante el fretting mediante la medición de una corriente eléctrica. Es de particular importancia la capacidad de monitorear en tiempo real los parámetros mecánicos, electroquímicos y físicos relevantes (fuerza de roce, fuerza normal, desplazamiento, desgaste lineal, corriente y temperatura) para seguir su evolución durante un ensayo y observar correlaciones entre ellos.

Máquinas existentes de ensayos de fretting-corrosion

Generalmente para realizar estos tipos de ensayos tan novedosos se adaptan máquinas tribológicas existentes utilizadas para otros ensayos de desgaste, lubricación, etc. Que naturalmente no tienen en cuenta los procesos electroquímicos. Por lo tanto hay que adicionarle a estas una celda electroquímica para simular las condiciones en la zona de trabajo que provocan la corrosión.

Cuando los ensayos están relacionados con aplicaciones recurrentes y puntuales de los materiales, se requiere confiabilidad en el proceso de obtención de la información: aparece la normalización (o estandarización) de los ensayos, para lograr repetitividad en los resultados y la comparación de los mismos frente a diferentes máquinas.

Para estudiar el comportamiento de las muestras bajo el desgaste de *fretting corrosion* es necesario recolectar y monitorear las respuestas mecánicas y electroquímicas del sistema en estudio. Por lo general, un tribómetro tiene la facilidad de medir la evolución de las fuerzas de fricción y es complementado por técnicas electroquímicas para monitorear el comportamiento de la corrosión en el sistema. [vii]

Siempre que sea posible se ensayan las piezas completas a estudiar simulando sus condiciones de trabajo (composición del medio, sollicitaciones, temperatura, ciclos, etc.), pero en la mayoría de los casos esta tarea se dificulta debido al costo económico de las piezas, a su tamaño o forma geométrica y, sobre todo, porque las pruebas tienen como objetivo estudiar el comportamiento de diversas combinaciones de materiales, recubrimientos y aleaciones. Además de lo nombrado anteriormente, para utilizar piezas con diferente geometría tendríamos que tener una celda adaptable o fabricar una celda específica para cada tipo de pieza lo que a priori no se justificaría (figura 5). En consecuencia, los ensayos suelen realizarse sobre probetas que simulan de manera simplificada, además de las condiciones de trabajo, las condiciones del medio y de contacto. [vii]

La selección y configuración de los parámetros del ensayo (carga, desplazamiento, ciclos, frecuencia, etc.) dependen de la aplicación de los materiales y del objetivo de la investigación. [vii]

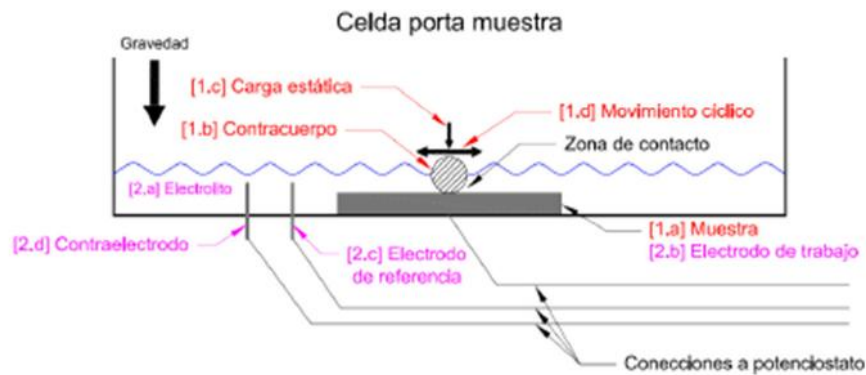


Figura 5. Esquema simplificado de celda para ensayos de fretting corrosión. [vii]

Sistema tribológico

Cuerpo: probeta del material a ensayar

Contra cuerpo: cuerpo a través del cual se genera la interfaz (zona de contacto). Puede ser de distintos tipos de materiales como por ejemplo aceros, cerámicos, metales duros, etc.

Interfaz: generada por la zona de contacto entre ambos cuerpos.

Carga: es la aplicada verticalmente sobre la probeta a ensayar a través del contra cuerpo. Esta generalmente se mantiene constante durante todo el ensayo ya que la profundidad de la huella no es significativa.

Movimiento transversal: desplazamiento cíclico de la muestra de amplitud constante. El valor de este varía según las condiciones de ensayo, el material etc. Pero se mantiene dentro de un rango de fretting.

Sistema electroquímico

Solución electrolítica: simula el medio donde el elemento del material a ensayar trabaja. Debe ser tal que lleve el ensayo a ser lo más real posible.

Electrodo de trabajo: es la muestra a ensayar.

Electrodo de referencia: se utiliza para evaluar los potenciales electroquímicos de la celda de ensayo.

Contra electrodo: es el utilizado para la aplicación y medición de la corriente dentro de la celda de ensayo.

El contacto y frotamiento de las superficies de los cuerpos interfieren en la pasividad y provoca una disolución del metal. Existen ensayos que demuestran una cercana correlación entre los picos de corriente, las variaciones en el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste lineal. [vii]

Termodinámicamente la estabilidad, el espesor y la composición de la película pasiva dependen del potencial aplicado, por lo tanto, también pueden variar considerablemente con el potencial la morfología del daño, la tasa de desgaste y el comportamiento elástico de la zona de contacto. [vii]

La precisión de la terminación superficial del contra cuerpo, aunque sea cerámico o polimérico, es importante ya que su comportamiento al desgaste también puede depender de las condiciones electroquímicas predominantes en el electrodo de trabajo. [vii]

Sensores

Una de las mayores dificultades en los estudios de tribocorrosión es la compatibilidad entre los resultados de los distintos laboratorios debido a la carencia de un dispositivo de ensayo normalizado. Muchos investigadores y laboratorios están intentando modificar tribómetros existentes (comercialmente disponibles o hechos a medida) para incorporar la parte electroquímica necesaria para los ensayos de *fretting corrosion*. Algunas de las limitaciones de usar un dispositivo adaptado son:

- La geometría y la construcción de una celda de corrosión apropiada para el tribómetro.

- Lograr la ubicación propicia del electrodo.
- Las posibles filtraciones de la solución electrolítica.
- Colectar y sincronizar los datos del tribómetro y el potencióstato. [vii]

Los sensores más fáciles de construir y más utilizados para la medición de los micro desplazamientos son de tipo ‘Y’. A continuación se describe su principio de funcionamiento y sus características básicas.

Sensor de tipo “Y”

En algunos casos, el tipo de sensor más simple de construir es aquel basado en la modulación de intensidad (es decir que responde al cambio de intensidad de la luz). Los sensores por intensidad resultan relativamente sencillos, requieren unos pocos elementos y componentes electrónicos. [vi]

Existen distintas configuraciones o arreglos conocidos para construir ese tipo de sensores. Uno de ellos es el arreglo tipo “Y” que se describe a continuación. [vi]

Dos tramos de fibra óptica independientes el uno del otro, son dispuestos en forma paralela como se indica en la figura 6 vinculados rígidamente en sus extremos para garantizar una posición relativa constante entre ellos, y próximos a una superficie de medición. Debido a la disposición en la que se encuentran las dos fibras, que se asemeja a una letra “Y”, se lo denomina usualmente sensor tipo Y. El primer tramo de fibra conduce la luz desde el circuito emisor hasta proyectarla sobre la superficie de medición. Parte de la luz reflejada es acoplada por el segundo tramo de fibra y guiada hasta el sensor, constituido por un fotodiodo y un circuito de acondicionamiento de la señal. [vi]

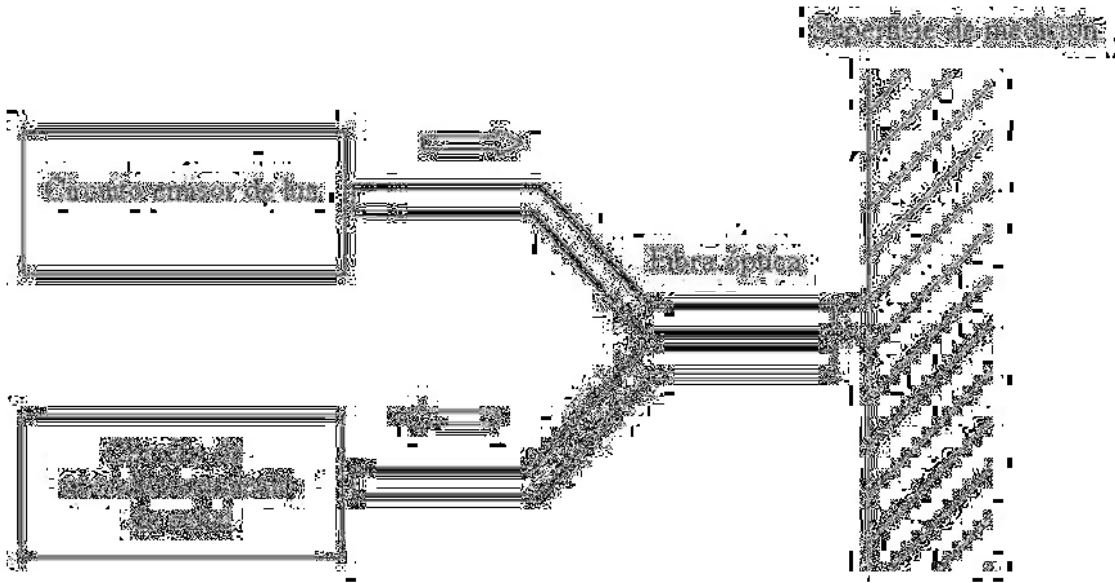


Figura 6. Esquema de funcionamiento de un sensor de tipo Y. [vi]

La cantidad de luz acoplada por el último tramo de fibra óptica es dependiente de la geometría empleada en la construcción de la punta sensora, de las dimensiones de las fibras ópticas empleadas, de las condiciones del medio (índice de refracción), de la distancia entre el arreglo y la superficie a ser medida, y de la reflectividad de la misma. Sin embargo, para un cierto sensor ya construido, y asumiendo que las condiciones del medio no varían durante la medición, la cantidad de luz acoplada se asocia directamente con la distancia de separación entre el sensor y la superficie, pudiéndose utilizar eficientemente para medir la distancia. [vi]

El comportamiento de estos sensores es ampliamente conocido, y presenta una respuesta como la que se muestra en la figura 7. Se aprecia una primera zona en donde el comportamiento es prácticamente lineal con gran variación de voltaje para pequeña variación de distancia. Luego tenemos un máximo que no sirve como zona de trabajo ya que la variación del voltaje no nos estaría diciendo si el objeto se acerca o se aleja. Por último, más alejado, otra zona prácticamente lineal pero con menor sensibilidad a la variación de la distancia. Con estas características la zona más apropiada para nuestra aplicación es la de mayor sensibilidad.

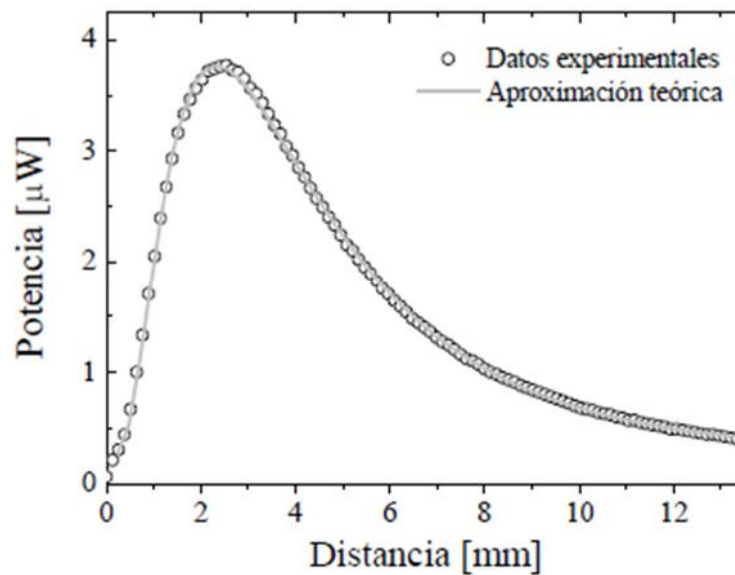


Figura 7. Respuesta del sensor en función de la distancia a la superficie de medición. [vi]

En esta curva experimental típica, se observan diferentes singularidades. Cuando la distancia a la superficie de medición es nula, no hay acople de luz por reflexión, lo cual se traduce en potencia de salida nula. A medida que la distancia de separación aumenta, comienza a aumentar también la cantidad de luz registrada hasta encontrar un punto óptimo en el cual este acople se maximiza. En esta condición se encuentra el punto de pendiente nula, que debe ser evitado por la ambigüedad que conlleva (una variación de señal no indica el sentido del desplazamiento) si se pretende realizar mediciones aprovechando el comportamiento lineal. En el primer tramo de la curva la pendiente es positiva, prácticamente lineal y de gran sensibilidad. Para distancias mayores, la cantidad de luz acoplada hacia el sensor comienza a disminuir debido a que la distancia recorrida es mayor y la densidad óptica acoplada va en decremento. En consecuencia se observa una pendiente negativa de mayor rango de trabajo, pero de menor sensibilidad y solo lineal por tramos. [vi]

Estos aspectos caracterizan cualitativamente la respuesta de un sensor Y, sin embargo las características constructivas de cada diseño en particular y las condiciones ambientales en las que trabaje, darán lugar a una particular curva de respuesta. Parámetros geométricos como diámetros de las fibras, separación o inclinación entre

ellas, así como la forma de la superficie de medición, definen la distancia de separación para la cual se produce el óptimo acople de luz. En conjunto con ellos intervienen la reflectividad de la superficie, el índice de refracción del medio y la configuración empleada en el circuito de medición, determinando el valor máximo de la señal. [vi]

Origen y motivación

Hoy en día se sabe la gran importancia del estudio del fretting ya que todos los componentes mecánicos por más estáticos que se diseñen están sometidos a vibraciones, ya sea por el propio proceso o por alguna fuente externa, lo que provoca que este mecanismo de desgaste se haga presente.

Para cualquier institución de investigación es importante contar con máquinas de ensayos de alta precisión, repetitividad en los resultados que devuelve en cada prueba y trazabilidad de los mismos con otros modelos que realicen el mismo tipo de ensayo.

En Mar del Plata se encuentra el instituto de investigaciones en ciencia y tecnología de materiales (INTEMA), un instituto dependiente de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP) y del consejo nacional de investigaciones científicas y técnicas (CONICET) que realiza actividades de investigación relativas al conocimiento básico y al desarrollo tecnológico en el área de materiales.

INTEMA está conformado por 12 divisiones que llevan a cabo actividades de investigación, docencia, extensión y transferencia al medio socio productivo en el área tanto del conocimiento básico como al desarrollo tecnológico de materiales en conjunto con los servicios técnicos de apoyo, que se dividen en laboratorios y talleres. Las diferentes actividades de investigación que se realizan en este instituto están relacionadas con el comportamiento de los materiales bajo distintas circunstancias.

En la División Ingeniería de Interfases y Bioprocesos (IIBio) del INTEMA se utilizan técnicas de ensayo que reproducen y simulan exitosamente diversos tipos de corrosión. Cuentan con una máquina de ensayos de fretting-corrosion fabricada por un alumno de la facultad de ingeniería. Se realizarán modificaciones sobre la misma para poder obtener más información en los ensayos sobre el comportamiento de distintos materiales bajo el efecto conjunto de sollicitaciones mecánicas cíclicas de pequeña en presencia de un medio corrosivo (fretting-corrosion).

Por este motivo surgió la necesidad de hacer un análisis estructural y de funcionamiento de la máquina para ver la posibilidad de corregir sus errores o construir

una nueva para que el INTEMA cuente con un dispositivo de ensayo que esté en condiciones óptimas para avanzar en la investigación de este tipo de desgaste que se encuentra en la mayoría de las áreas donde hay procesos industriales.

Con esta máquina el instituto podría realizar los ensayos pertinentes para obtener la información necesaria sobre el desgaste combinado que produce el fretting con la corrosión para diferentes materiales, estados de carga y amplitudes.

Objetivos

Debido a todo lo visto anteriormente, se desprende este proyecto final con el objetivo general de analizar y optimizar la máquina de ensayos de fretting-corrosión existente en el INTEMA. Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la estructura y el funcionamiento de la máquina que se encuentra en el instituto.
- Evaluar las deficiencias de la misma en base a los requerimientos necesarios.
- Recolectar información sobre las características de máquinas comerciales.
- Proponer alternativas de diseño o reemplazo de componentes que brinden soluciones a dichos problemas.
- Evaluar diferentes opciones y seleccionar la más adecuada, ponderando la relación entre la mejora que introduce y su factibilidad, costo y tiempo de fabricación.
- Lograr mediante algún sistema electrónico monitorear las variables más relevantes en esta clase de ensayos. Permitir el registro de datos.
- Obtener una máquina que realice ensayos repetitivos, con resultados comparables con otros equipos.

Análisis y pruebas de funcionamiento del diseño anterior

Análisis de funcionamiento y diseño

En una entrevista con los responsables del laboratorio de la División Ingeniería de Interfases y Bioprocesos (IIBio) del INTEMA se recabó información del funcionamiento del equipo existente. Dado que la máquina diseñada y construida anteriormente por un tesista de grado no cumple con los requisitos establecidos se procede a analizar su diseño y características de funcionamiento.

Funcionamiento general

El funcionamiento de esta máquina está basado en la simple aplicación de una carga determinada sobre una probeta que realiza un movimiento alternativo de una pequeña amplitud.

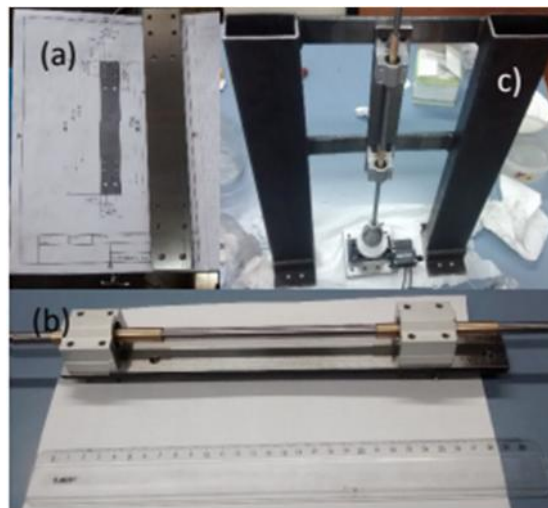


Figura 8. Diseño actual del equipo. Sistema de aplicación de la carga.

El encargado de la aplicación de carga, es un sistema de varilla deslizante en sentido vertical guiado por rodamientos axiales, fijos a una estructura metálica. (Figura 8). En el extremo superior se apoyan pesas calibradas y en el inferior se inserta un

mandril roscado que soporta en su interior al contracuerpo de punta esférica de alúmina.
[vii]

El desplazamiento de la muestra se produce por la acción de un microactuador electrónico que montado en él, se acopla el portamuestra. La esfera de alúmina en el extremo inferior de la varilla produce el contacto con la muestra, dejando una huella que luego debe ser analizada para extraer conclusiones.

Para el sistema de sensado de la fuerza de roce se pensó en la implementación de galgas extensométricas para medir la deformación que ésta produce sobre la varilla, pero este sistema no fue implementado.

Estado de componentes

En primera instancia, se procedió a inspeccionar los componentes principales de la máquina del proyecto final anterior, con el fin de determinar cuáles de estos se podrían reutilizar y cuáles habría que desestimar o bien modificar para una posible aplicación. Estos componentes son:

1. Estructura principal
2. Microactuador electrónico
3. Celda electroquímica
4. Varilla y esfera cerámica
5. Base de apoyo (Mesa de granito y breadboard).

A continuación, se detallan las características y funciones de cada uno de ellos.

Estructura principal: El marco estructural (figura 9) tiene como función restringir los grados de libertad del sistema de carga y soportar las reacciones y deformaciones que puedan generarse por la acción de la fuerza de roce al imponer los ciclos de desplazamiento durante el ensayo. El material del marco es de acero al carbono y sus partes fueron unidas mediante soldadura.



Figura 9. Estructura principal. [vii]

Microactuador electrónico: (Marca Zaber, modelo T-LSM025A) (figura 10). Su función es realizar los desplazamientos de baja amplitud de la probeta con el fin de simular el movimiento de fretting. La celda de ensayo se ensambla sobre la base móvil del actuador, que dispone de orificios roscados M3 por lo que su diseño, y el del sistema de carga, están restringidos al límite de carga continua del dispositivo: 25 [N] con la base en movimiento. También se destaca la repetitividad de 1 [μm] en la posición y la resolución menor a 0,05 [μm]. [vii]



Figura 10. Microactuador electrónico (Zaber T-LSM025A). [vii]

Celda electroquímica: esta debe retener firmemente la muestra, poder intercambiar con facilidad las muestras entre ensayos, contener líquido con espacio suficiente para alojar el electrodo de referencia y el contra electrodo. Además, debe tener el volumen suficiente para que la composición del electrolito no cambie debido a los productos de corrosión.

La celda (Figura 11) fue diseñada de manera tal que una muestra (disco) se sujeta en un portamuestra de lados exteriores rectos, con una cavidad cilíndrica en su centro ajustando un prisionero. La retención de filtraciones de la solución líquida se logra con un contenedor de líquido de poliacetal (capacidad 12,5 [cm³]) que se ensambla a rosca y hace tope en una arandela de goma entre la muestra y el contenedor . En la Figura 12 puede verse el portamuestra armado con la probeta durante un ensayo estático (72hs) para verificar que no haya filtraciones. [vii]

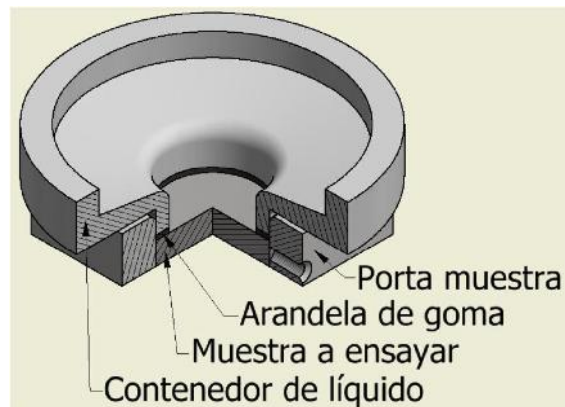


Figura 11. Esquema en corte de celda electroquímica porta muestras. [vii]



Figura 12. Celda electroquímica porta muestras. [vii]

Mesa de granito: La mesa de granito de alta precisión (figura 13), es utilizada para asegurar la planitud y absorber las vibraciones que introducirían ruido a nuestro sistema. Sobre esta se apoya la mesa óptica (breadboard), que es la base donde se ensamblan las partes de la máquina.



Figura 13. Mesa de granito. [vii]

Mesa óptica o breadboard: (Marca Newport, Modelo: M-SG-12-2) (figura 14). La decisión de utilizarla se basa en dos aspectos principales: su planitud, también de alta precisión, y estar provisto de una grilla de orificios con rosca normalizados para anclaje de estructura, accesorios -como el sistema de desplazamiento- y el instrumental de medición.



Figura 14. Mesa óptica marca Newport. [vii]

Punta de contacto esférica: Se eligió una punta cerámica esférica (alúmina) sobre un plano (muestra metálica) ya que la configuración más usada en los ensayos es la esfera sobre plano. Esta configuración concentra las tensiones en la zona de contacto, minimizando la carga necesaria para lograr una determinada superficie de contacto. Su alineación es más sencilla que en las configuraciones cilindro – plano o plano – plano.

Los contra cuerpos esféricos utilizados en la máquina actualmente son de alúmina (óxido de aluminio sinterizado). La alúmina tiene la ventaja de ser inmune a la corrosión y tener alta resistencia a la abrasión, ya que es un cerámico; pero tiene la desventaja de ser difícil de conformar por sus variaciones dimensionales (anteriores y posteriores a la sinterización)

Varilla y rodamientos: Los principales objetivos de este conjunto son transmitir la carga normal aplicada desde un extremo de la varilla, y mediante la determinación de su deformación elástica permitir adquirir datos sobre la fuerza tangencial o de roce aplicada a la probeta.

La varilla es de acero SAE 1045 trefilado de 8mm de diámetro (adaptada con bujes para lograr el contacto en el diámetro interno de los rodamientos) y los rodamientos son lineales (Figura 15) Bosch Rexroth R0602 310 Ø10 [mm], según catálogo de Lineartec Argentina SRL. Cada rodamiento fue alojado en un soporte KBA10UU, según el mismo catálogo.

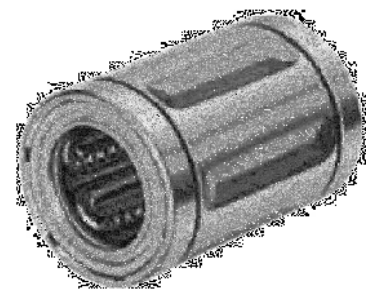


Figura 15. A) Conjunto varilla rodamiento. B) Guía de rodamientos lineales Bosch Rexroth. [vii]

Análisis de resultados

Inicialmente, la máquina se encontraba pre ensamblada en INTEMA, en el laboratorio de la división Ingeniería de Interfaces y Bioprocesos. Una vez que se inspeccionó el estado de los componentes, se procedió a finalizar el ensamblado del equipo con el objetivo de ponerlo en funcionamiento y así poder analizar los resultados que arroja y determinar los posibles errores o fallas en su desempeño.

Este ensamble final consistió en:

1- fijar el microactuador a su adaptador, necesario para ajustar la rosca hembra de la sujeción del mismo a la rosca de la breadboard, mediante tornillos.

2- consolidar la estructura principal (con los rodamientos y varilla solidarias a la misma) a la mesa, también mediante tornillos

3- Colocar y fijar la muestra dentro de la celda electroquímica, y luego fijar la misma al microactuador en la máquina

Luego del armado, se procedió a examinar la interfaz de software utilizado para establecer las condiciones de movimiento del microactuador (frecuencia y desplazamiento). Este software se programa en una laptop presente en el laboratorio (figura 18). Hay dos maneras de manipular el microactuador: Una de forma simple en la que solo realiza un desplazamiento hasta la posición que uno desee, ya sea de forma absoluta o relativa a la que se encuentra, a una cierta velocidad.

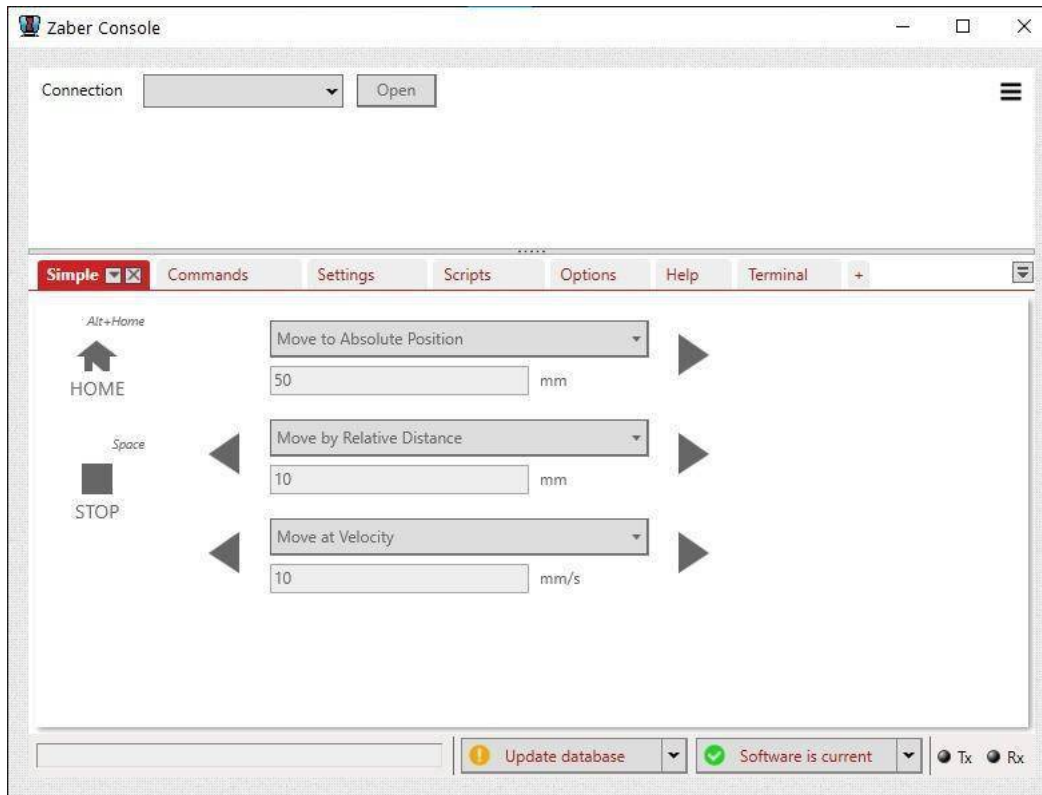


Figura 16. Interfaz para programación del microactuador electrónico.

Otra manera es mediante un script para que realice los movimientos cortos y alternados, más adecuados al tipo de ensayo de fretting. Se puede configurar el número de ciclos, la velocidad a la que se mueve el microactuador, y la amplitud de movimiento.

Una vez impuestos los valores de las variables necesarias para el accionamiento del microactuador, se colocó en el portamuestras una probeta de acero inoxidable SAE 316L. Se continuó con la regulación de la carga aplicada en la misma, que constaba de un suplemento (pesas) en el extremo superior de la varilla.

Si bien la máquina en aspectos generales contaba con un buen desempeño contemplando los objetivos para los cuales fue diseñada y construida en primera instancia, nuestro trabajo primordial era detectar posibles fallas, defectos o desventajas en la misma, para luego proponer alternativas de cambios o mejoras en el funcionamiento o bien, en el diseño.

Los principales defectos o desventajas encontrados fueron:

Restricción mínima de carga al peso de la varilla

Al ser el principal elemento del sistema de carga una varilla, llegado el caso de desear aplicar una fuerza de carga en el ensayo menor al peso propio de la misma, esto no se podría lograr. Lo que presenta una desventaja en el rango de carga aplicable en los ensayos.

Desplazamiento del punto de aplicación de la carga:

Para que se produzca fretting – corrosión, en lo que respecta al punto de aplicación de carga sobre la probeta, se espera que este sea en el centro de la misma, y con un régimen de contacto gross-slip, es decir que la totalidad del área de contacto sufre un desplazamiento.

Inspeccionando el comportamiento de la máquina en funcionamiento, se pudo observar que en un principio cuando comienza a desplazarse la muestra, debido a la flexión de la varilla la punta no presenta movimiento relativo respecto de la probeta. Esto es así hasta el punto donde la deformación de la varilla vence la fuerza de roce estática y se produce un resbalamiento de la misma sobre la muestra.

Este comportamiento produce que el recorrido que debe hacer el extremo sobre la probeta sea menor al deseado. Otra consecuencia es que el valor de fuerza de roce que devolvería el ensayo no sería correcto, dado que en una porción significativa del recorrido se mide roce estático y en otra dinámico.

Modificación de carga aplicada debido a ajuste en rodamientos axiales:

Para que la barra (o varilla) se mueva únicamente en dirección axial, se decidió eliminar el grado de libertad en la dirección radial de la misma, mediante dos rodamientos axiales. Para eliminar el posible juego existente entre ellos y la barra, se realizó un ajuste

por interferencia, lo que trae aparejado una dificultad en el desplazamiento de la varilla por dentro de los rodamientos, conduciendo a una discrepancia entre la carga aplicada en el extremo superior de la varilla y la carga real aplicada sobre la superficie de la probeta.

La carga real aplicada sobre la muestra se debe calibrar con una celda de carga, ya que el ajuste en los rodamientos y la masa del eje aportan cargas adicionales al sistema que deben ser tenidas en cuenta. [vii]

Imperfecciones en la huella debidas a la deformación de la estructura:

Idealmente, la huella determinada por el deslizamiento de la bolilla sobre la muestra, debería ser lineal, debido a que la fuerza de roce debe ser opuesta al movimiento de la probeta impuesto por el microactuador. Esto no se observa al momento de inspeccionar el desempeño del equipo, ya que analizando la probeta luego de un ensayo de prueba, se puede apreciar una marca de forma elíptica en lugar de una línea recta (figura 17), esto podría estar sucediendo por causa de la deformación elástica que sufre la estructura principal o marco, como se muestra en la figura 18.

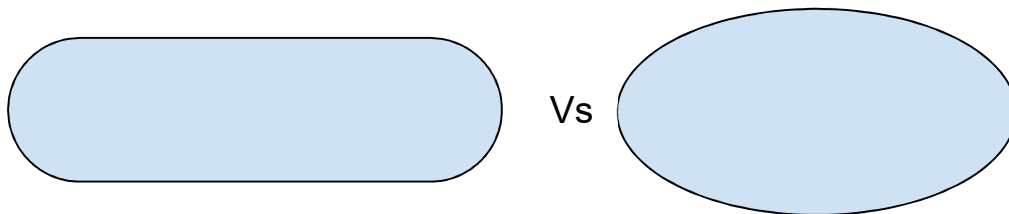


Figura 17. Diferencia entre una huella correcta y una elíptica..

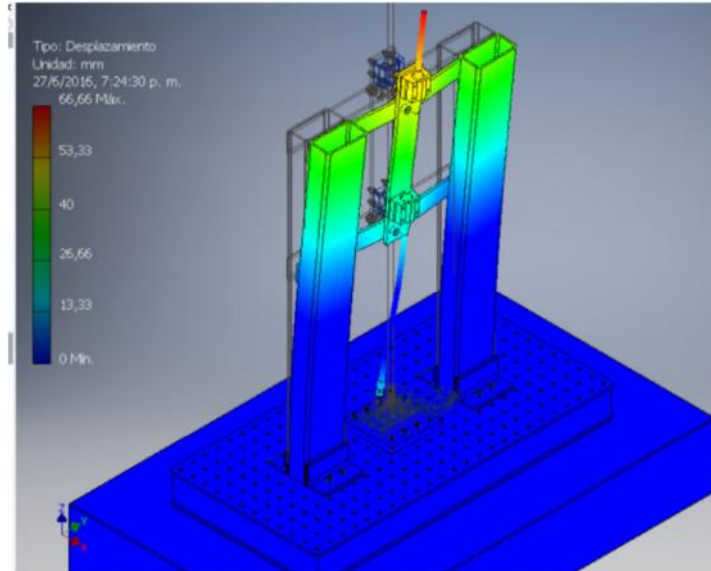


Figura 18. Simulación del desplazamiento máximo de la estructura en sentido normal al desplazamiento de la muestra en el primer modo de vibración a 100 Hz. [vii]

Esta característica trae consigo varias desventajas o limitaciones en la performance del equipo, tales como descomposición de la fuerza de roce aplicada a la probeta en componentes longitudinales y transversales, alteración del punto de aplicación de la esfera sobre la superficie de la probeta. Estos inconvenientes derivan en una dificultad importante a la hora de mantener constante y medir la fuerza de roce aplicada. También produce un incumplimiento de las especificaciones requeridas para un ensayo de fretting, que exigen una marca lineal en la probeta sometida al ensayo.

Nula medición de la fuerza de fricción resultante:

En el presente diseño se había pensado en la utilización de galgas extensiométricas en el eje de carga para medir la fuerza de fricción entre el contracuerpo y la probeta. Esto no fue llevado a cabo por lo que la máquina no era capaz de medir esta fuerza, que es uno de los parámetros más importantes para comparar y calificar este tipo de ensayos.

Búsqueda bibliográfica sobre máquinas comerciales

Luego de haber analizado el estado de los componentes y detectado los problemas más relevantes, se prosiguió a buscar información en páginas web de marcas reconocidas por fabricar y comercializar máquinas que efectúan este tipo de ensayos. El objetivo de esta etapa era adquirir información sobre los aspectos generales de su diseño y funcionamiento, elementos y materiales que las componen, rangos y frecuencias de movimiento que manejan, cargas de ensayo convencionales y softwares de utilización más populares. De esta forma se pudo obtener conocimientos más específicos para proponer ideas de cambios en cada aspecto de funcionamiento de la máquina actual.

La información provista por las empresas en sus páginas web no suele ser muy profunda en cuanto al diseño, pero a continuación se muestra las más relevantes para nuestro caso y las que fueron de más ayuda.

Marca NANOVEA:

Modelos para ensayos de desgaste por medio de movimiento lineal: T50 y T100 (figuras 19)



Figura 19. Tribómetro marca Nanovea. [viii]

Estas máquinas siguen el standard de las normas ASTM G133, G171 y F732. El modo de funcionamiento de estas dos máquinas (Figura 21) es el mismo:

“Una esfera, una punta o algo plano se coloca en la superficie de la probeta o muestra con una carga determinada. Las muestras pueden ser de distintas formas (como ser cilíndrica) siempre y cuando cuente con una parte plana de una cierta longitud en la dirección del movimiento. La longitud de la huella puede ser regulada previo al comienzo del ensayo.

A medida que transcurre el ensayo, la punta crea una huella de desgaste de forma lineal (también es posible un patrón de zigzag) (figura 20). Debido al codificador rotatorio de posición externa integrado de 16 bits, la fuerza de fricción puede ser calculada en cualquier punto deseado en cada periodo. Esto es esencial para el estudio preciso de la tendencia de la fricción a través de la longitud completa del ensayo.”

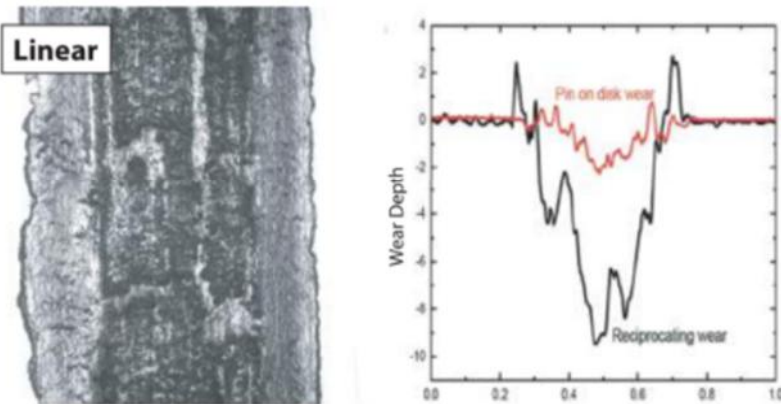


Figura 20. Huella producida durante un ensayo. [viii]

BASE	T50	T100
Min/Max Testing Loads	100mN - 60N	50mN - 100N
Load Resolution	10mN	0.006mN
Load Noise Floor	N/A	0.25mN
Loading Type	Weights	Advanced Pneumatic
Fatigue Loading	N/A	N/A
Frequency of Oscillation	N/A	N/A
Frictional Force Maximum Resolution	(+/-)20N 2.4μN	(+/-)100N 6μN
Motor Max Torque up to 1500rpm Max Speed	1.27Nm 0.6Nm	1.27Nm 0.6Nm
Intermittent Max Torque up to 1500rpm	4.4Nm	4.4Nm
20Bit Speed and 16bit Position Encoders	Included	Included
X Motorized Travel	50mm	50mm
Depth Sensor Range Resolution	2mm 0.1nm	2mm 0.1nm
Instrument Dimension	61 x 35 x 69cm (Benchtop)	65 x 52 x 65cm (Benchtop)
Weight	67kg	70kg
Max. Stroke Range	25mm	25mm
Maximum Frequency (Up to 5mm stroke)	60Hz	60Hz
Mounting Area	62 x 76mm	62 x 76mm

Figura 21. Características de los modelos T50 y T100 de Nanovea.

A continuación, en la figura 22 se muestra el modelo de la misma marca para ensayos con movimiento rotativo que, si bien no es el tipo de ensayo como el requerido para nuestro caso, se observa una forma simple de colocación de discos para controlar la carga aplicada a la probeta. Al mismo tiempo el diseño incluye un contrapeso para equilibrar el peso del brazo y minimizar el error en la aplicación de la carga.

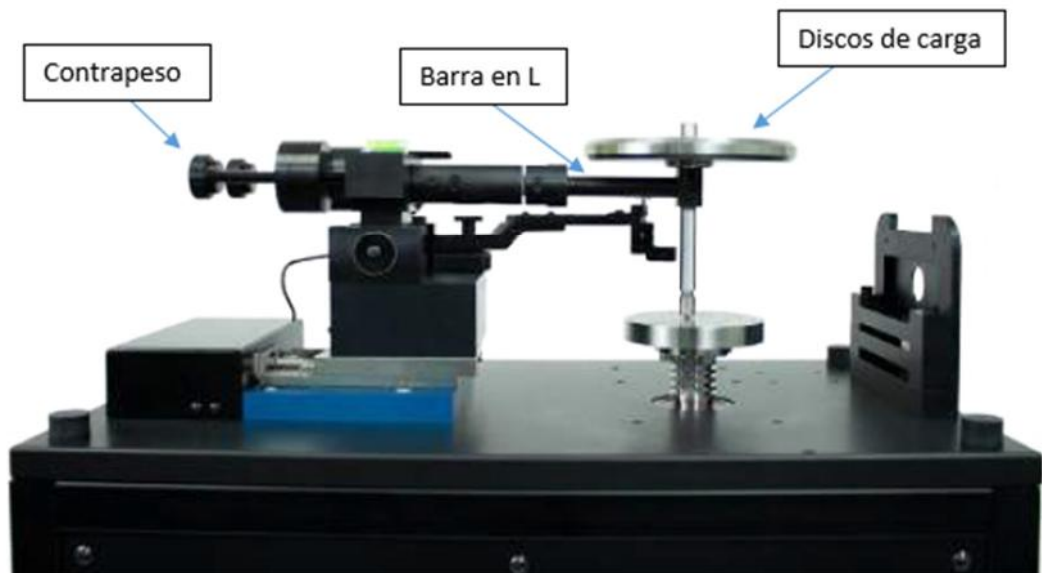


Figura 22. Tribómetro de movimiento rotativo de Nanovea.

Marca ANTON PAAR:

Tribómetro tipo pin-on-disk (perno en disco) TRB³:

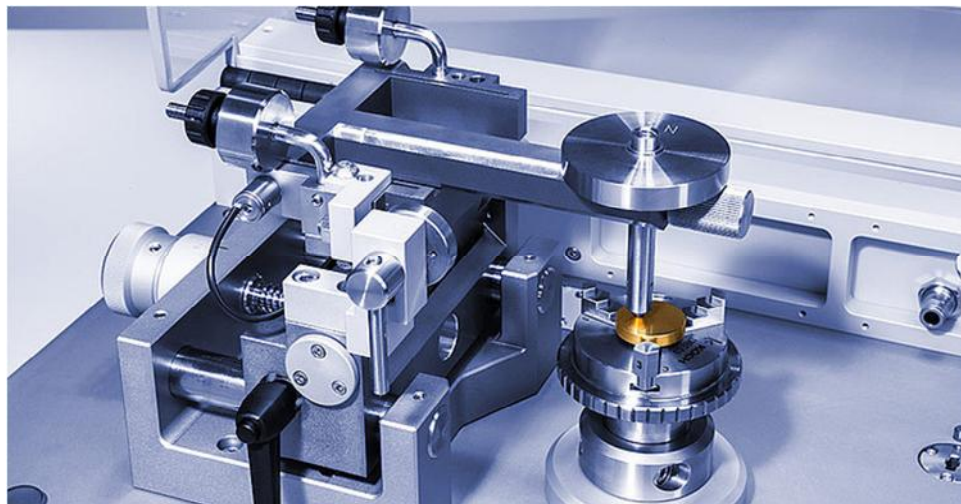


Figura 23. Tribómetro marca Anton Paar. [ix]

Presentan conformidad con los estándares ASTM G99, ASTM G133, y DIN 50324. Como se puede apreciar en las figuras 23 y 24 el modo de funcionamiento es muy similar a los tribómetros de la marca Nanovea.

Según el fabricante: gracias al diseño único de dos sensores de fricción y un brazo de medición elástico simétrico, el tribómetro pin-on-disk TRB³ de Anton Paar logra superar la desviación térmica, que se produce durante largos periodos de tiempo de prueba y debido a la fluctuación de la temperatura ambiente. La desviación térmica es aún más perjudicial en los casos en los que la muestra se calienta o enfría intencionalmente y en los que la fricción esperada es relativamente pequeña. TRB³ mide simultáneamente el resultado diferencial entre las dos señales de los sensores de fricción y registra datos de fricción corregidos por hardware en tiempo real.

Mediante sensores integrados, TRB³ mide y registra los valores de temperatura y humedad en función del tiempo, además de la fricción y otros datos de comprobación en tiempo real.

El software del tribómetro de Anton Paar viene con tres modos principales de ajuste de parámetros (estándar, incremental y definido por el usuario) para satisfacer todas las necesidades de la prueba (diferentes modos de velocidad, carga y movimiento, etc.). El software "Modelización" se incluye por defecto para simular la tensión de contacto y la distribución de la deformación, por lo que puede elegir fácilmente los parámetros de medición correctos.

Especificaciones técnicas

Rango de fuerza normal	hasta 60 N
Resolución de fuerza normal	- (peso muerto)
Rango de fuerza de fricción	hasta 20 N (opción de 5 N)
Resolución de fuerza de fricción	0.06 mN (opción de 0.015 mN)
Movimiento alternativo lineal¹	
Longitud de golpe	hasta 60 mm
Velocidad	hasta 370 mm/s
Frecuencia	0.01 Hz a 10 Hz

Figura 24. Características de la máquina de ensayos de Anton Paar. [ix]

Modelo CANTILEVER:

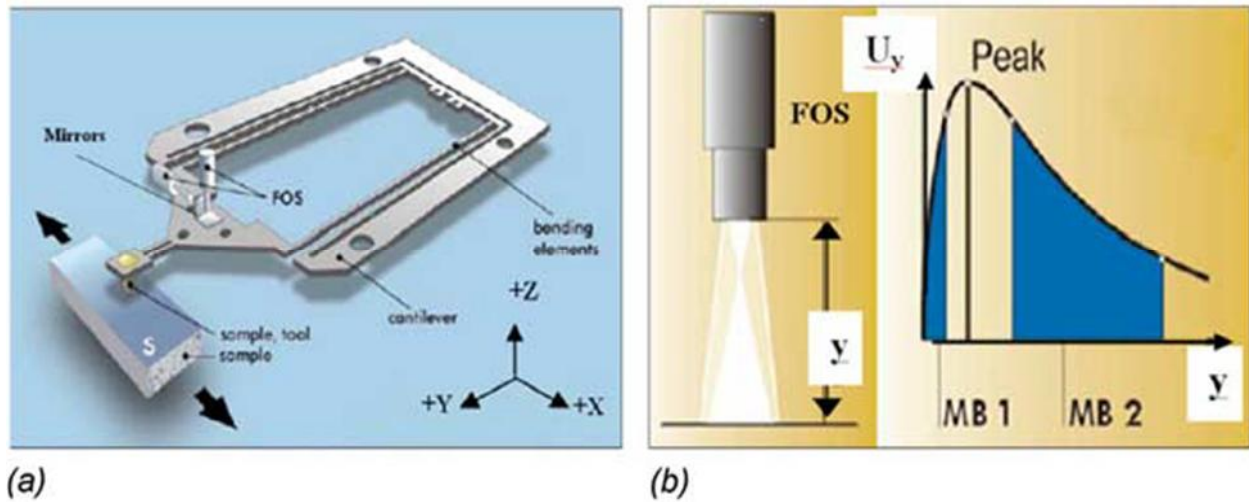


Figura 25. A) Estructura de cantilever con sensores. B) Curva característica del sensor (x)

El elemento de medición de este dispositivo es un cantilever de 25 por 50 mm con determinados módulos de rigidez tangencial y normal. Las deformaciones de este elemento en las direcciones X y Z son independientes una de la otra. A diferencia de un microscopio de fuerza atómica, este cantilever no se tuerce debido a su especial diseño de doble hoja. Las deformaciones presentes en el mismo son detectadas con un conjunto de sensores de fibra óptica (FO5) ubicados en la dirección normal y tangencial, aproximadamente a 1 mm de distancia, del cantilever. Desde sus extremos, los sensores cuentan con un haz de fibra óptica que funciona como emisor y receptor de luz proveniente de unos espejos colocados en las direcciones de deformación mencionadas, X y Z, como se observa en la figura 25.

La luz irradiada por los transmisores es captada por los receptores y convertidas a señales eléctricas mediante unos transductores óptico-electrónicos.”

La referencia del documento no explica cómo es la aplicación de la carga. Analizando el diseño y el principio de funcionamiento se deduce que es mediante la propia deformación del cantilever, cuando la punta es elevada, esta ejerce una fuerza hacia abajo (donde se encontraría la probeta) proporcional a cuanto se la levante.

Optimización

Propuesta de cambios

Posterior a la búsqueda de información y especificaciones de modelos, diseños y elementos presentes en máquinas comerciales (tribómetros), y una vez analizados los defectos o inconvenientes presentes en el diseño anterior, se procedió a proponer alternativas de mejora.

Modelo anterior

Una primera propuesta podría ser la de modificar los componentes presentes en el diseño del trabajo final anterior, que generan dificultades en el funcionamiento, de una forma sencilla y sin alterar demasiado las características actuales.

Para esto, es necesario centrarse en las limitaciones del equipo y los defectos descritos en la sección “análisis de los resultados”. Los dos primeros problemas desarrollados allí, “restricción mínima de carga al peso de la varilla” y “desplazamiento del punto de aplicación de la carga”, serían muy complicados de solucionar sin modificar considerablemente los componentes presentes, o bien reemplazarlos.

En cuanto a la tercera imperfección, “modificación de carga aplicada debido a ajuste en rodamientos axiales”, se pensó en realizar una calibración o reglaje para distintas condiciones de carga empleando una balanza. Como segunda opción, adicionar una celda de carga por debajo del porta muestras (como se muestra en la figura 26), con el fin de determinar la carga real que se está aplicando a la probeta, y posteriormente agregar o disminuir peso hasta llegar al valor deseado.



Figura 26. Esquema de la máquina a analizar y rediseñar. Se señala la ubicación potencial de la celda de carga [vii]

En lo que respecta a “imperfecciones en la huella debidas a la deformación de la estructura” una posibilidad es la de agregar barras anexas a la principal, con el fin de brindarle mayor rigidez y así disminuir la deformación en el sentido perpendicular al movimiento. Por ejemplo, dos perfiles en forma de L como se muestra en la figura 27. También se debería utilizar una barra menos esbelta, lo que daría más rigidez pero reduciría la deformación con lo que perderíamos sensibilidad en la medición de la fuerza de fricción.

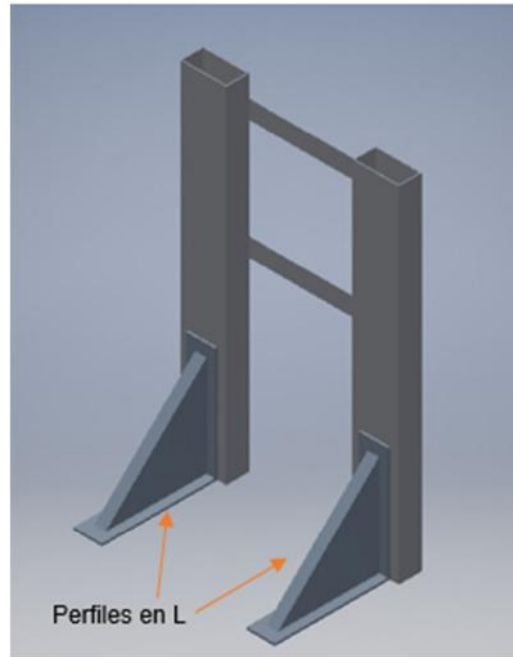


Figura 27. Diseño de adición de ménsulas a estructura. [vii]

Por último, resta hablar de la falta de implementación del sistema de extensómetros para la medición de la fuerza de fricción resultante. Para un modelo de estas características, es inevitable la deformación de la varilla para poder calcular la fuerza tangencial que ésta aplica sobre la probeta.

La barra en el punto neutro de desplazamiento no presenta deformación, mientras que es máxima en los puntos extremos del movimiento alternativo de la muestra. Por lo tanto, una buena alternativa sería la de utilizar un arreglo de strain – gages colocado lo más alejado posible del extremo, donde se produce el campo de tensiones más considerable. Luego captar la señal enviada por este dispositivo, con el fin de convertir la deformación de la varilla en fuerza aplicada sobre la muestra.

Modelo brazo pivotante

Tomando como ejemplo los diseños observados en el tribómetro de movimiento rotativo de la Marca NANOVEA, y el de movimiento lineal y rotativo de la marca ANTON PAAR, se propuso una opción en la que el sistema de carga consiste en una barra con forma de L, la cual pivotea en uno de sus extremos, y apoya sobre la probeta en el otro. Es decir que, para llevar a cabo esta alternativa, se debería reemplazar la estructura principal y el sistema de carga, compuesto por la varilla y los rodamientos. Se introduciría una barra en L con un contrapeso, para anular el momento producido por la misma, y un porta discos para regular la carga. Éste se ubicaría sobre el codo de la barra como se puede observar en la figura 22.

Sensado (mediante SG)

En el modelo con brazo pivotante no se contaría con un elemento que sufra una deformación considerable frente a la fuerza de fricción, permitiendo cuantificarla, como ocurría con la varilla. Se podría sensar la carga o la deformación en los apoyos, mediante un piezoeléctrico o “Strain Gage”, para recibir una señal eléctrica de la misma. A través de una ecuación matemática, podría determinarse la fuerza de fricción aplicada a la probeta en todo momento, a partir de dicha señal.

Esta opción de modificación y posible optimización del diseño actual tiene como ventaja ser de simple aplicación, ya que el reemplazo de las piezas mencionadas anteriormente, simplificaría considerablemente la construcción y calibración de la máquina. Una virtud frente al equipo inicial es la simple adición de carga mediante discos con pesos determinados, además de poderse utilizar pesos desde cero, ya que el contrapeso elimina el momento de la barra, distinto al caso anterior que la carga del ensayo debe ser como mínimo el peso de la varilla.

Como desventaja presenta el mismo problema que el diseño inicial en cuanto a la dificultosa medición de la fuerza de fricción aplicada, debido a que, como se mencionó

anteriormente: se debe utilizar la deformación del elemento, algún instrumento de medición de la misma y alguna correlación para obtener la fuerza.

Modelo Cantilever

Este modelo tiene la particularidad de requerir solo una sola pieza estructural con dos sensores, que medirán los desplazamientos en sentido tangencial y normal al movimiento de la probeta. Debido a esto, su fabricación y utilización resultaría menos dificultosa.

Teniendo en cuenta las razones mencionadas, se decidió hacer un análisis más exhaustivo de la pieza central (cantilever) contemplando tensiones, deformaciones y frecuencias naturales de vibración. También poder entender las razones de su diseño, mediante el software Inventor de Autodesk, se analizaron diversas dimensiones y formas en él, con el fin de comparar los distintos comportamientos de los modelos.

Este programa provee funciones destinadas al análisis estático y modal de la pieza. El primero es clave para verificar el régimen de trabajo, asegurarse de no llegar a tensiones de fluencia y permanecer en un rango de vida infinita a la fatiga. El segundo es también importante para nuestros objetivos por ser un tipo de ensayo con movimiento alternativo, donde las frecuencias naturales son de gran importancia.

En cuanto al material del modelo, se seleccionó acero, sin necesidad de especificar cuál acero en particular, ya que se trabajará en régimen elástico. Bajo esta condición de funcionamiento la constante más importante es el módulo elástico, igual para todos los aceros ya que depende del tipo de enlace atómico. (Enlace metálico, Módulo de Young: $E = 210000 \text{ Mpa}$).

Verificación del funcionamiento del software inventor

A través del software Autodesk Inventor, se realizaron todas las simulaciones de los tipos de cantilever analizados. Para verificar el correcto funcionamiento del programa, se comparó los resultados que arroja para una viga de sección cuadrada (10 cm de lado) con un empotramiento en un extremo y una carga puntual en el otro, con un análisis teórico (figura 28) del mismo.

- Modelo teórico:

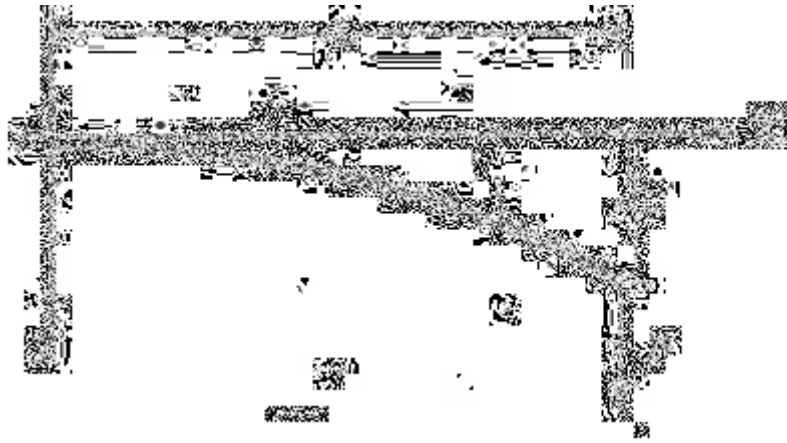


Figura 28. Representación de una viga para realizar el análisis teórico.

Este modelo responde a la ecuación 1 para obtener el desplazamiento en el extremo:

$$z(L) = \frac{F * L^3}{3 * E * I}$$

Ecuación 1. Desplazamiento del extremo donde se aplica la carga.

siendo:

- $z(L)$ = desplazamiento del extremo libre
- F = fuerza en el extremo= 1000 N
- L = longitud de la viga= 1 m
- E = módulo de elasticidad del acero= 210000 Mpa

- $I =$ momento de inercia de la sección= $8.33 \times 10^{-10} m^4$

$$z(L) = 0.190 \text{ mm}$$

- Simulación a través de Inventor (figura 29)

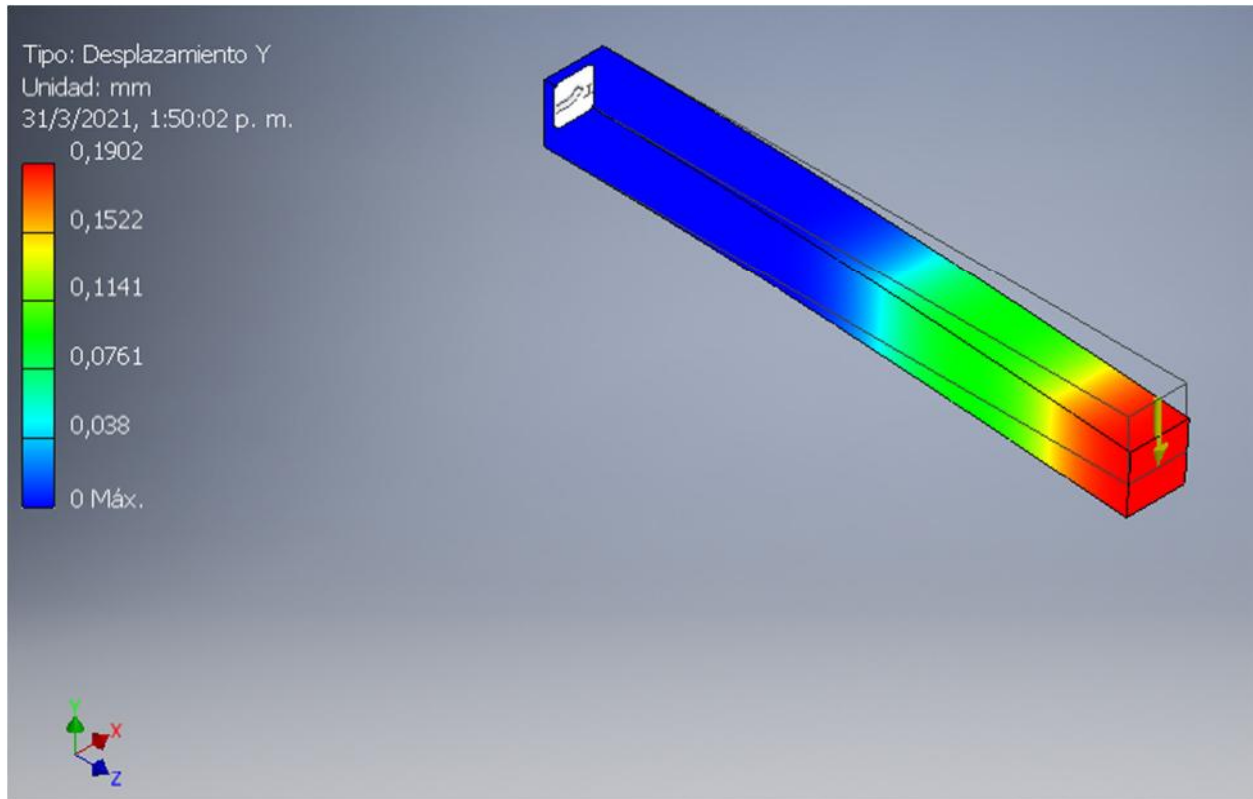


Figura 29. Desplazamiento del extremo de la viga con carga puntual aplicada en dicho extremo.

Como conclusión, al coincidir los resultados de ambos métodos, se puede fiar de los valores arrojados por el software.

Modelo con viga simple

Como el diseño del sistema de carga del modelo cantilever mencionado tiene una forma compleja, su fabricación podría ser dificultosa. Para analizar la necesidad o no de adoptar una geometría similar, se tomó un diseño más simple que cumpla las mismas

funciones para calcular las tensiones y deformaciones producidas en él. De esta forma, se podrá determinar las razones de la fabricación del modelo complejo, verificar su eficiencia en lo que respecta a tamaño, proceso y costo de producción, comparado con el modelo simple.

El procedimiento consistió buscar la longitud a la que la punta de una chapa con forma de T se deforme resultando un desplazamiento igual al del modelo analizado analíticamente, ambos con el mismo espesor. Esta manera nos permitiría comparar el tamaño equivalente y las tensiones desarrolladas para una misma deformación.

La configuración de “T” se seleccionó para que el tramo más extenso funcione de viga en voladizo y el tramo corto sirva de sujeción.

Para realizar la simulación, se tomó el valor de tamaño del elemento de mallado por defecto del programa (0,1). Se establecieron las restricciones proponiendo una sujeción equivalente a la que producirían dos tornillos en el tramo corto de la T, empotrando las caras circulares de los alojamientos, como se puede observar en la figura 30 (cuadrados grises).

En las figuras 30, 31 y 32 se puede observar el diseño con su máxima tensión, su desplazamiento pico en la punta en dirección axial y el mismo en la dirección tangencial, respectivamente.

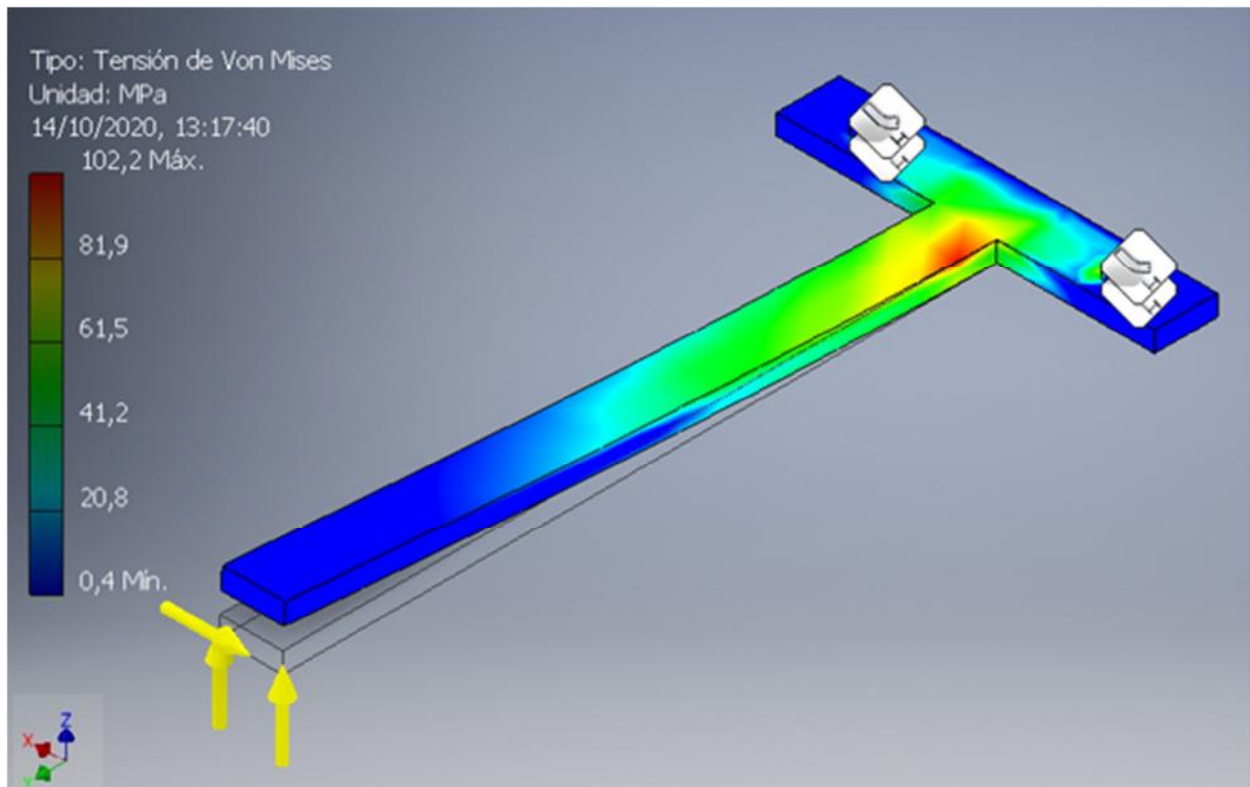


Figura 30. Tensión de Von mises modelo viga simple bajo un estado de carga máximo de 100 N en sentido transversal (z) y 25 N en sentido longitudinal (x).

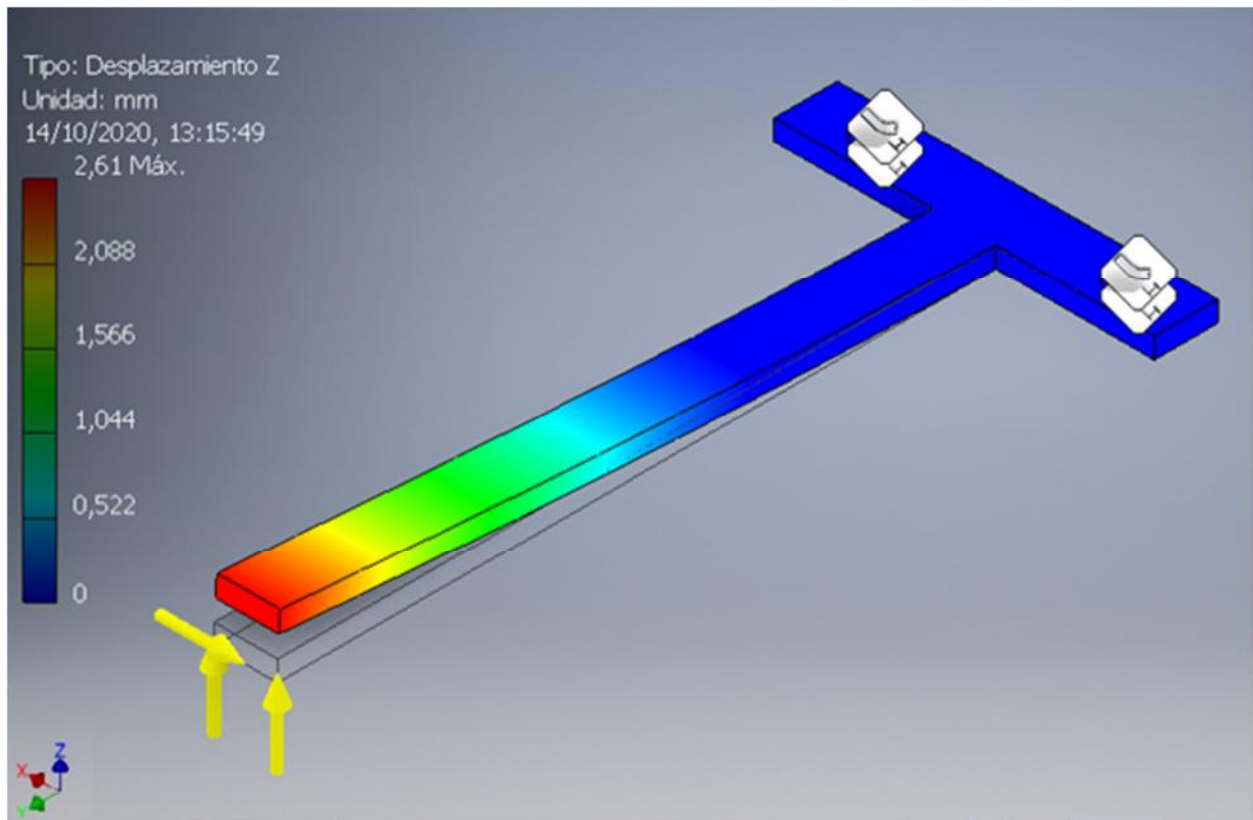


Figura 31. Desplazamiento transversal modelo viga simple bajo un estado de carga máximo de 100 N en sentido transversal (z) y 25 N en sentido longitudinal (x).

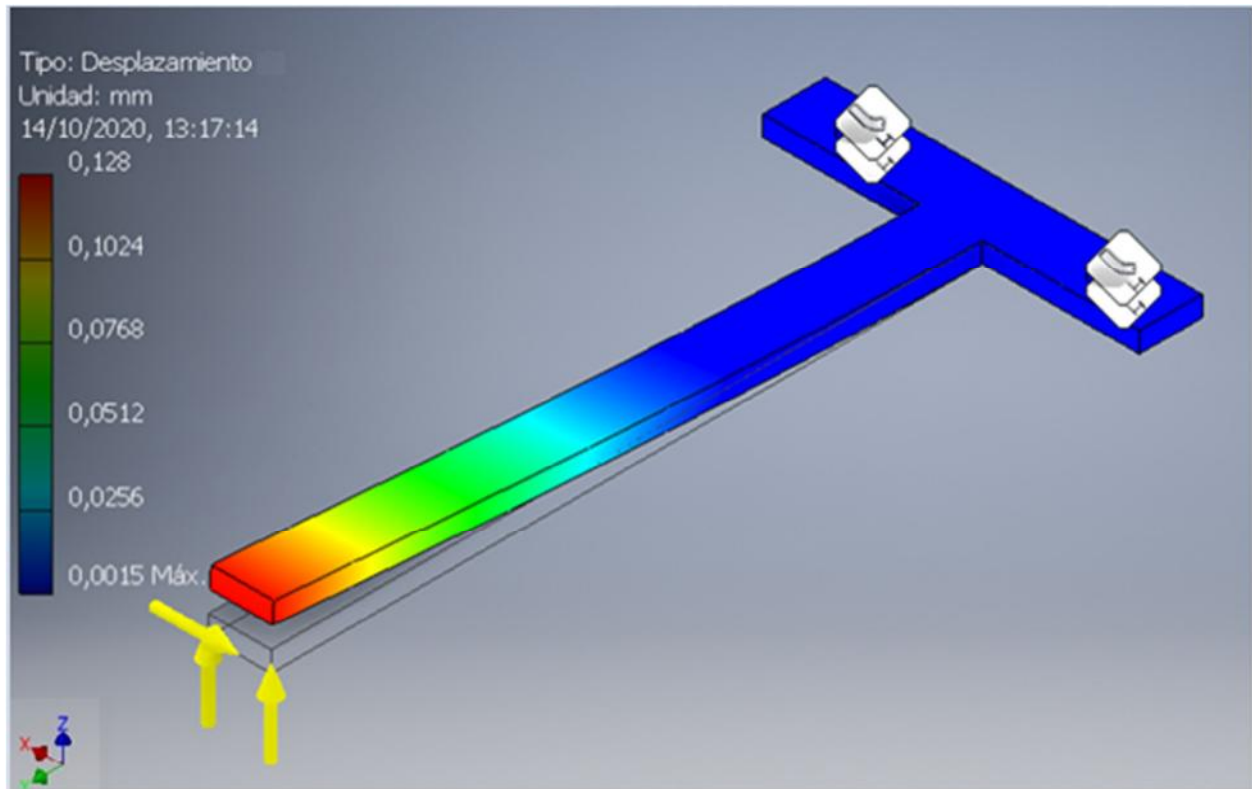


Figura 32. Desplazamiento tangencial modelo viga simple bajo un estado de carga máximo de 100 N en sentido transversal (z) y 25 N en sentido longitudinal (x).

Se pudo constatar que el resultado arrojado por el software concuerda con el modelo analítico, validados su uso en las condiciones propuestas. Posteriormente se realiza el análisis en un cantilever de geometría más compleja y se compara con el modelo simple.

Modelo complejo

En primera instancia, se confeccionó un cantilever con medidas exteriores de 50 x 20 mm y espesor 2 mm, un tamaño similar al especificado en el documento de donde fue extraído el diseño (Figura 25), con el fin de analizar las tensiones y deformaciones desarrolladas en él. [x]

En el caso de utilizar un modelo de cantilever, se utilizará el mismo microactuador presente en el equipo actual. Debido a esto, las sollicitaciones a aplicar para el análisis

del cantilever podrían ser las máximas admisibles para el microactuador , no pudiendo sobrepasar las mismas para asegurar el uso correcto del dispositivo (100N transversal y 25N longitudinal).

Se realizó una simulación en Autodesk Inventor verificando como respondía el cantilever bajo la situación de carga máxima deseada para el ensayo. Se evaluó el desplazamiento de la punta en sentido normal y tangencial y la tensión de Von Mises producida.

Los esfuerzos y deformaciones alcanzados en el modelo fueron excesivos dado el bajo espesor y el material empleado. La tensión máxima de Von Mises fue de 4659 Mpa y desplazamientos máximos de 25,1 mm en la dirección transversal al microactuador y de 0,837 mm en la dirección longitudinal del mismo (figuras 33, 34 y 35).

De ahora en más, se referirá a la dirección transversal al microactuador como dirección transversal o axial (z) y a la dirección del movimiento alternativo del microactuador como dirección tangencial o longitudinal (y).

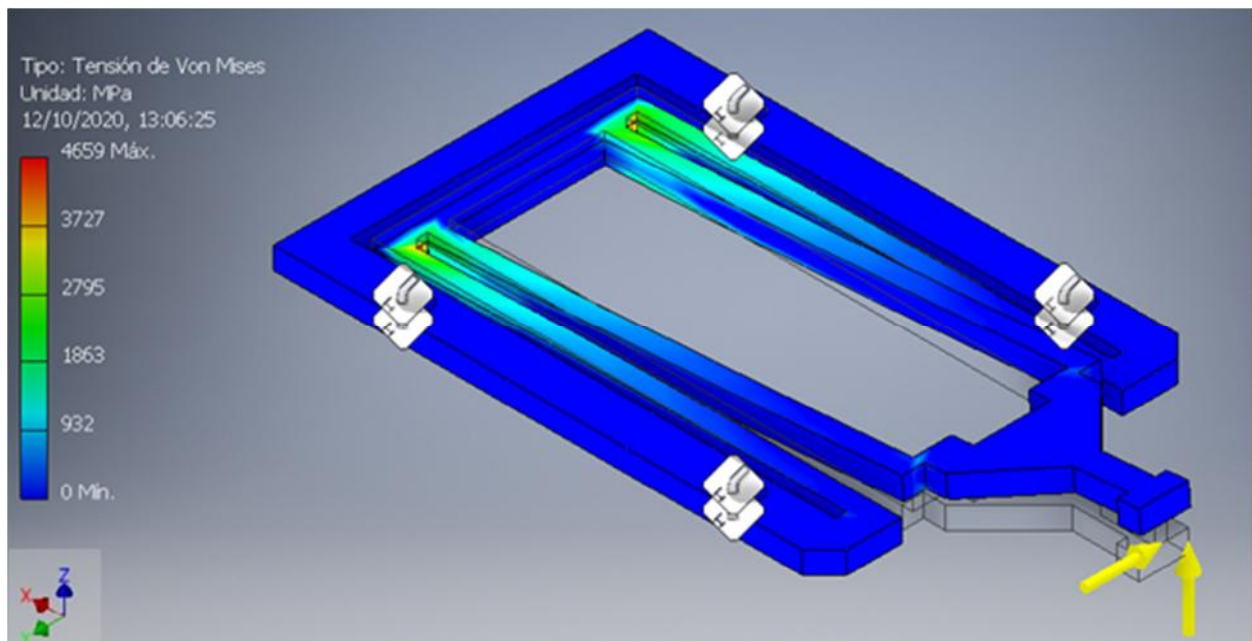


Figura 33. Tensión Von Mises para modelo 50 mm x 20 mm bajo un estado de carga máximo de 100 N en sentido transversal (z) y 25 N en sentido longitudinal (y).

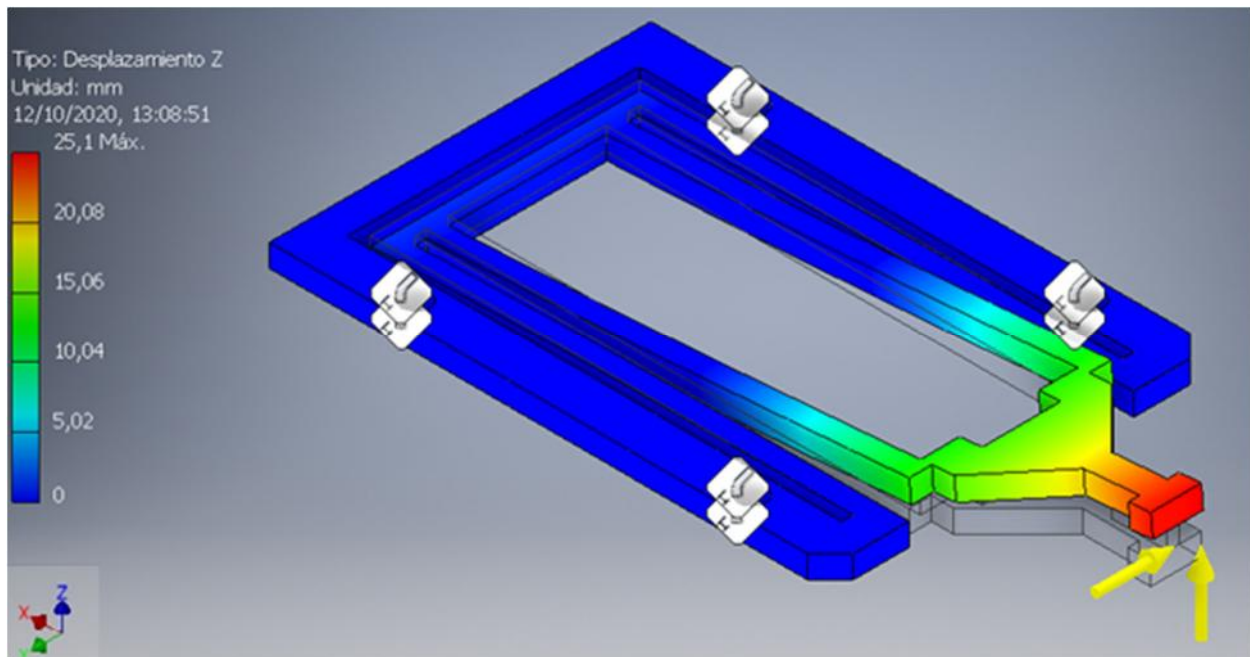


Figura 34. Desplazamiento transversal (z) modelo 50 mm x 20 mm bajo un estado de carga máximo de 100 N en sentido transversal (z) y 25 N en sentido longitudinal (y).

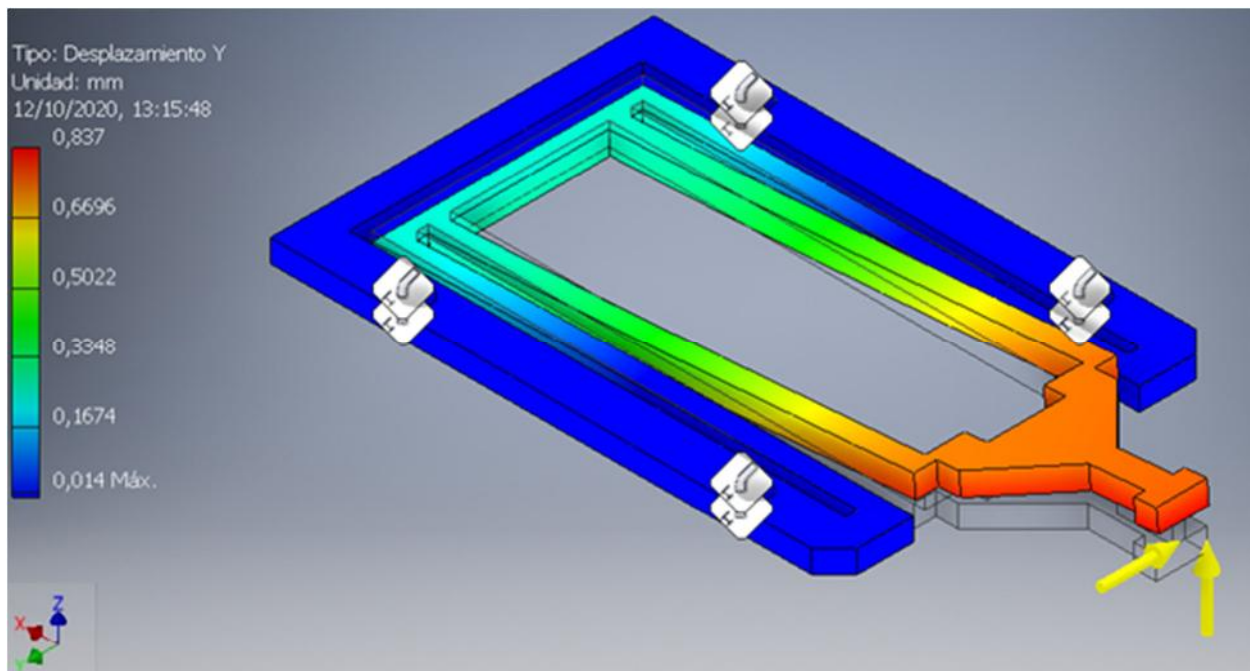


Figura 35. Desplazamiento tangencial modelo 50 mm x 20 mm bajo un estado de carga máximo de 100 N en sentido transversal (z) y 25 N en sentido longitudinal (y).

Al obtener este análisis con las solicitaciones máximas permitidas para el microactuador en donde el elemento estaría prácticamente colapsado considerando como materiales constituyentes los aceros más comunes y accesibles en el mercado (SAE 1010, 1045 o 4140) los cuales poseen una tensión de fluencia no mayor a 700 MPa. Se procedió a agrandar las dimensiones. Se elige seguir este camino para reforzarlo y también debido a una cuestión de comodidad, ya que debido al tamaño de microactuador y celda sería más conveniente trabajar con algo de dimensiones similares a una mano. Por este motivo, se ampliaron las medidas a un poco más del triple del modelo inicial, procurando mantener proporciones similares al diseño de partida para que se comporte de una manera análoga. Las dimensiones exteriores del nuevo modelos son: ancho 80 mm, largo 160 mm y espesor 6.4 mm.

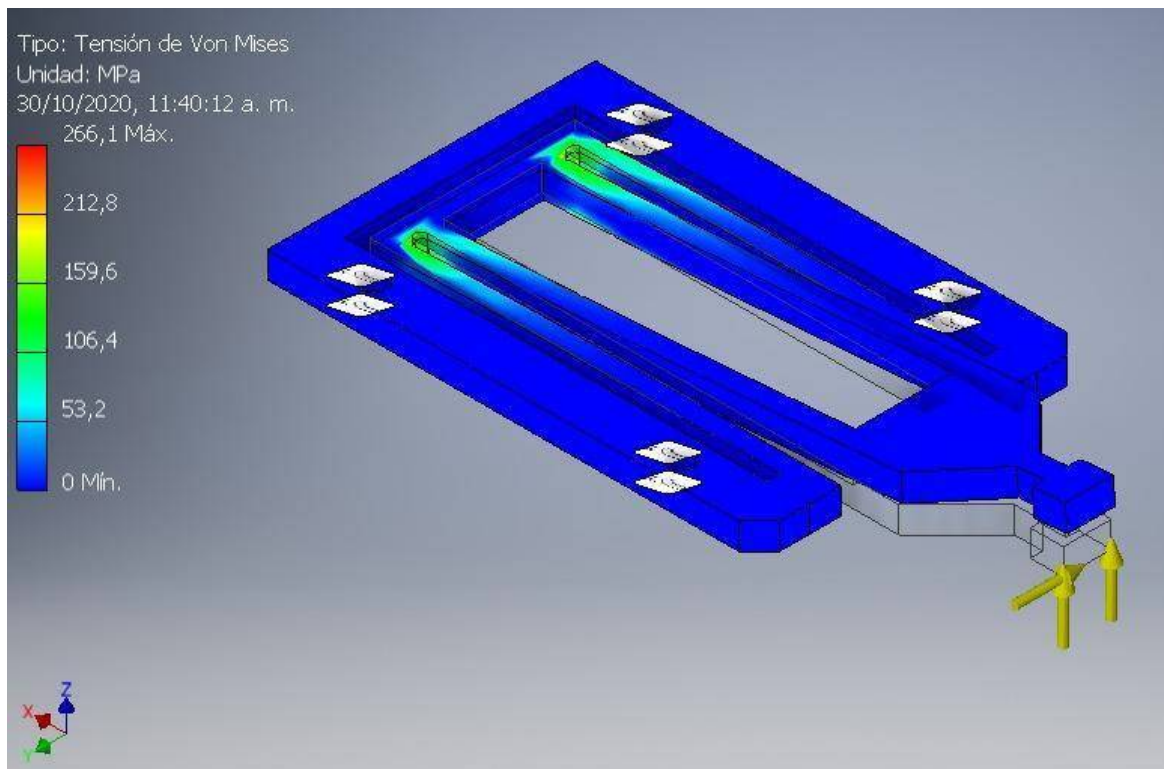


Figura 36. Tensión Von Mises modelo definitivo bajo un estado de carga máximo de 100 N en sentido transversal (z) y 25 N en sentido longitudinal (y).

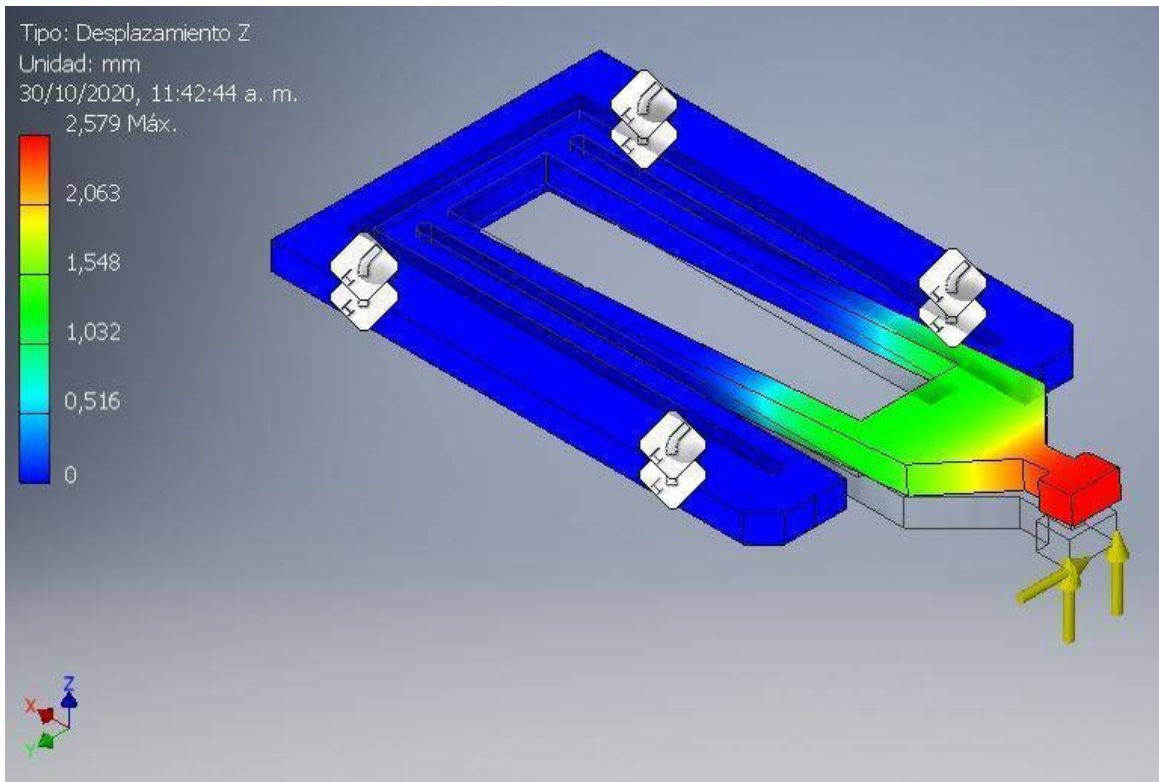


Figura 37. Desplazamiento transversal modelo definitivo bajo un estado de carga máximo de 100 N en sentido transversal (z) y 25 N en sentido longitudinal (y).

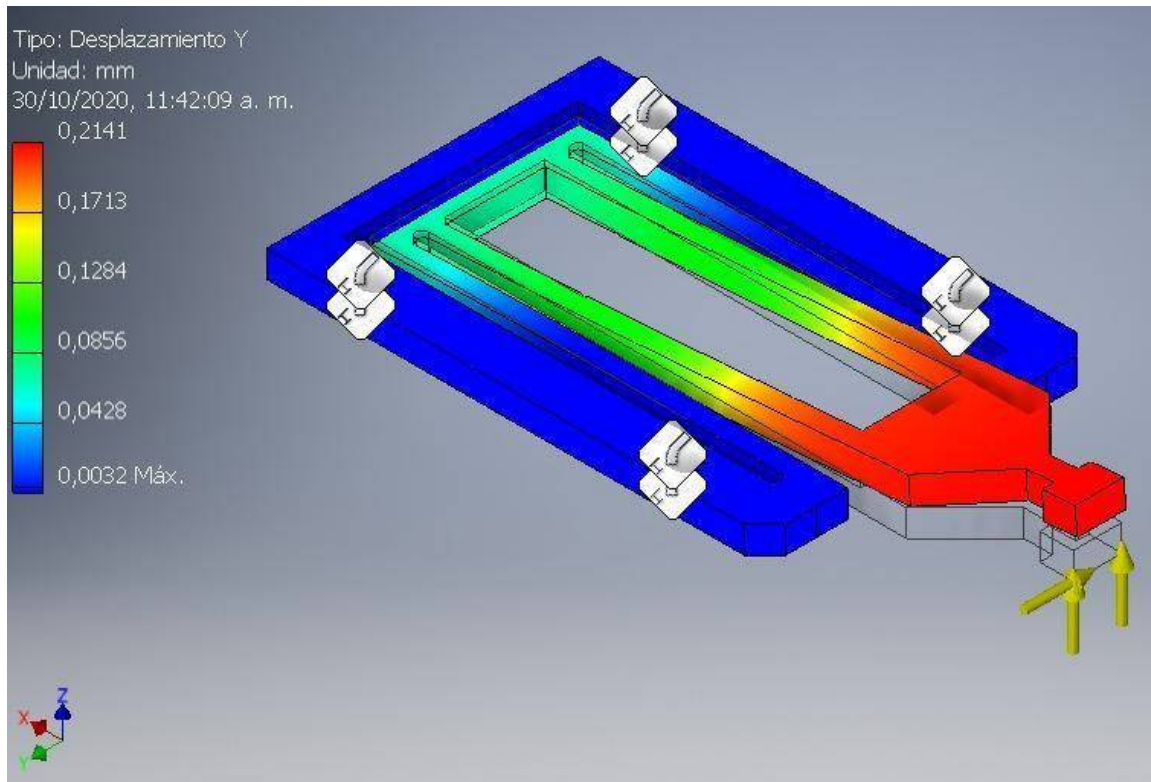


Figura 38. Desplazamiento tangencial modelo definitivo bajo un estado de carga máximo de 100 N en sentido transversal (z) y 25 N en sentido longitudinal (y).

Como se puede observar en las figuras 36, 37 y 38 los desplazamientos y esfuerzos disminuyen considerablemente con el nuevo tamaño de modelo. Resulta una tensión máxima de Von Mises de 266,1 MPa, un desplazamiento máximo en la punta de 2,579 mm en la dirección vertical y 0,214 mm en la dirección tangencial. Luego, de este análisis se consigue un tamaño apropiado para una posible aplicación.

Adicionalmente, se realizó el mismo análisis de comportamiento de este ejemplar frente a diferentes espesores, con el fin de determinar la cota óptima. En tabla 1 a continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada espesor.

Análisis	Espesor [mm]			
	6	6,4	6,5	7
Desplazamiento vertical [mm]	3,118	2,579	2,465	1,986
Desplazamiento horizontal [mm]	0,228	0,214	0,21	0,196
Tensión Von Mises [Mpa]	304,1	266,1	269,6	248,1
Frecuencia natural modo 1 [Hz]	121	129	131	141
Frecuencia natural modo 2 [Hz]	204	205	205	205
Frecuencia natural modo 3 [Hz]	263	280	283	303

Tabla 1. Características de diferentes espesores de cantilever.

Cabe aclarar que en un principio se optó por un espesor de 6.5 mm, pero por cuestiones de mecanizado (desarrollado más adelante) resultó de 6.4 mm, por este motivo se realizó un análisis para esa medida.

Realizando un análisis de tensiones modal en Inventor, se extrajeron las siguientes frecuencias naturales de oscilación:

f1: 128,75 Hz

f2: 204,54 Hz

f3: 279,14 Hz

Para realizar una evaluación de ventajas y desventajas frente a las frecuencias naturales de los modelos, se debe considerar que los valores más comunes en los ensayos de fretting son de 1 a 10 Hz. Por este motivo se busca tener frecuencias naturales altas para evitar que el sistema entre en resonancia.

Comparación entre modelo simple en T y cantilever complejo

Con el propósito de aproximar lo más posible los modelos, se propuso un ancho de la viga T en el tramo largo equivalente a la suma de los anchos de cada parte en voladizo que posee el cantilever, resultando una cota de 20 mm.

Para que la punta genere el mismo desplazamiento que el cantilever, este modelo debe ser de 227 mm de largo, es decir 67 mm más largo.

Las frecuencias naturales de este modelo resultaron:

f1: 97,29 Hz

f2: 395,46 Hz

f3: 601,43 Hz

A continuación, se presentan las ventajas y desventajas de cada configuración con el fin de determinar cuál se adapta mejor a los objetivos propuestos.

Modelo en T

Ventajas:

- Simple fabricación
- Menor tensión máxima respecto del modelo complejo, a igual deformación.

Desventajas:

- Primera frecuencia natural más baja
- Menor desplazamiento tangencial, por ende menor rango para medir fuerza de fricción
- Difícil calibración de la carga, debido a que solo está sujeto desde atrás
- Dispositivo muy largo

Modelo complejo

Ventajas:

- Mayores frecuencias naturales, nos alejamos de las frecuencias de ensayo
- Regulación más sencilla de la carga debido a su geometría
- Menor longitud

Desventajas:

- Mayor tensión respecto a T
- Mayor complejidad de fabricación

A la hora de decidir, se priorizó la brecha entre las frecuencias naturales y las de ensayo, la regulación de carga, desplazamientos y tamaño. Por lo tanto se concluye que, en caso de elegir la configuración de trabajo analizada en esta sección, se optaría por el modelo complejo.

Comparación entre modelos

En la descripción de cada diseño se mencionaron y explicaron las posibles ventajas y desventajas que presentarían. En la tabla 2 a continuación se muestran todas ellas, con el fin de visualizar de forma más clara y poder comparar más cómodamente.

Cantilever		Barra en L		Modelo Inicial	
Pros	Contras	Pros	Contras	Pros	Contras
Simple fabricacion	Calibracion mas dificilosa debida a la utilizacion de dos sensores	Simple regulacion de carga mediante discos	Dificultad en medicion fuerza tangencial	Bajo costo	Dificultosa medicion de fuerza de friccion
Bajo costo	Preparacion de probetas mas precisa		Fabricacion mas compleja (mayor numero de piezas y tamaño)		Desplazamiento del punto de aplicacion de la carga
Pocas piezas moviles	Rango más acotado de cargas y desplazamientos		Mayor costo		Restriccion de carga al peso de la varilla
					Modificacion de carga debido a precarga de rodamientos axiales
					Imperfecciones en la huella debida a la deformacion de la estructura

Tabla 2. Lista de ventajas y desventajas de cada modelo analizado.

Las ventajas son la fabricación menos compleja y ensamble sencillo, ya que como se dijo anteriormente, resume una cantidad importante de piezas en una sola. Además, esto implicaría un bajo costo relativo.

Posibles desventajas serían, la necesidad de usar sensores para medir las deformaciones, probablemente requeriría una preparación de probetas más precisa, debido a que la carga se aplica mediante una pequeña deformación del cantilever y se contaría con un rango más acotado de cargas y desplazamientos ya que ambos están sujetos a la deformación propia del dispositivo.

Relación entre desplazamiento de la punta y la carga

Una vez definidas las dimensiones del cantilever a utilizar, se debería establecer una relación entre lo que se deforma la punta del mismo y la fuerza que está aplicando en las direcciones horizontal y vertical, ya que los valores que devuelvan los sensores o el elemento que se utilice para medir los desplazamientos servirían para este propósito, pero no lo hacen de forma directa. Mediante la herramienta análisis de tensión de Autodesk Inventor, se fue simulando la deformación que sufre la punta del cantilever a

medida que se incrementa la fuerza normal, en saltos de 10 N en un intervalo de 0 a 100 N. Los resultados se pueden observar en la tabla 3.



Tabla 3. Aproximación de la carga aplicada.

Luego trasladando estos valores a una curva de Excel se pudo obtener una ecuación que vincula los datos, la cual podría ser plasmada en el código de programación que se utilice para graficar las curvas según las medidas arrojadas por los sensores (gráfico 1).

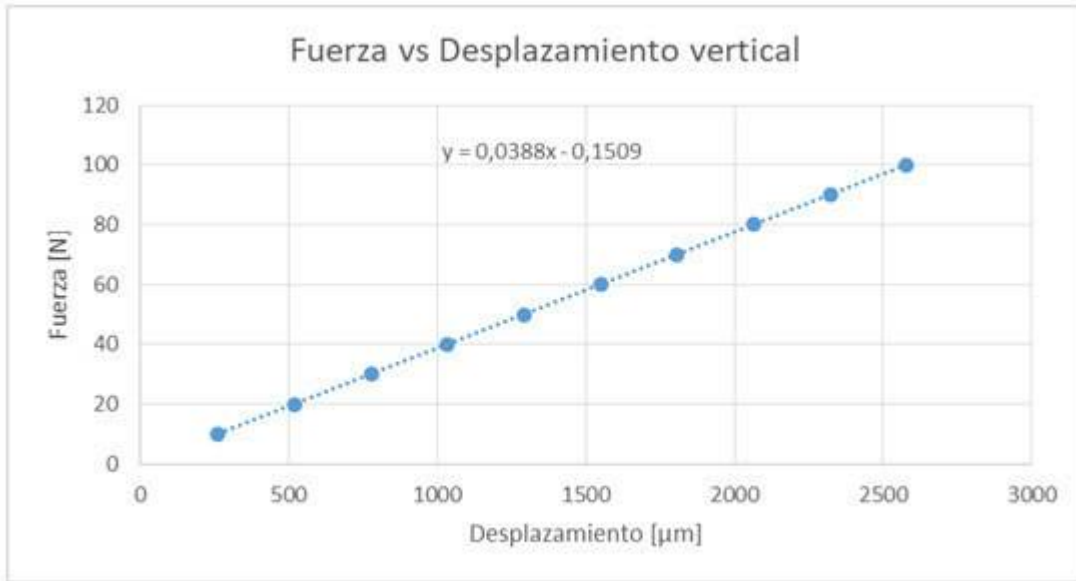


Gráfico 1. Relación fuerza-desplazamiento en sentido transversal.

Análogamente, se realiza el cálculo para el desplazamiento tangencial (tabla 4) simulando con un portaesferas de 5 mm de largo. Hay que tener en cuenta que al utilizar un portaesferas la fuerza de roce genera un momento que tiende a rotar el cantilever. Esto podría traer complicaciones con los sensores pero no es así porque el ángulo de giro es muy pequeño.



Tabla 4. Aproximación de la fuerza tangencial.

Nuevamente trasladando estos valores a una curva de Excel se pudo obtener una ecuación que vincula los datos, la cual podría ser plasmada en el código de programación que se utilice para graficar las curvas según las medidas arrojadas por los sensores (gráfico 2).

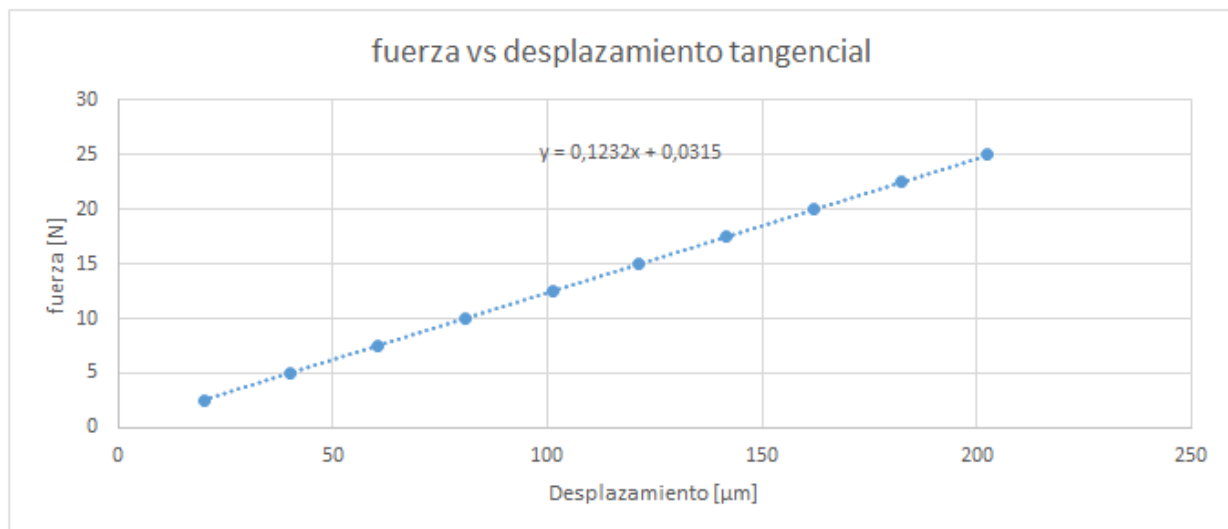


Gráfico 2. Relación fuerza-desplazamiento en sentido longitudinal.

Sistema de carga

El siguiente paso a definir para el diseño de esta máquina es el sistema de seteo de carga, es decir la manera a través de la cual se aplicará y regulará la fuerza aplicada a la probeta. Para ello se debe presionar la punta de contacto ubicada en el extremo del cantilever contra la superficie a ensayar. Al presionar, el cantilever se deformará dentro del campo elástico produciendo un desfase entre los planos de apoyo y el extremo. Para ello se debe diseñar un sistema que permita generar ese desfase y mantenerlo durante el ensayo. Como en todas las decisiones tomadas, se analizaron tres alternativas que se desarrollan a continuación:

Cuatro guías lisas con levas o prisioneros

Este sistema consiste en cuatro columnas, dos en la parte delantera (lado de la punta) y dos en la trasera. Estas se fabricarían cilíndricas, de acero, con ajuste deslizable con el cantilever. Una vez establecida la posición deseada, se fijaría el conjunto mediante un sistema de levas excéntricas que interrumpirán el deslizamiento, por medio de presión y fuerza de roce.

El inconveniente principal de este sistema es que, al momento de fijar el cantilever se debe trabar las levas a las columnas mediante una fuerza aplicada sobre las mismas. Esto podría generar algún pequeño desplazamiento del dispositivo respecto de la posición deseada y al estar trabajando con distancias micrométricas traería consigo errores no aceptables para el ensayo.

El método de sujeción por levas podría ser reemplazado por uno igualmente efectivo, pero levemente más trabajoso de aplicar, si se utilizaran tornillos prisioneros en sentido radial. El principal problema de esta técnica es que, al trabajar mediante presión localizada, con el pasar del tiempo las guías se verían dañadas dificultando la fijación por prisioneros. Esto se mitigaría empleando patines de contacto blandos intermedios, o bien sustituyendo periódicamente las columnas.

Dos guías, dos tornillos

Esta alternativa cuenta en la parte delantera con dos varillas roscadas de paso ultrafino con tuercas para la sujeción de las mismas y en la parte trasera dos guías similares al caso anterior analizado. La regulación del giro necesario se haría de forma manual ajustando las tuercas en la posición deseada mediante llaves.

Como ventaja esta opción permite, con los cálculos necesarios, tener una mayor precisión del deslizamiento vertical de la estructura para lograr la posición deseada que corresponde a la fuerza necesaria para el ensayo. Las desventajas que presenta son las mismas del caso anterior ya que se debería contar con dos prisioneros o levas.

4 varillas roscadas

El sistema consta de una estructura superior solidaria al cantilever y una inferior fija a la breadboard. La primera se acerca o se aleja de la inferior desplazándose a lo largo de varillas roscadas pasantes en ella.

En la pieza superior la varilla está roscada en el interior de un buje que tiene un ajuste deslizante con respecto a la estructura superior, permitiendo una fácil regulación de la distancia desplazada en sentido vertical. El hecho de que el buje deslice con respecto a la estructura tiene como contra que no permitiría fijar la posición correctamente. Para corregir esto en la cara superior del soporte se hace presión sobre la superficie por medio de una arandela, y la cara inferior el buje queda dentro de una muela permitiendo que con una arandela con dimensiones superiores a esta se fije el sistema en su posición correcta.

La ventaja más considerable que presenta este método es la fácil regulación del desplazamiento necesario para generar la sollicitación requerida, debido a que ambos lados del sistema se moverían en conjunto con el mismo paso de rosca. Otra característica favorable de esta opción es que al no contar con levas ni prisioneros, la posición deseada no se vería alterada por el ajuste en ella, ya que con la tuerca ubicada

en la parte superior de la varilla, la carga queda establecida y sólo restaría ajustar la tuerca inferior.

Este último beneficio trae aparejado una desventaja, el hecho de tener que desajustar y ajustar 8 tuercas cada vez que se modifica la carga o se finaliza el ensayo.

Contemplando las ventajas e inconvenientes presentes en cada alternativa planteada, se decide utilizar la última, la de 4 varillas roscadas. En las figuras 39 y 40 se puede apreciar con mayor claridad el diseño final mencionado.

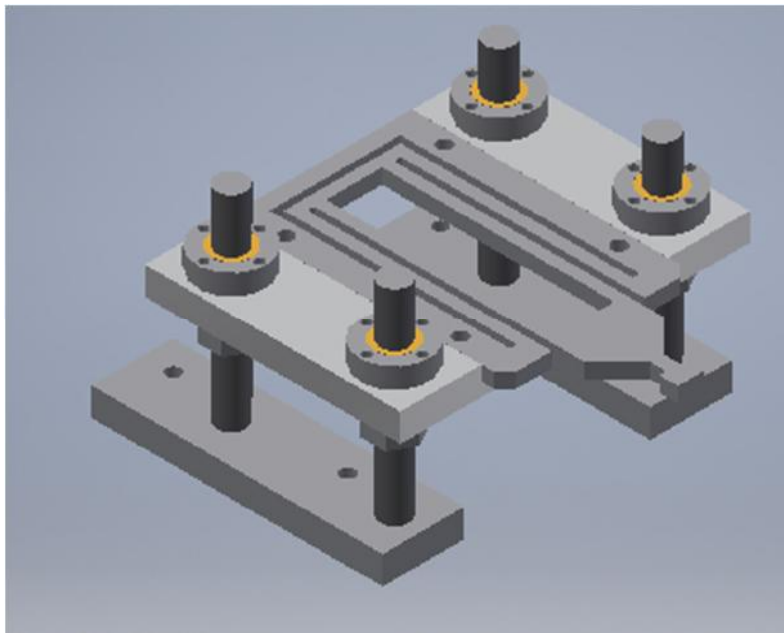


Figura 39. Diseño del conjunto ensamblado.

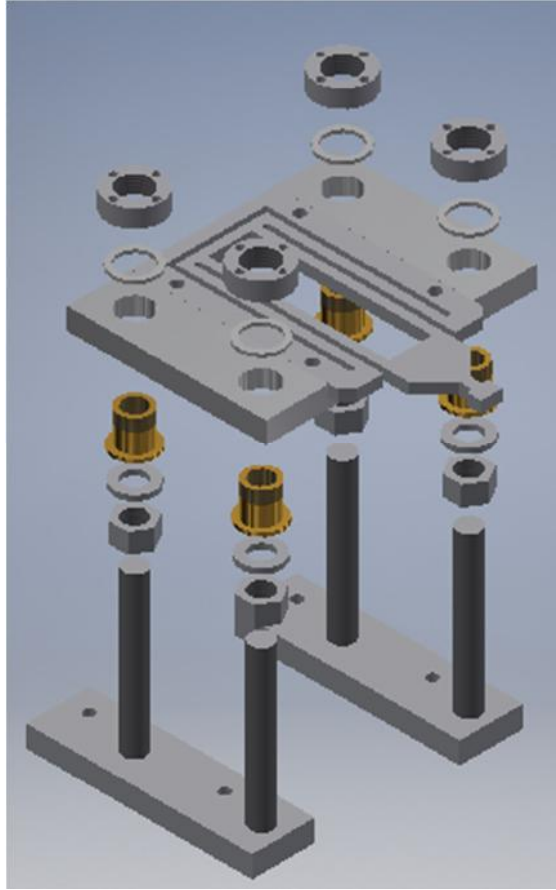


Figura 40. Isometría explotada del conjunto.

Sensores

Analizando las alternativas según un enfoque económico, complejidad de fabricación y facilidad de adquisición de elementos necesarios, se concluyó que la mejor opción era utilizar sensores ópticos. Como era de suponerse, también hay varias clases de sensores ópticos, pero gracias al asesoramiento del profesor Arenas, se pudo establecer que la alternativa más simple, y no por eso menos efectiva, era la del sensor tipo “Y”. Su principio de funcionamiento se encuentra detallado en la introducción.

Ahora las cuestiones radican en cuántos serían y dónde estarían ubicados estos sensores, por lo que se presentaron las siguientes alternativas:

- 1 solo sensor tangencial:

Una primera opción, sería la de colocar un dispositivo que mida únicamente el desplazamiento en la dirección longitudinal en la punta del cantilever con el objetivo de obtener con más precisión la fuerza de fricción aplicada a la probeta, variable muy importante para el aporte del ensayo.

Como el movimiento en la dirección restante es necesario sólo para conocer la carga a la cual estaría sometida la muestra, se podría obviar el sensor en dicho caso, ya que esta magnitud se puede lograr con una buena aproximación mediante la propia deformación del sistema de carga (cuanto más se eleve el extremo móvil del cantilever, mayor será la fuerza que genere en sentido contrario).

La gran ventaja de esta opción es la simplicidad de aplicación, ya que requiere un solo instrumento y calibración del mismo. Su desventaja es menor precisión en la aplicación de carga que si se contara con otro sensor en esa dirección, y además no se podría apreciar una variación en la fuerza debida por ejemplo a una disminución en el espesor.

- 1 solo sensor en ángulo

Una alternativa en caso que se cuente con un solo sensor, pero se desee conocer también la carga aplicada de una forma más precisa y su variación a lo largo del transcurso de los ensayos, es la de ubicar el instrumento en una dirección oblicua, en la cual se podrían captar ambos desplazamientos mediante el sensor. Este método requeriría un paso posterior de análisis de la señal con el fin de desglosar su resultado en cada movimiento ortogonal.

Con este método se obtendrían 2 curvas sinusoidales desfasadas 90 grados entre sí, con una amplitud igual a la distancia de desplazamiento desde el punto central hasta el extremo:

$$y = d * \text{sen}(\alpha)$$

Ecuación 2. Desplazamiento transversal.

$$x = d * \text{cos}(\alpha)$$

Ecuación 3. Desplazamiento tangencial.

Siendo:

- y: Desplazamiento vertical.
- x: Desplazamiento tangencial.
- d: Desplazamiento.
- α : Ángulo entre la horizontal y el plano de medición.

Inconvenientes:

- Dificultosa calibración en ángulo.
- Mecanizado complejo para lograr el ángulo deseado.
- Engorroso análisis de datos del desplazamiento vertical. Ya que una vez establecido en un punto varía muy poco, y en este caso sería necesario obtenerlo de la senoide.

Seleccionar esta opción tiene como ventaja al igual que la anterior, el uso de un solo sensor. En cuanto a la aplicación, sería considerablemente más dificultosa, debido a que al ser necesario ubicar el sensor en ángulo, se debería colocar una superficie reflectante inclinada en la punta o cerca de ella (si se utilizará un sensor óptico), además de que el movimiento de esta cara no sería exactamente en la dirección de medición, por lo que traería aparejado un error importante en la medición y un inconveniente en la calibración.

Otra desventaja es que se debe hacer un análisis de la señal recibida y cualquier variación que en ella se produzca debido a que puede implicar un desplazamiento en una dirección o en ambas.

- 2 sensores (1 vertical y otro horizontal)

Por último, se consideró colocar un sensor para cada dirección de desplazamiento, es decir uno en la dirección tangencial (horizontal) y otro en la dirección transversal o de carga (vertical).

Esta forma sería la más precisa ya que independiza los movimientos de fricción y de carga, además permitiría observar cómo varía la carga a medida que transcurre el ensayo debido a la pérdida de espesor en la probeta.

Por supuesto es la más costosa al precisar dos sensores. En cuanto a la calibración, sería el doble de trabajo que la primera opción, pero no tan dificultosa como la segunda.

Contemplado todo lo dicho, se concluyó que la alternativa más conveniente es la última, de dos sensores. Esto se debe a que se considera importante la variación de la carga, sumado a la facilidad de trabajar con dos sensores independientes. En lo que respecta al costo, para los beneficios que brinda y por tratarse de sensores ópticos de LED, es despreciable su incremento.

Con el fin de verificar la altura establecida por el sistema de carga y que el valor devuelto por el sensor vertical sea el correcto, se decide acoplar un tope micrométrico solidario a la parte fija del cantilever, pero con la punta apoyada en la parte móvil. De esta manera, una vez modificada la altura de la parte móvil del cantilever, se hará girar el micrómetro del tope hasta que toque la superficie, devolviendo el valor recorrido.

El último paso a definir en lo que respecta al diseño de la máquina para poder avanzar sobre la compra o fabricación de componentes serían los soportes de los sensores, del tope micrométrico y de las esferas de contacto.

Soporte tope micrométrico

Para el diseño de este elemento sólo deben tenerse en cuenta dos aspectos importantes. La primera es que el tope no se mueva (principalmente en sentido axial) para que el valor que arroja sea el correcto indicador de la distancia que se desplazó la fracción móvil del cantilever. La segunda es que el soporte se acople a la máquina de forma que no entorpezca su funcionamiento o su cómoda operación.

Por lo comentado, se decide fabricarlo de una chapa fina, con la forma que se muestra en la figura 41, donde se puede observar que posee un tubo diseñado con el objetivo de que aloje la parte cilíndrica, y un orificio en el mismo para colocar un tornillo prisionero con forma cónica en la punta para que no dañe el cilindro menor móvil.

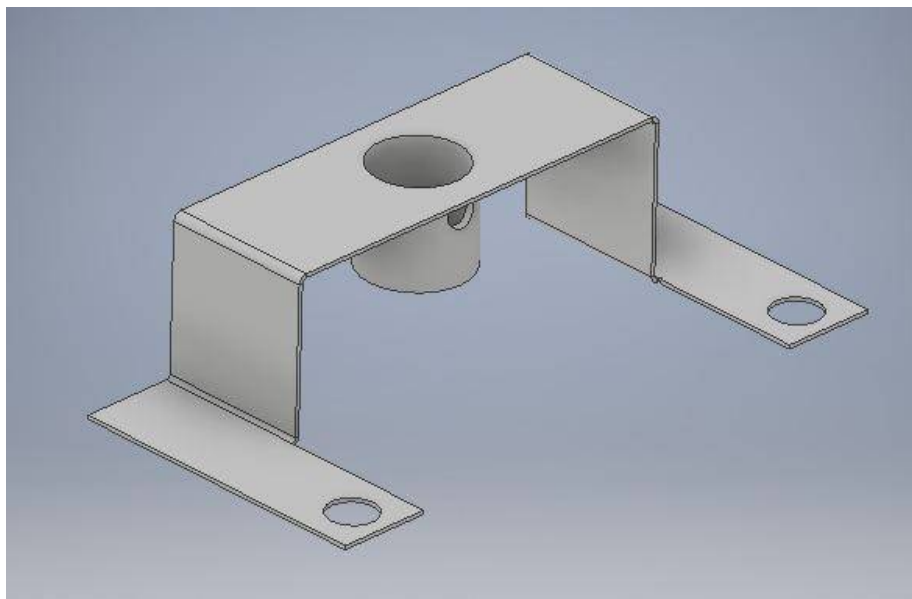


Figura 41. Diseño de soporte para tope micrométrico.

Para comprender la ubicación del mismo en la máquina se puede observar la figura 42 donde se cambió a color dorado para contrastarlo.

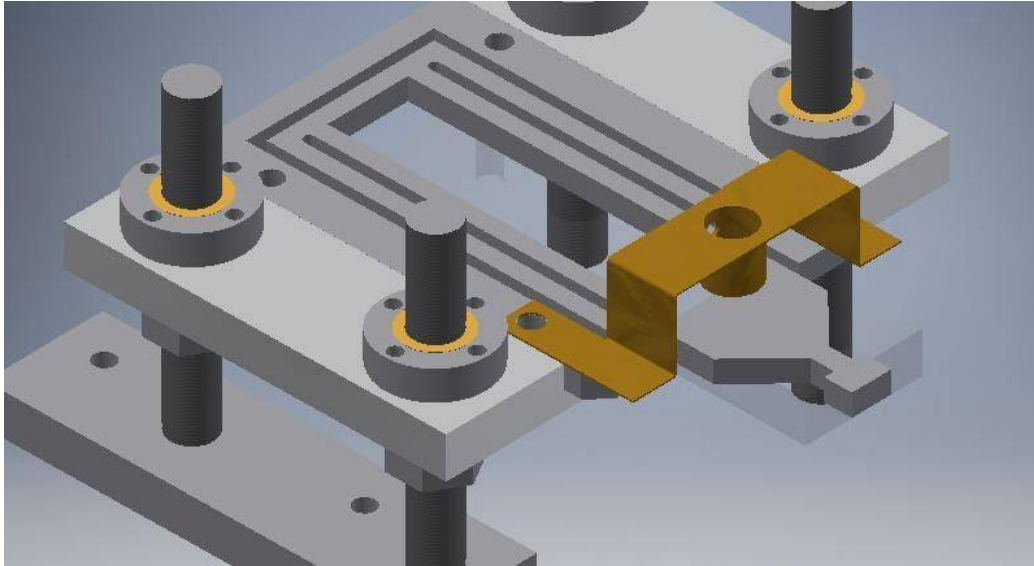


Figura 42. Soporte para tope micrométrico colocado en el conjunto.

Soporte de sensores

Las consideraciones básicas para diseñar este elemento fueron las mismas que el soporte para tope micrométrico, por lo que el material y el espesor de chapa son los mismos.

En las figuras 43 y 44 a continuación se muestran el diseño de la pieza y su posición en la máquina ensamblada respectivamente.

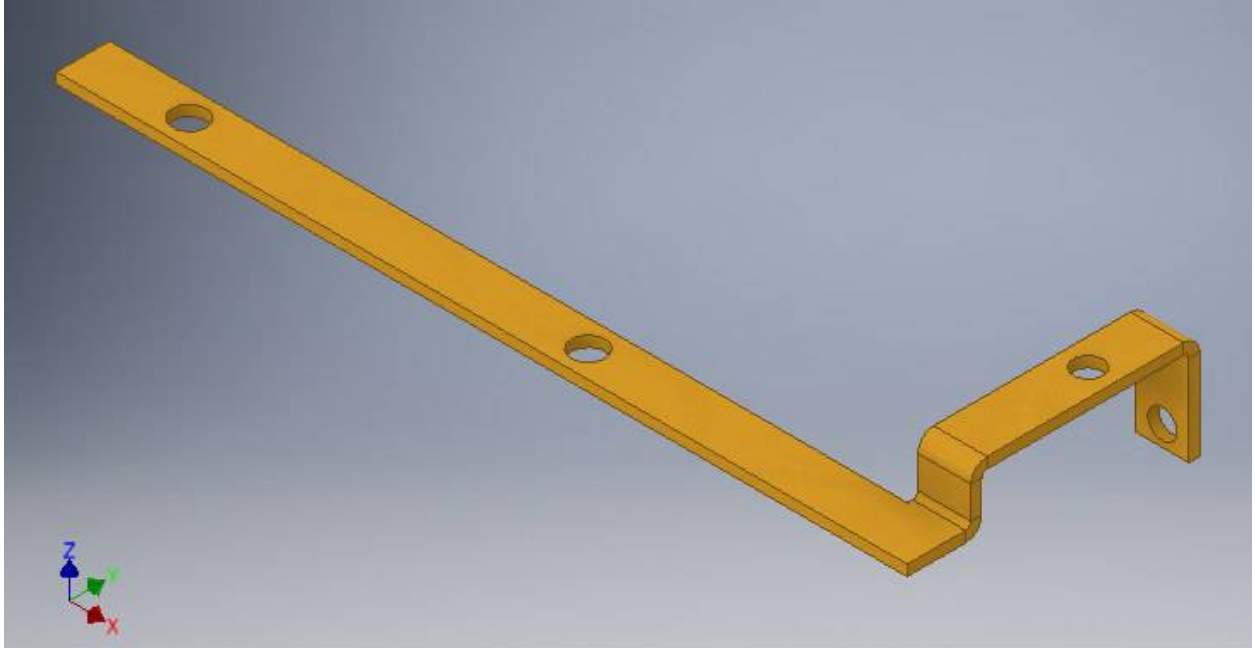


Figura 43. Diseño de soporte para sensores.

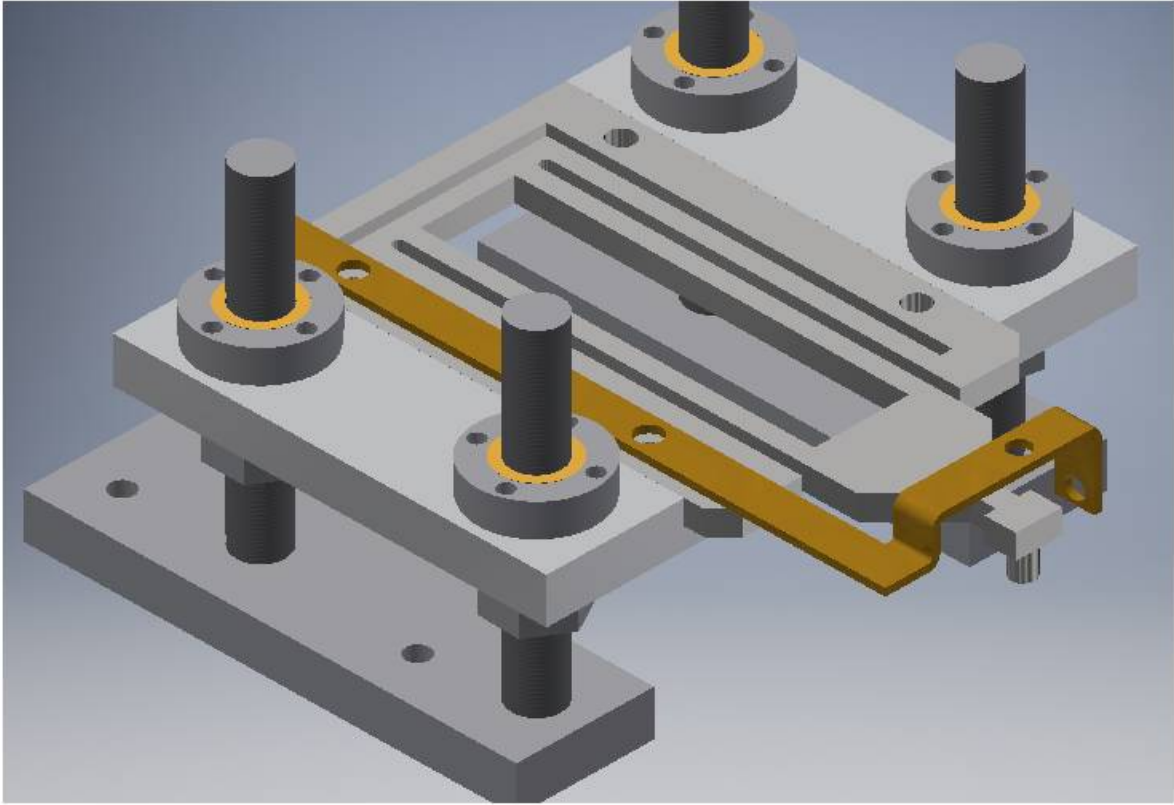


Figura 44. Soporte para sensores colocado en el conjunto.

Por último, se muestra cómo quedaría el conjunto con ambas piezas de soporte desarrolladas (figura 45).

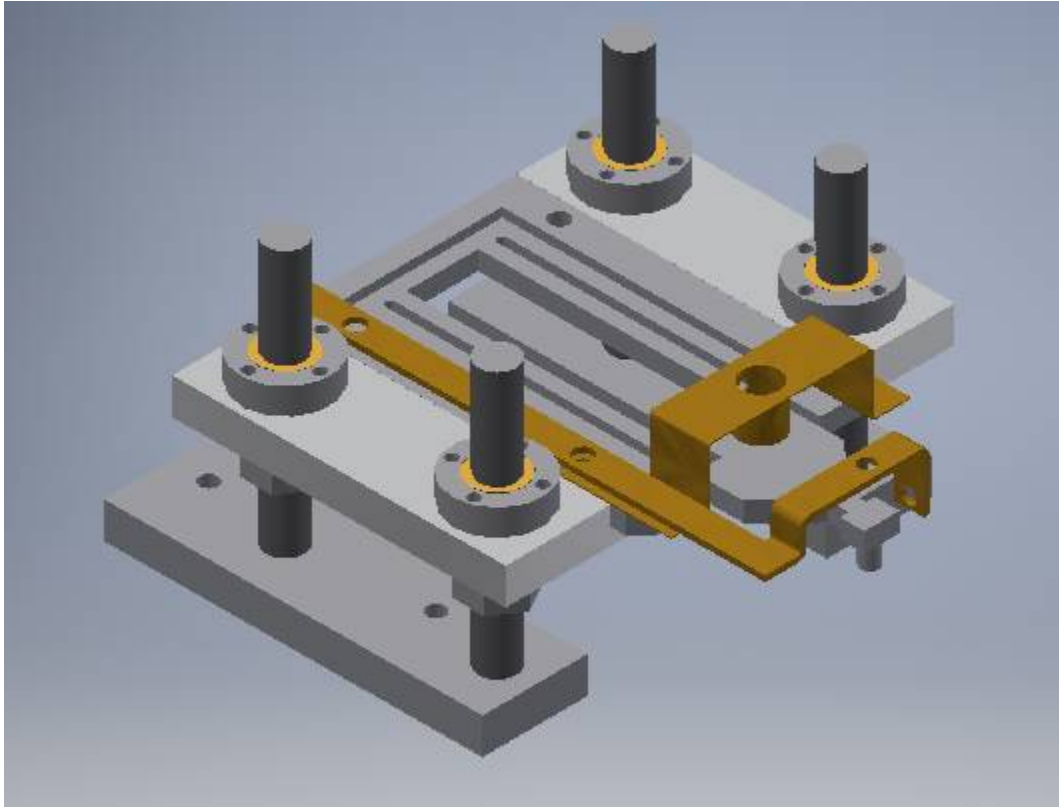


Figura 45. Soportes colocados en el conjunto.

Porta-esferas

Esta pequeña pieza debe soportar la misma fuerza de fricción a la que se somete la probeta, y por supuesto contener a la esfera de contacto en todo el tiempo que dure el ensayo. En las figuras 46 y 47 se observa el modelo del porta-esferas utilizado.

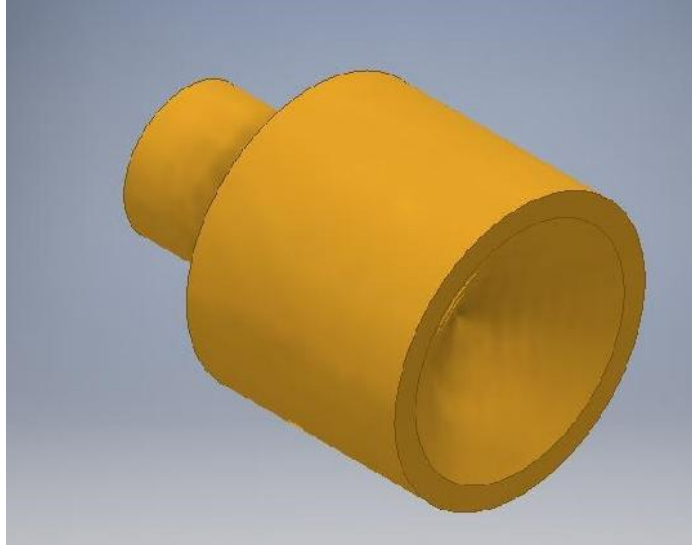


Figura 46. Porta-esferas

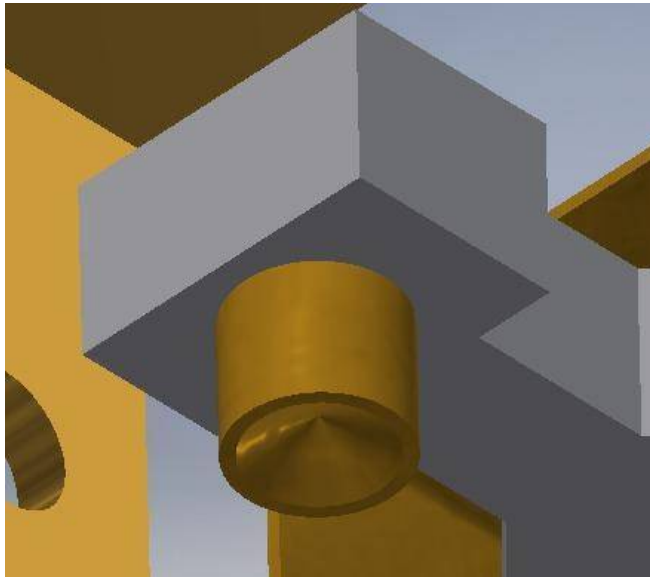


Figura 47. Porta-esferas colocado en el extremo del cantilever

Fabricación y compra de componentes

Cantilever

Como ya se dispone del plano acotado del dispositivo, restaría definir el material y el proceso de fabricación.

El material pensado desde un principio para esta pieza es acero, debido a sus excelentes propiedades mecánicas, pero por supuesto se debe hacer una selección más precisa. Por esto se debió considerar el tipo y magnitud de esfuerzos a los que está sometida.

Del análisis realizado con el software Inventor de Autodesk, se desprende que el esfuerzo combinado máximo de Von Mises presente en la pieza es de 266,1 MPa. Este deberá ser menor que el esfuerzo de fluencia del material, afectado por un coeficiente de seguridad (ecuación 4), ya que se desea evitar alcanzar este valor de tensión para que el material no se deforme plásticamente y colapse, quedando obsoleto debido a que todos los cálculos realizados variarían notablemente.

$$\sigma_{VM \text{ máx}} \leq \sigma_y \times f_s$$

Ecuación 4. Tensión máxima.

Donde

$\sigma_{VM \text{ máx}}$: tensión máxima de Von Mises.

σ_y : tensión de fluencia del material.

f_s : factor de seguridad.

Para lograr este cometido, se exploró en diversas metalúrgicas cuáles son los aceros más populares en el mercado de acuerdo a sus propiedades y costo. En la mayoría de las empresas proveedoras se obtuvo una respuesta similar, los aceros más accesibles son SAE 1010, 1045 y 4140. También se tuvo en cuenta aceros inoxidables

porque su propiedad principal podría ser de gran utilidad en la máquina, ya que la probeta se encuentra sumergida en un ambiente corrosivo, lo que podría ocasionar alguna salpicadura en el movimiento alternativo durante el ensayo, pudiendo afectar al cantilever.

En la siguiente tabla se presenta una comparación entre los 3 aceros comerciales más comunes, contemplando tensiones admisibles de fluencia y fatiga, costo y dimensiones.

Tabla 5. Comparación de las características de diferentes aceros.

Debido a su buena resistencia a fluencia y a fatiga, aptitud para tratamiento térmico (templado) y su bajo costo relativo, se seleccionó el acero SAE 4140 de 1/2" de espesor de dimensiones iniciales de 200 mm x 100 mm, comprado a la metalúrgica Wolodarsky. Se eligió este espesor porque es el menor disponible en este material.

Una vez obtenido el material de partida, se procedió a llevar la chapa al espesor correcto, mediante fresado. Se realizaron 12 pasadas de desbaste de 0.5mm y 10 pasadas de rectificado dando como resultado un espesor de 6.4 mm (figura 48).



Figura 48. Fresado sobre planchuela de Acero SAE 4140 utilizado para conformar el cantilever

Para el proceso de fabricación, los principales factores que se contemplaron fueron:

1. Complejidad de geometría.
2. Radios de acuerdo.
3. Zona afectada por calor.
4. Conicidad.
5. Costo.

1. La forma de la pieza es notablemente compleja, por lo que las dos primeras opciones tenidas en cuenta para el corte de la chapa fueron láser y chorro de agua.

Ambas son comandadas mediante CNC (control numérico computarizado) y ampliamente aptas para conformar este dispositivo.

2. El método de corte seleccionado debería asegurar la confección de los radios de acuerdo establecidos en el plano de diseño. Para comprobarlo se averiguaron los diámetros del chorro de agua y del láser, estos son 1,02 mm y hasta 0,1 mm respectivamente. Por lo que ambos métodos asegurarían los radios de acuerdo.

3. La zona afectada por el calor en el corte puede ser muy influyente en la microestructura y por ende en las propiedades de la pieza ya que, si se utiliza corte con calor por ejemplo láser, esta zona comprende un área de un cuarto hasta un tercio del espesor de chapa hacia los costados del corte.

La distancia entre bordes y agujeros es un factor importante debido a que en las pequeñas zonas de material entre borde y hueco, el material puede alcanzar muy alta temperatura debido a su poca masa y poca disipación, pudiendo producir alteraciones en la microestructura, derivando en una disminución en las propiedades intrínsecas del material.

En este caso en particular el corte por chorro de agua esto no presenta inconvenientes debido a que se corta a temperatura ambiente, sumado el gran poder de refrigeración del agua.

5. Al ser un espesor de chapa fino, el problema de la conicidad que se produce a medida que crece la longitud del elemento cortante, no presenta un problema en este caso.

6. En el lugar que se averiguó para realizar el corte de la pieza (División Corte) el precio de ambos procesos es el mismo para un corte de esta envergadura.

Por todos estos motivos y teniendo en cuenta que el costo de ambos cortes es similar elegimos la confección de la pieza mediante corte por chorro de agua, realizada por División Corte, en la figura 49 se muestra la pieza terminada.



Figura 49. Vista superior del cantilever.

Guías superiores

Para el cálculo de estas piezas guía, se consideró la tensión a la cual están sometidas, facilidad de obtención y costo.

Al ser el esfuerzo aplicado muy bajo (carga máxima 10kg), se podría utilizar prácticamente cualquier metal, las primeras opciones contempladas fueron acero de bajo carbono y aluminio. Entre estos dos es más barato y accesible el primero, por lo que se seleccionó acero SAE 1045 comprado en metalúrgica Wolodarsky.

Luego de comprar la planchuela de medidas 150mm x 100mm, se realizó un corte a la mitad para dividirla en dos piezas, luego a cada una se les realizó un planeado, un escuadrado para lograr el espacio para que encaje el cantilever, seguido de taladrado de agujeros para sujetarlo, desbaste y acabado de cajas contenedoras de bujes y, por último, se dio vuelta la pieza para realizar el alojamiento donde apoya el collar del buje. Todas estas operaciones fueron realizadas manteniendo siempre el sistema de referencia y el cero pieza, por la fresadora CNC presente en el taller de mecánica de la Facultad de Ingeniería, UNMdP. La pieza terminada se muestra a continuación (figuras 50, 51, 52).



Figura 50. Vista superior de la guía superior.



Figura 51. Vista inferior de la guía superior.



Figura 52. Guía superior.

Guías inferiores

El razonamiento y pasos de estas piezas es casi idéntico a las anteriores descritas. Se seleccionó el mismo material de partida y el procedimiento de fresado fue el mismo con la diferencia de que estas piezas solo poseen dos pares de agujeros pasantes (figura 53).

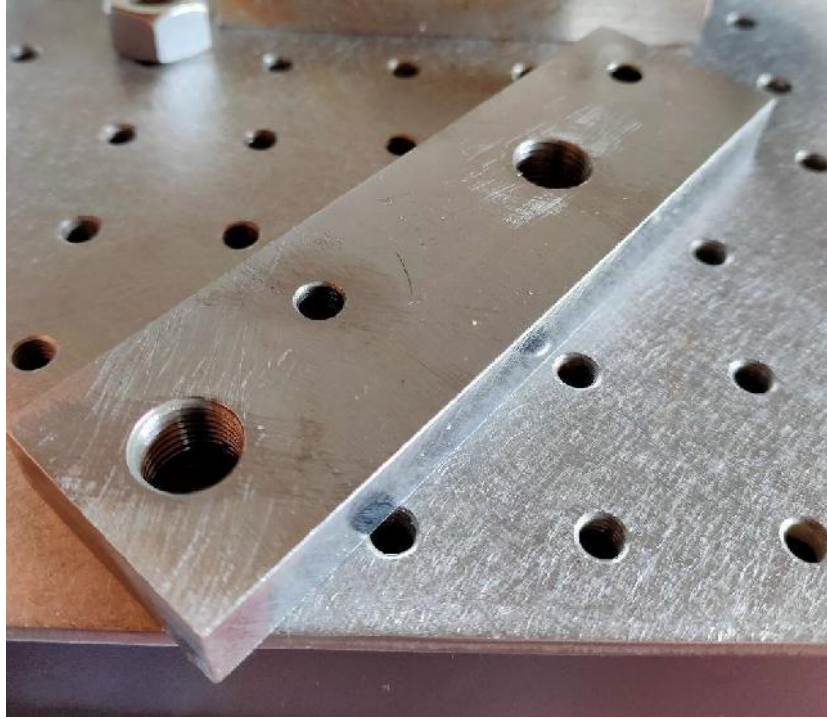


Figura 53. Guía inferior.

Varillas

Las varillas (figura 54) deben asegurar la rigidez del sistema de carga en todo su rango de movimiento y a lo largo del ensayo, adicional a la comodidad para establecer un régimen de carga. Para asegurar esto, se eligieron varillas de $\frac{1}{2}$ pulgada de paso fino (20 hilos por pulgada), con el objetivo de que, al efectuar giros de las tuercas reguladoras de carga, se pueda llegar fácilmente a un nivel intermedio de carga dentro de los 2,8 mm de amplitud de desplazamiento de la parte móvil del cantilever. Para evitar corrosión debida a posibles salpicaduras de líquido provenientes de la celda electroquímica se optó por acero inoxidable AISI 304.

El material de partida era una varilla de 1 m de longitud (comprada en “La casa de la tuerca”, Juan B Justo esquina Mitre), por lo que se cortó para obtener 4 unidades de 130 mm de largo.



Figura 54. Varilla roscada de acero inoxidable AISI 304.

Bujes

Al tratarse de una medida particular de bujes, se prefirió fabricarlos de polioximetileno denominado “Delrin” ya que presenta propiedades mecánicas más que suficientes para la aplicación, es muy accesible y de fácil mecanizado. Se partió de un redondo de 30mm de diámetro, de longitud 200mm, comprado en “Fescap”. Se realizó marca de centro, taladrado pasante, roscado interior con macho de roscar. Seguido con un refrentado, cilindrado exterior, cilindrado con escalón para el collar. En la figura 55 se observa el buje terminado.



Figura 55. Buje de Delrin.

Tuercas

En este apartado se detallan los dos tipos de tuercas presentes en la máquina, las de sujeción y las de regulación.

Las primeras fueron compradas en el mismo sitio que las varillas, ya que no eran costosas y es una buena opción asegurarse un buen deslizamiento entre estas dos, debido al paso fino de la barra (figura 56).



Figura 56. Tuerca de sujeción de acero inoxidable.

Del mismo material de partida de los bujes, se fabricaron las tuercas de ajuste (figura 57) con un diseño simple de manipular para el usuario. La secuencia de fabricación fue en torno: marca de centro, cilindrado, agujero interior pasante, roscado interno, y por último taladrado de agujeros donde ingresa la llave de ajuste.

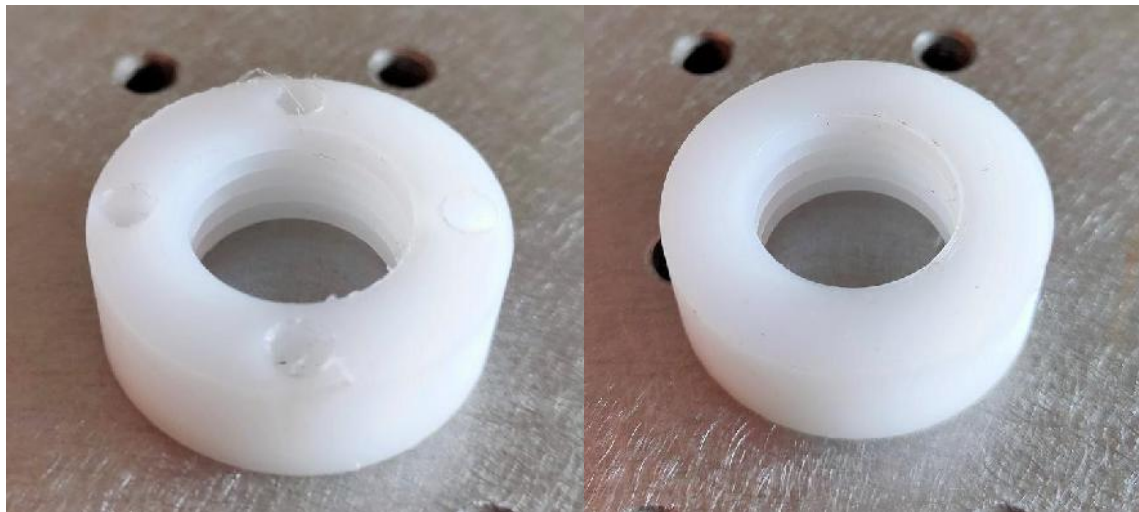


Figura 57. Tuercas de Delrin utilizadas para la regulación de la carga.

Sensores

Mediante la orientación del profesor Arenas, se pudo conocer una lista de elementos necesarios para fabricar dos sensores del tipo “Y” ya mencionado. A continuación, se detalla la función principal y cómo se obtuvo cada uno de ellos.

Circuitos integrados: Son los encargados de recibir la señal de luz reflejada, en nuestro caso de la superficie del extremo del cantilever, y amplificarla. Esto es necesario para que en la entrada del dispositivo de lectura de señal se tenga un valor considerable de la misma, de otra forma no le sería posible procesarla y luego devolver un valor legible para el usuario. En la figura 58 se observa el utilizado para nuestros sensores.



Figura 58. Circuito integrado OPT101P-J.

Fibra óptica: Es el medio de transporte de la señal de luz en todo su recorrido. Es decir que hay tramos de fibra desde el LED hasta la superficie reflectante y de esta última al circuito integrado. Se utiliza este material por su gran propiedad de disipar muy poca luz en su recorrido. En la figura 59 se muestra un fragmento de la fibra óptica utilizada.

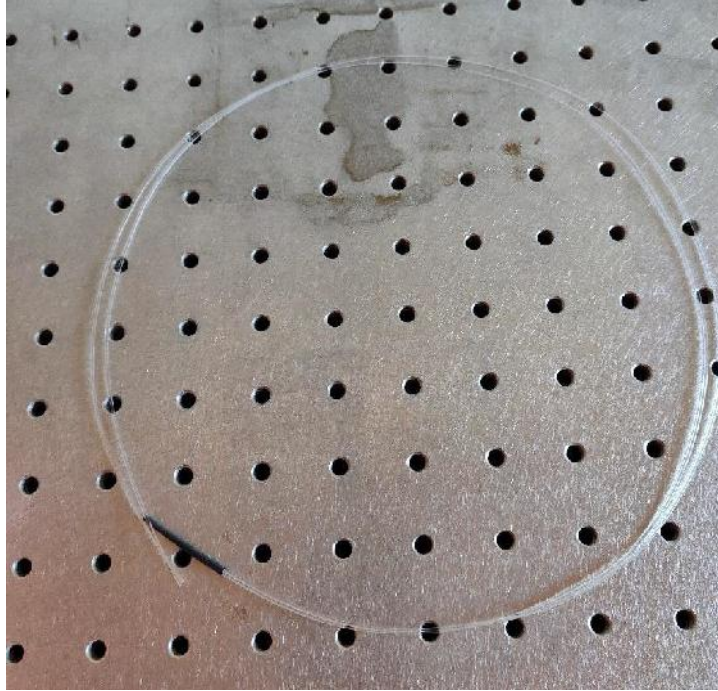


Figura 59. Tramo de fibra óptica.

Placa Arduino: Este dispositivo cumple una función necesaria para la utilización de sensores tipo “Y”, ya que es el encargado de la lectura y procesamiento de las señales provenientes del amplificador, que luego son enviadas a una computadora u otro aparato electrónico en el que se puedan leer los valores arrojados por la placa. Se seleccionó esta marca y modelo de placa por su gran prestigio y facilidad de programación. La figura 60 muestra la placa “Arduino Uno” utilizada.



Figura 60. Placa Arduino Uno

Cabezales y adaptadores: Tanto para unir los dos extremos de fibra óptica que apuntan en dirección a la superficie a estudiar, como para dejar fijo el LED en el lugar de recepción de luz de la fibra y también para alojar el circuito integrado, es bueno disponer de accesorios. Estos no soportan ningún tipo de esfuerzo o carga por lo que se realizaron mediante impresión 3D por el profesor Arenas. A continuación se muestran imágenes de los mismos (figuras 61, 62, 63).

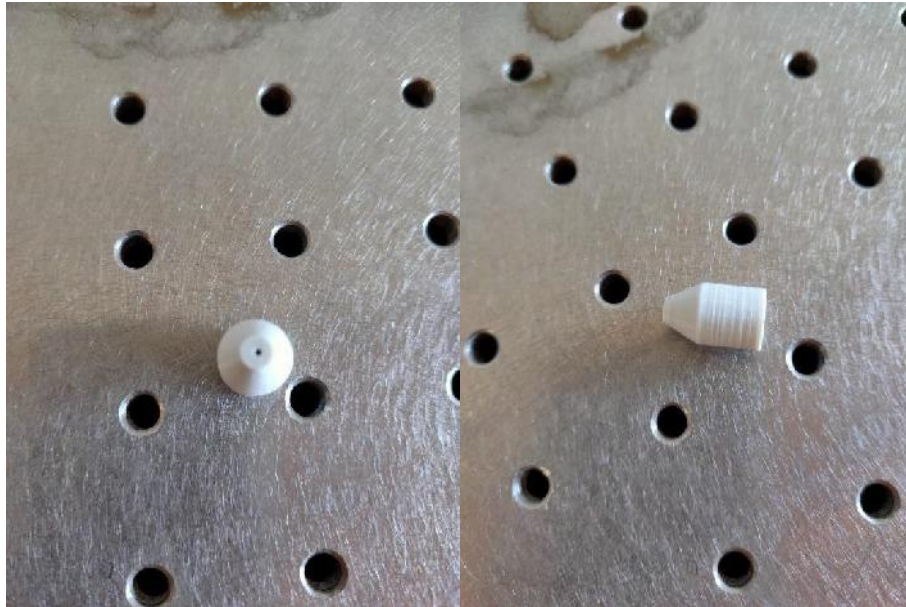


Figura 61. Cabezal utilizado como adaptador de la fibra óptica para enviar luz desde el LED hacia el extremo del sensor.

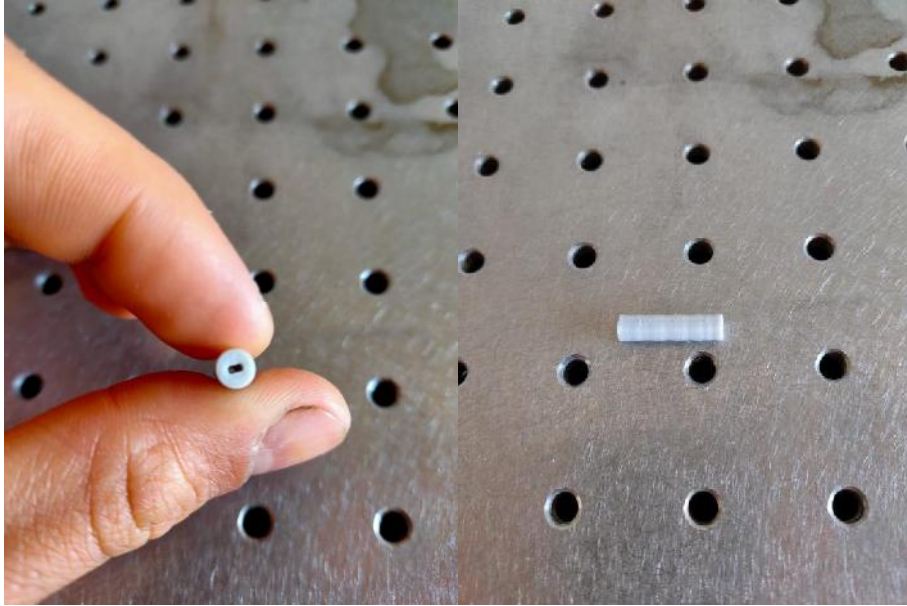


Figura 62. Adaptador que mantiene estáticos los extremos de emisión y recepción de la fibra óptica.

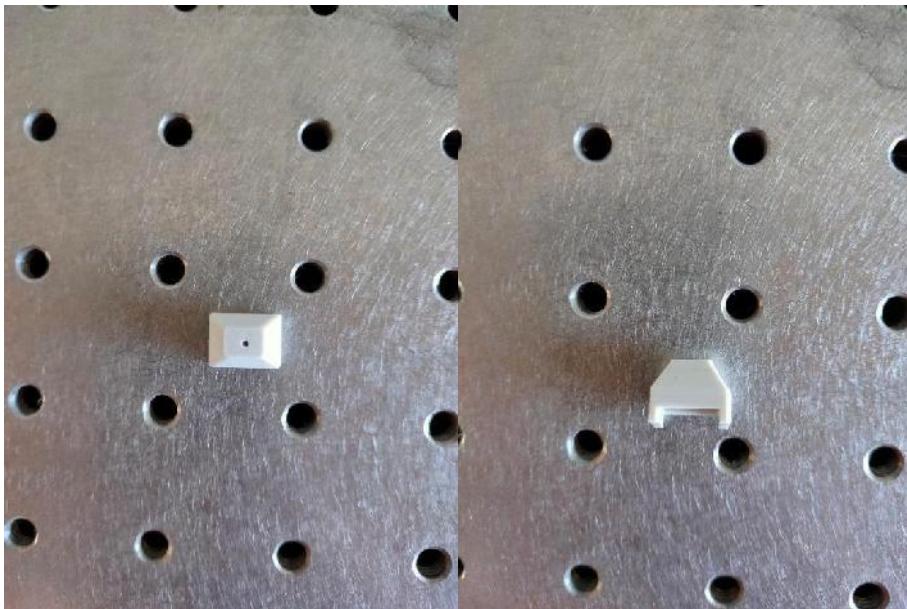


Figura 63. Adaptador que vincula el extremo de la fibra óptica que trae la luz reflejada y el integrado.

Circuito intermediario

Este circuito montado en una placa perforada, es el encargado de emitir, y recibir la señal de luz transmitida por la fibra. Está compuesto por los LEDs, con sus respectivas resistencias (de 100Ω el verde y de 150Ω el rojo), circuitos amplificadores con los capacitores necesarios (de $0,1\ \mu\text{F}$), zócalos para alojarlos y una bornera para conectar las salidas del circuito con la placa Arduino. Tanto los LEDs como los amplificadores están dispuestos de tal forma que encastran sus respectivos adaptadores. Todo lo mencionado se puede apreciar en la figura 64.

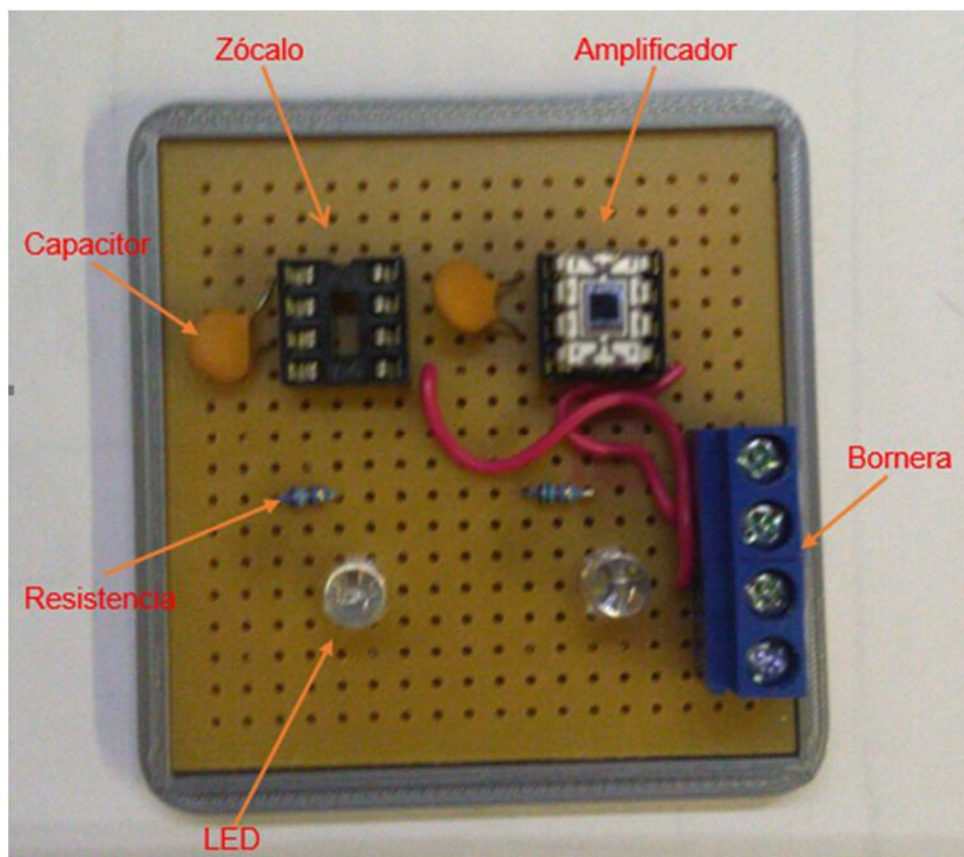


Figura 64. Esquema del circuito utilizado para el sensado del desplazamiento.

Soporte para sensores

A partir de un sobrante de chapa de acero inoxidable presente en el taller de mecánica de la Facultad, se realizaron dos pliegues a 90°, posteriormente el taladrado de los agujeros para alojar los adaptadores de la punta de los sensores. La pieza final quedó de la siguiente manera (figura 65).



Figura 65. Soporte de acero inoxidable para sensores de desplazamiento.

Tope micrométrico

Se seleccionó un tope micrométrico digital marca Digimess (figura 66), de resolución 0.001 mm (1 micrómetro), comprado a la empresa ARO S.A.



Figura 66. Tope micrométrico

Soporte para tope micrométrico

Se fabricó a partir de una chapa de acero inoxidable, se llevó mediante un corte a la forma de “C”, para luego realizar el taladrado donde ingresa el cilindro fijo del tope, seguido de los pliegues a 90° dándole la altura necesaria según el diseño.

Por otro lado, se fabricó el tubo donde se aloja el cilindro mayor del tope mediante torneado: agujero de centro, taladrado, ranurado hasta el diámetro del resalte, tronzado en la ranura para que quede el escalón. Luego en taladradora sujetando en morsa: taladrado de centro, taladrado, roscado con macho. Colocación de pieza a presión en el soporte, y remachado con martillo para asegurar fijación. La figura 67 muestra cómo quedó el mismo.

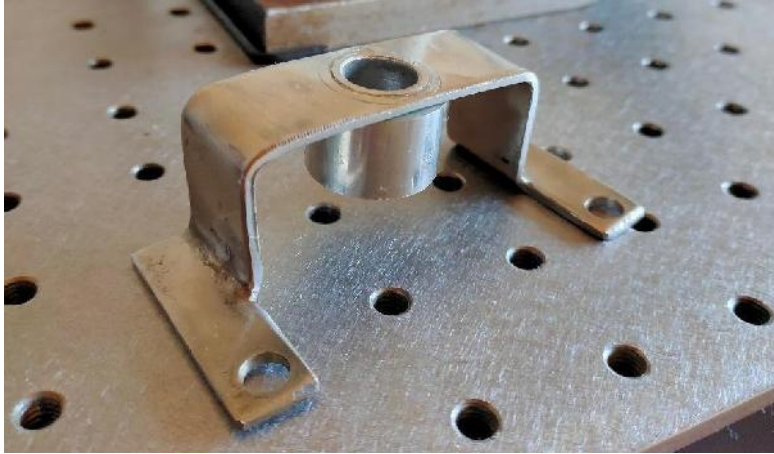


Figura 67. Soporte de acero inoxidable para montar tope micrométrico.

Porta-esferas

Se partió de una barra cilíndrica de acero inoxidable de 3/8", se realizó mediante torneado la marca de centro, luego el cilindrado mayor, posteriormente el menor, y por último el alojamiento cónico girando la torreta del torno 59°. Este soporte ingresa a presión en la punta del cantilever a la cual se le realizó un orificio de 3mm.

Esferas de contacto

Las esferas de alúmina fueron obtenidas del laboratorio INTEMA, el propósito inicial de las mismas era el mismo para el que se utilizaron en este trabajo, por lo que no hubo ningún tipo de inconveniente ni consideración especial que se haya tenido que tener en cuenta.

Finalmente, faltaría mencionar los elementos que no fueron modificados de la máquina inicial y que se conservaron para ser reutilizados en el equipo nuevo. En esta sección sólo se enumeran los mismos pues ya fueron descriptos en la sección "ESTADO DE COMPONENTES", a excepción del último que sí se detalla debajo.

1. Base de apoyo (mesa de granito y breadboard)
2. Microactuador electrónico

3. Celda electroquímica y portamuestras
4. Acople microactuador – breadboard.

Este elemento fue necesario para poder fijar el microactuador a la mesa breadboard, ya que los agujeros de ambos eran diferentes en tamaño, posición y rosca. Por este motivo se fabricó a partir de una planchuela de acero 1045, de dimensiones 100x100x12.7 mm con agujeros de 6 mm espaciados 25 mm entre sí para que coincidan con la base, y en el medio agujeros más pequeños de 3 mm, espaciados 20 mm entre ellos, con el fin de poder inmovilizar la parte fija del microactuador. La pieza se observa en la figura 68.



Figura 68. Acople necesario para poder montar el microactuador sobre el breadboard.

Ensamble

Sensores

Una vez obtenidos todos los elementos necesarios para que los sensores puedan funcionar, se procedió a armarlos con el asesoramiento del profesor Arenas.

Se comenzó colocando los adaptadores y cabezales en los extremos de las fibras ópticas, como se muestra en la figura 69 a continuación.

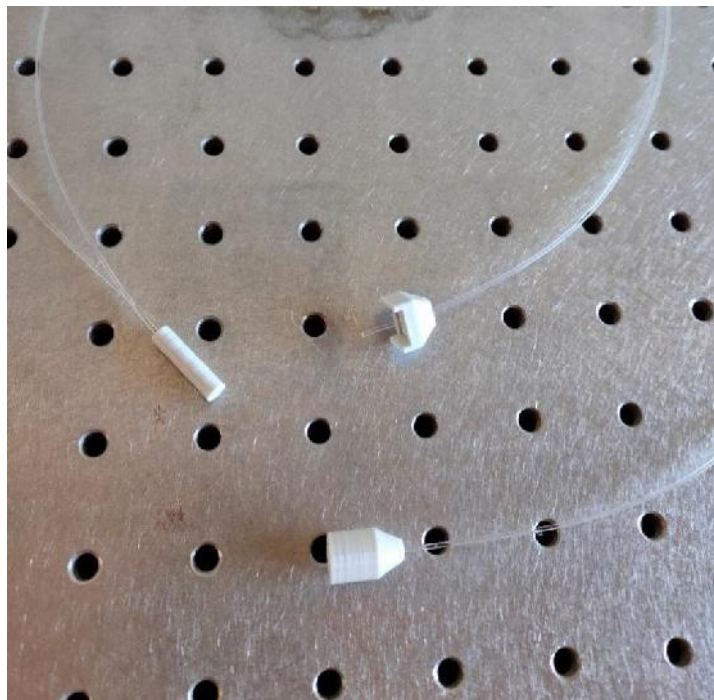


Figura 69. Fibra óptica enhebrada en sus respectivos adaptadores.

Paso siguiente, se colocaron los adaptadores en los LEDs y en los amplificadores presentes en el circuito intermedio, como se muestra en la figura 70.

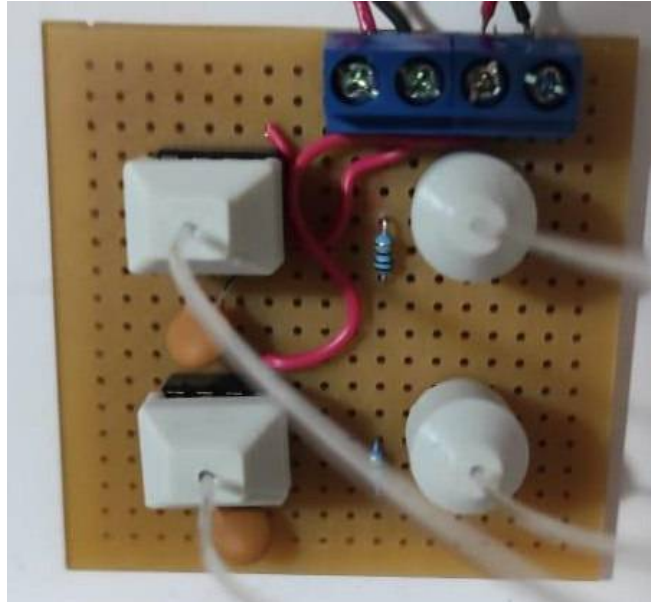


Figura 70. Circuito conectado con los adaptadores.

Por último, se realizaron las conexiones entre placa Arduino y circuito intermedio, con el fin de que el primero registre los valores de salida del amplificador, y que el circuito se alimente con corriente eléctrica. Para lograr esto último, se conectaron las salidas de 5V y tierra (GND) provenientes del propio Arduino UNO, en las entradas positivo y negativo de la bornera como se puede observar en la figura 71 y a su vez se vincularon las salidas 1 y 2 de la bornera con las entradas A0 y A1 del Arduino (figura 71).

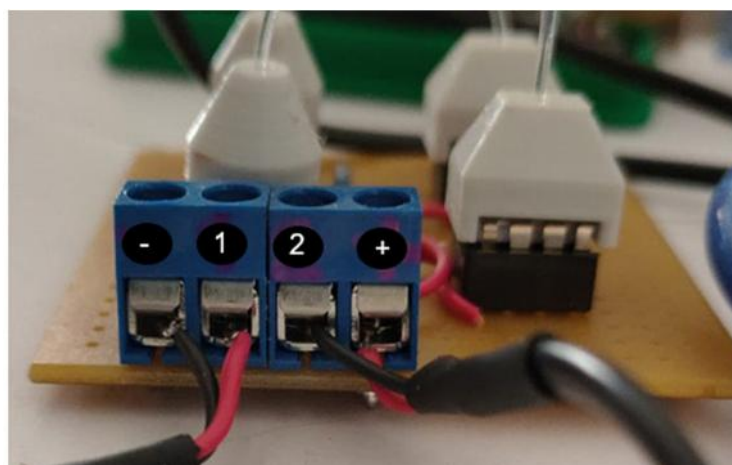


Figura 71. Esquema de conexión proveniente de la placa Arduino.

Máquina final

A continuación se muestran en una secuencia de fotos, los pasos seguidos para realizar el ensamble final de la máquina, que se hizo en última instancia debido a la disponibilidad de piezas en la fabricación (figuras 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79).



Figura 72. Soportes inferiores y adaptador montados sobre el breadboard.

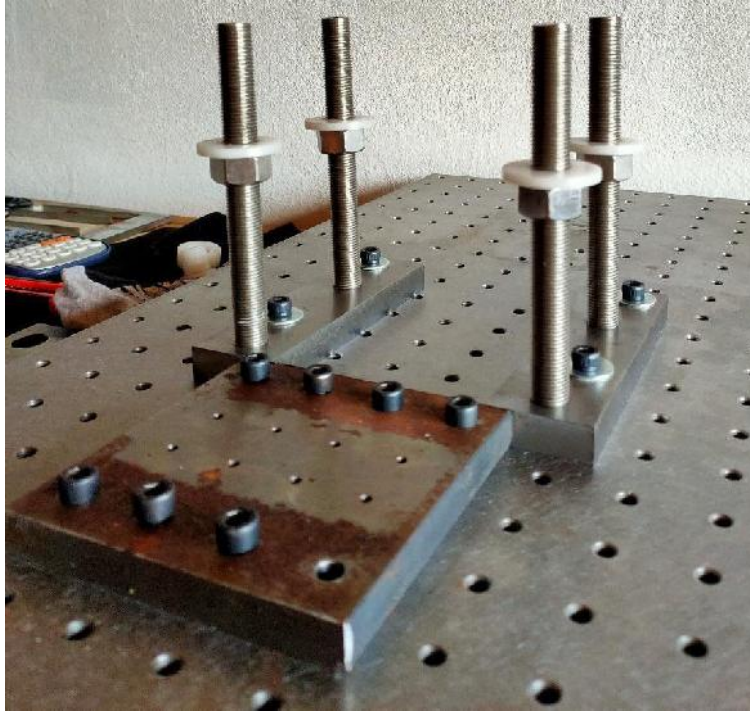


Figura 73. Varillas colocadas en los soportes inferiores con tuercas de sujeción y sus arandelas.

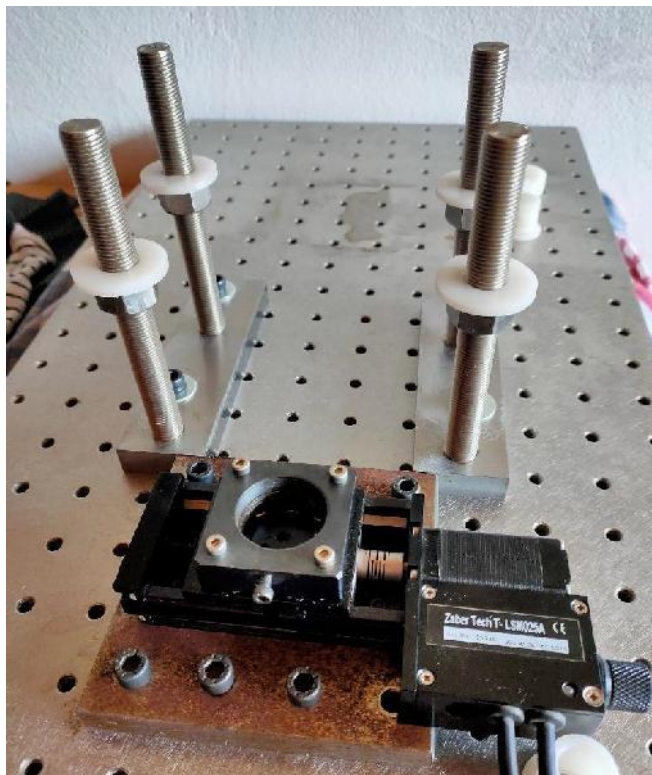


Figura 74. Motor colocado en su adaptador.

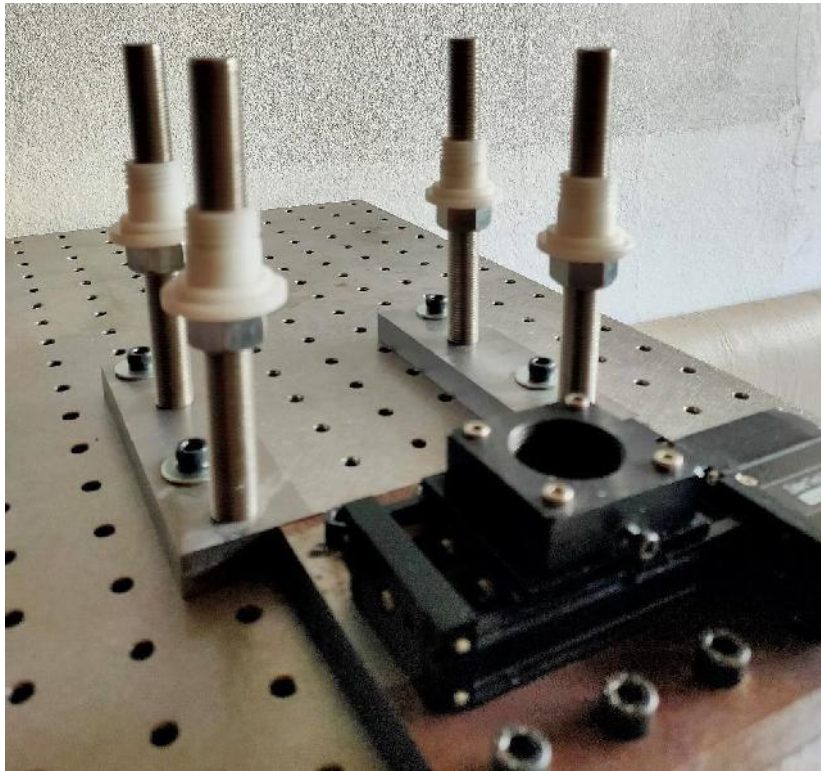


Figura 75. Bujes insertados en las columnas.

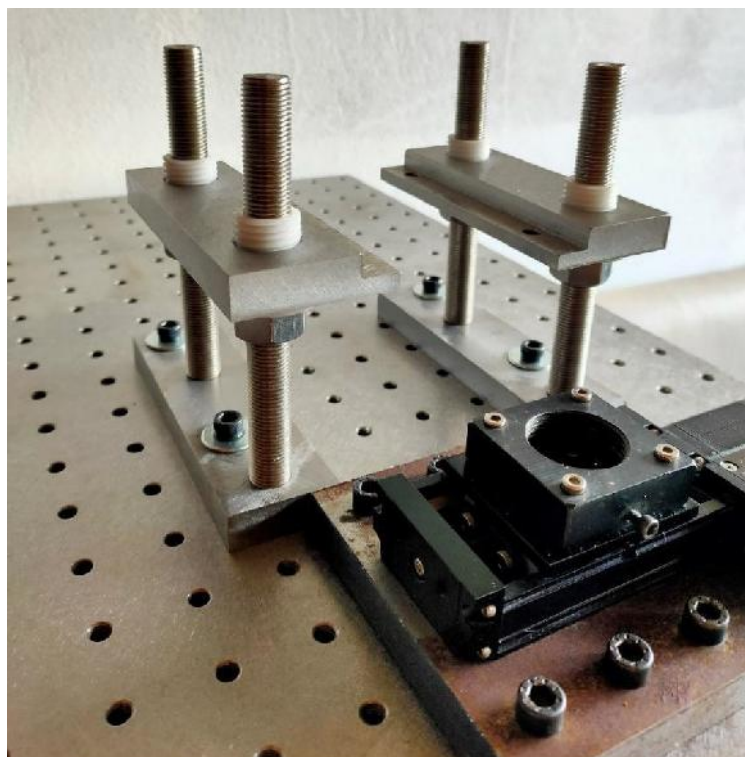


Figura 76. Soportes superiores montados sobre los bujes.

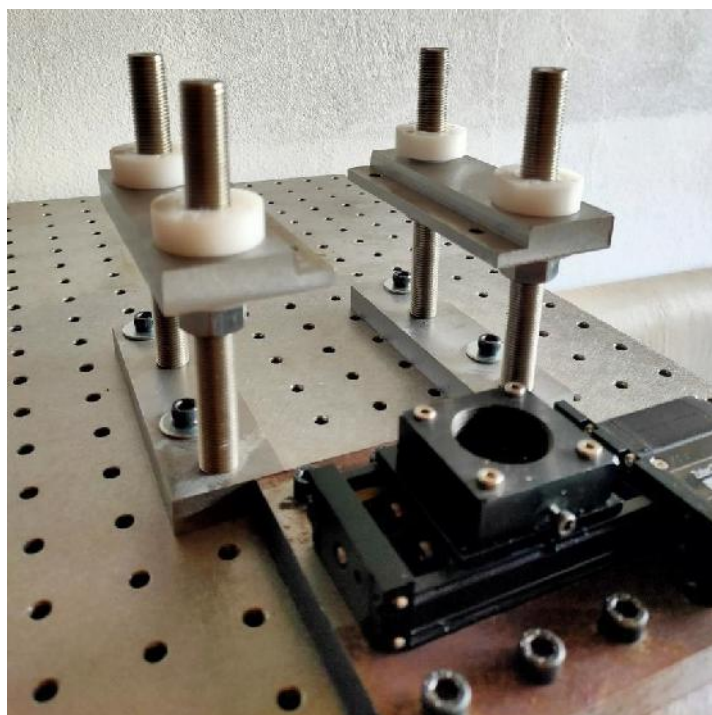


Figura 77. Tuercas de regulación colocadas en la parte superior de la estructura.

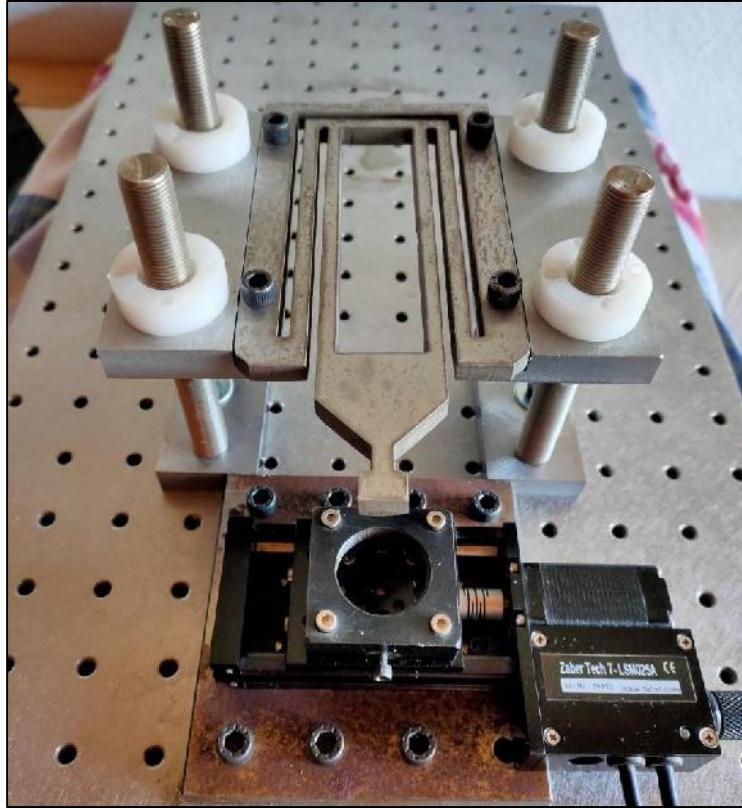


Figura 2. Cantilever fijado a los soportes superiores.

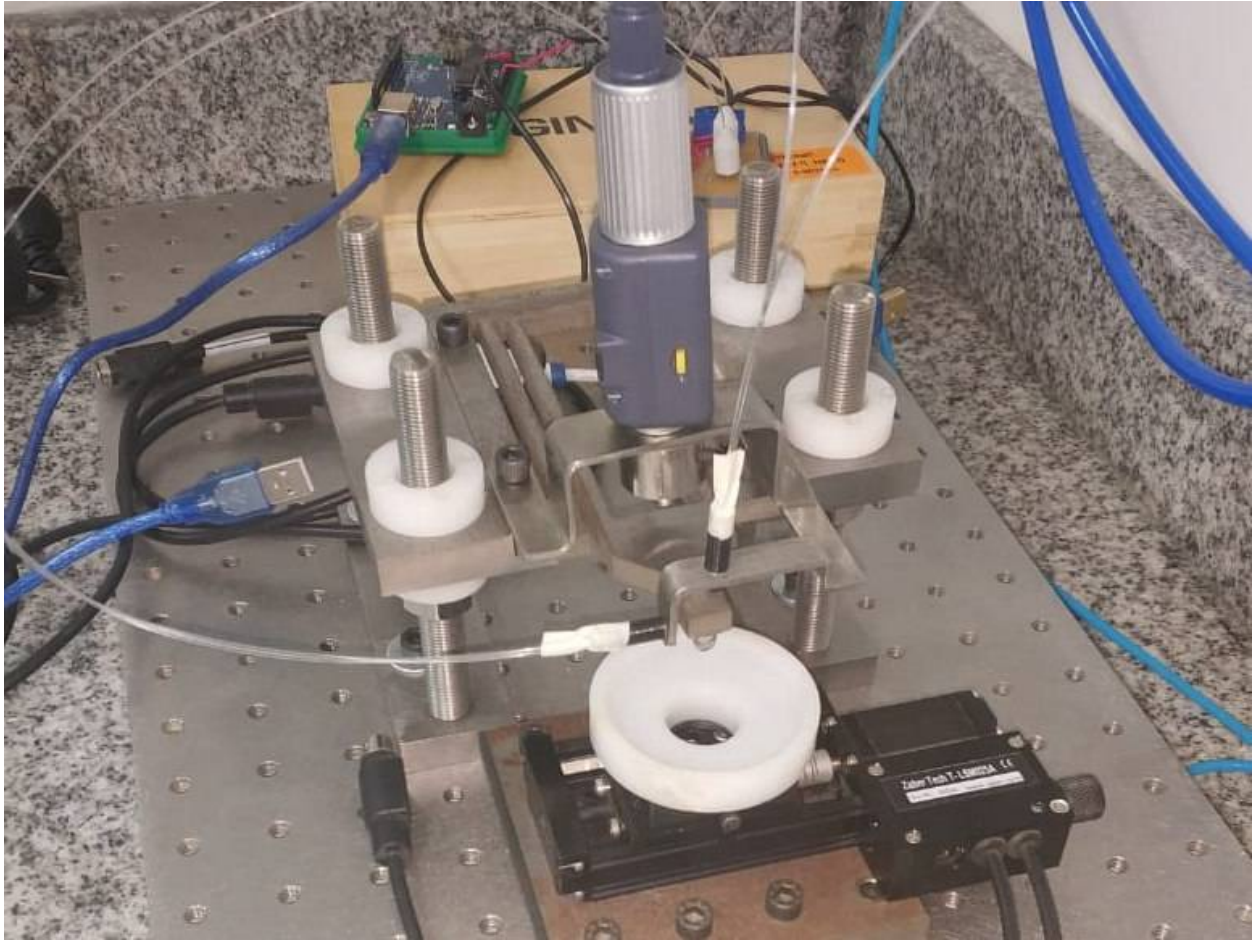


Figura 79. Colocación de sensores en su soporte, portamuestras en adaptador a microactuador, quedando la máquina final ensamblada.

Trabajos futuros

Del presente trabajo se desprenden una serie de mejoras posibles que darán una interfaz de trabajo mucho más confortable para el usuario. Estas propuestas se indican a continuación:

- Utilización de motor con poleas para la regulación de la carga.
- Niquelar piezas que no son de acero inoxidable para que no se degraden ya que se está trabajando en ambiente corrosivo.
- Realizar ensayos sobre distintos materiales, con características de ensayos variables.
- Programación para leer directamente el valor de carga o desplazamiento en vez de un valor del voltaje indicado por los sensores.
- Sensor que mida el desplazamiento del microactuador para asegurar que está moviéndose lo programado.

Conclusiones

El análisis de funcionamiento realizado en la máquina de ensayos de fretting corrosion construida por Sebastián Amendolara, fue un paso esencial para poder determinar los aspectos más importantes en este tipo de equipamientos, y los defectos a los que son más susceptibles.

En segunda instancia, se estudiaron estructuras básicas y elementos más utilizados en las diferentes variedades de modelos comerciales para poder obtener ideas de soluciones para los defectos hallados en la máquina presente o bien para modificar el diseño con el fin de optimizar la interacción máquina – usuario. A partir de esta información recolectada, se propusieron distintas alternativas para eliminar o mitigar los errores presentes en el equipo del laboratorio.

Para proponer las alternativas mencionadas, se contemplaron dos aspectos generales más importantes. Por un lado, las insuficiencias estructurales, que conllevaban a introducir errores en los resultados, por el otro, la ausencia de un sistema de sensado para monitorear las variables prioritarias en este tipo de ensayos. La opción más atractiva se seleccionó según el beneficio aportado, costo, trabajo y tiempo necesarios para gestionarlo.

Como experiencia personal, este trabajo resultó ser un gran desafío debido a que abarca temas que no se encuentran en nuestras áreas de práctica (como ser sensores, programación, etc.) para los cuales recibimos asesoramiento y ayuda con toda predisposición y buena voluntad del departamento de electrónica y del laboratorio láser. Sumado a esto, la situación actual de pandemia, introdujo incertidumbre en el avance del proyecto y modificaciones en los plazos y objetivos del mismo.

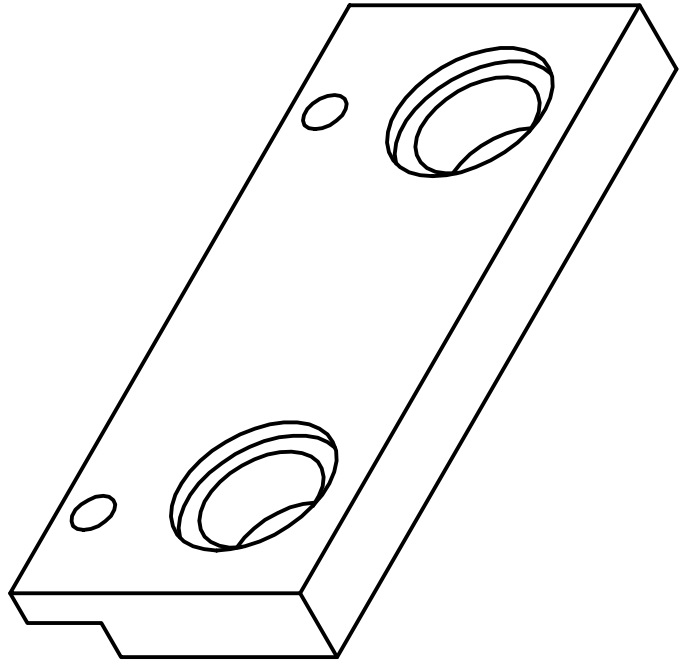
En definitiva, más allá de las complicaciones, se pudo cumplir con todas las secciones y obtener un dispositivo que funcione correctamente según los objetivos planteados, quedando pendiente la automatización del sistema de carga mediante poleas y motor y la realización de ensayos.

Bibliografía

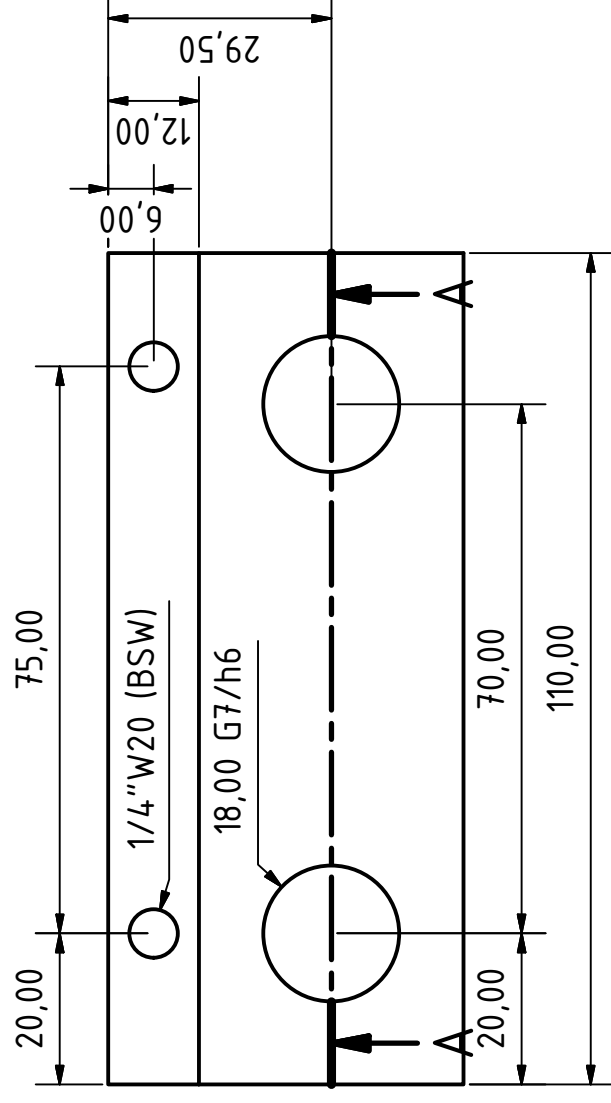
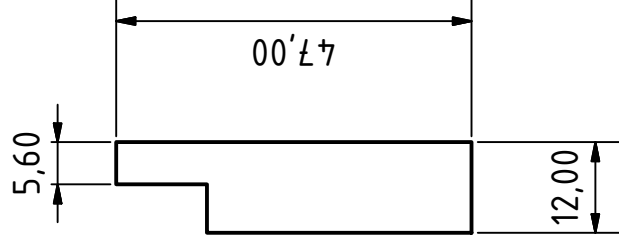
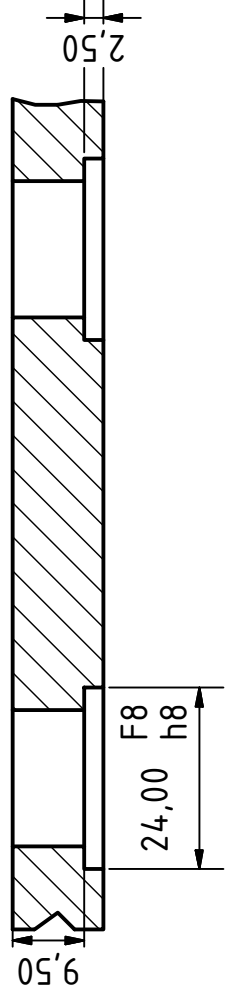
- i. Dommarco, Ricardo C. *Desgaste por fretting*. Facultad de Ingeniería, UNMdP.
- ii. Cátedra de tribología. *Desgaste por corrosión-oxidación*. Facultad de Ingeniería, UNMdP.
- iii. Cátedra de Metalurgia aplicada y materiales. *Degradación de los materiales*. Facultad de Ingeniería, UNMdP.
- iv. A.L Casillas. *Máquinas Cálculo de taller*.
- v. *ASTM G-133-05 Standard test method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear*
- vi. Mandri, Alejo Daniel. *Verificación de máquinas-herramientas mediante un sensor de fibra óptica*.
- vii. Amendolara, Sebastián. *Desarrollo de requerimientos necesarios y análisis de posibilidades prácticas para diseñar y construir una máquina de ensayos de Fretting Corrosión*.
- viii. Nanovea. *Tribometers*. <https://nanovea.com/instruments/tribometers>
- ix. Anton-Paar Tribometro. <https://www.anton-paar.com/productos/grupo/tribometro>
- x. *Investigation of Friction in the Meso Normal Force Range on DLC and TiN Coatings*.



ANEXO 1

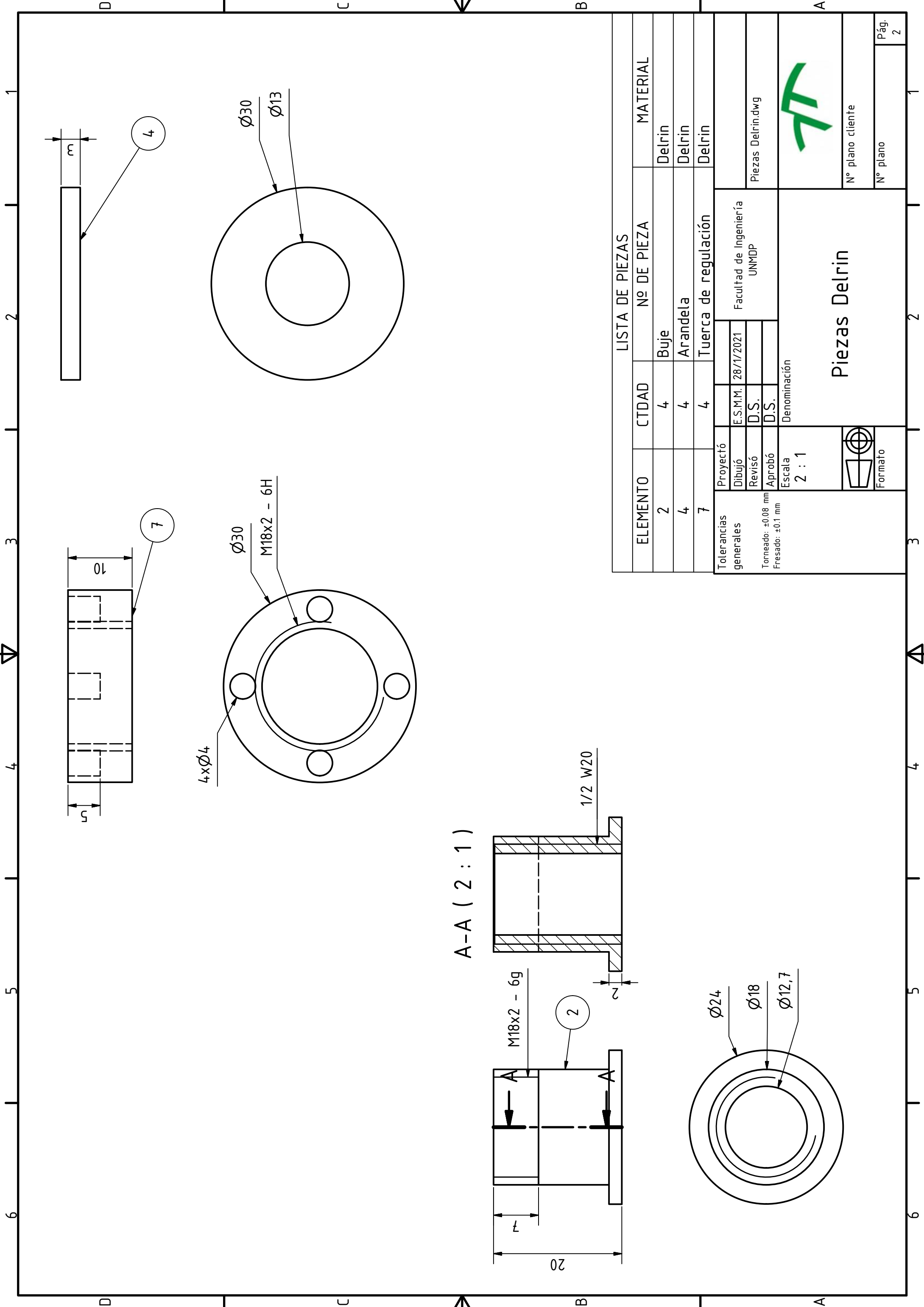
Planos de fabricación de componentes estructurales



A-A (1:1)



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL
1	2	Guia superior	Acero SAE 1045
Tolerancias generales Torneado: ±0.08 mm Fresado: ±0.1 mm	Proyectó		
	Dibujó	E.S.M.M. 10/11/2020	Facultad de Ingeniería UNMDP
	Revisó	D.S.	
	Aprobó	D.S.	
	Escala	Denominación	
	1:1		
 Formato			
		Nº plano cliente	
		Nº plano	Pág. 1

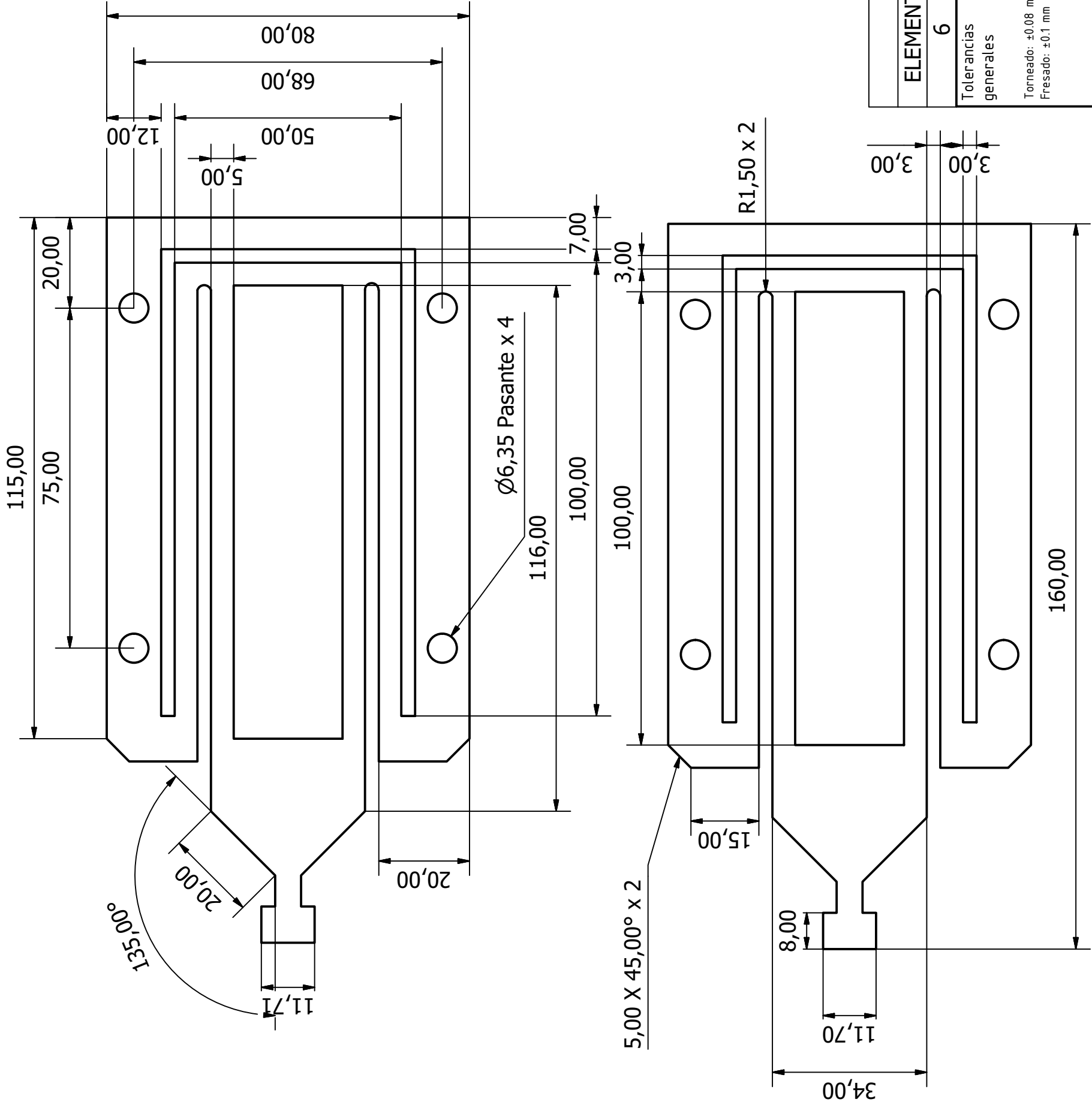


LISTA DE PIEZAS			MATERIAL	
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA		
2	4	Buje	Delrin	
4	4	Arandela	Delrin	
7	4	Tuerca de regulación	Delrin	

Tolerancias generales	Proyectó	E.S.M.M.	28/1/2021	Facultad de Ingeniería UNMDP	Piezas Delrin.dwg
Torneado: ±0.08 mm	Dibujó	D.S.			
Fresado: ±0.1 mm	Revisó	D.S.		Denominación	Piezas Delrin
	Aprobó				
	Escala	2 : 1		Formato	Nº plano cliente

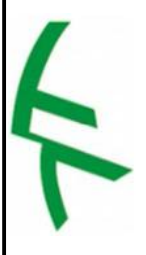


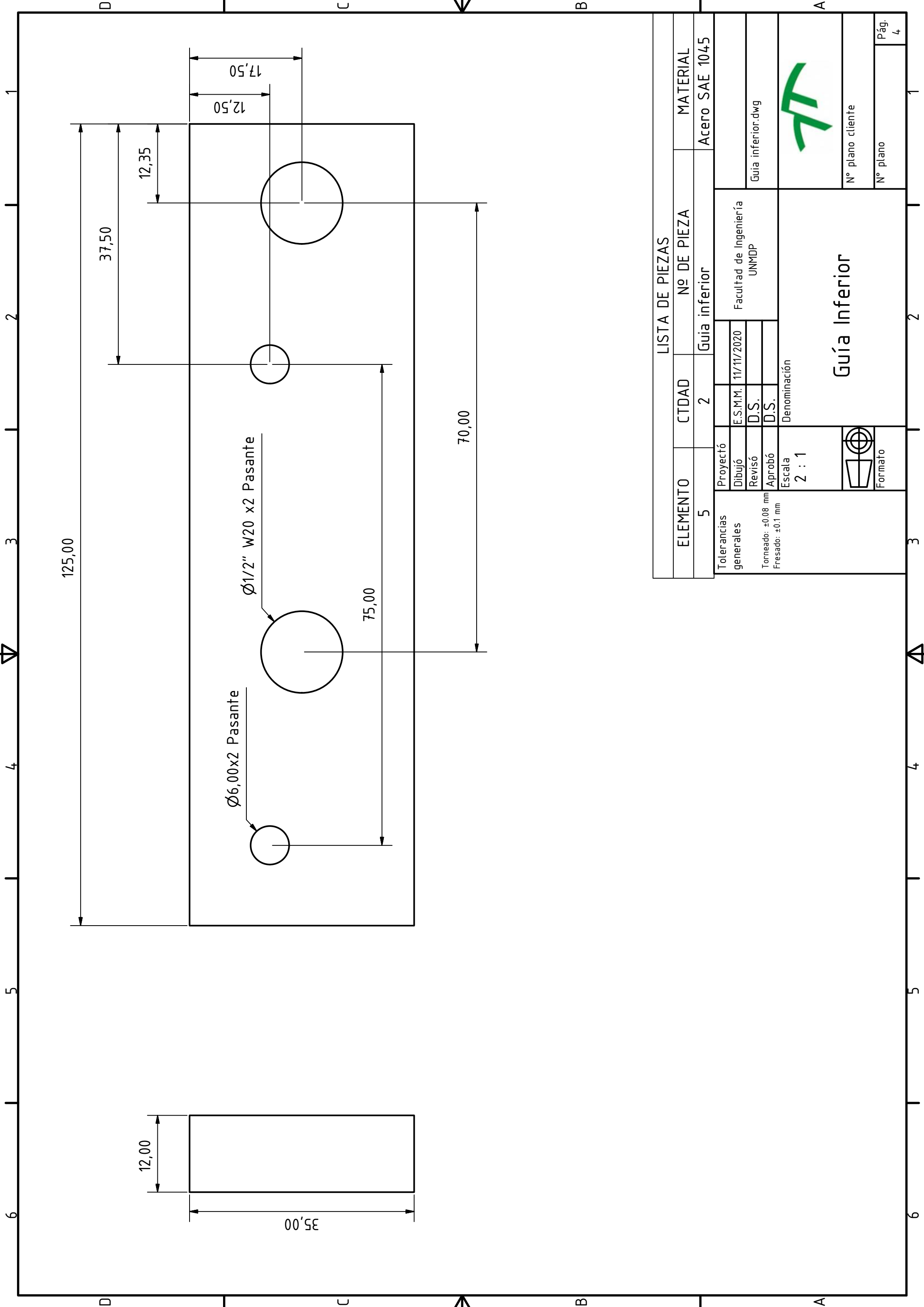
Nº plano cliente






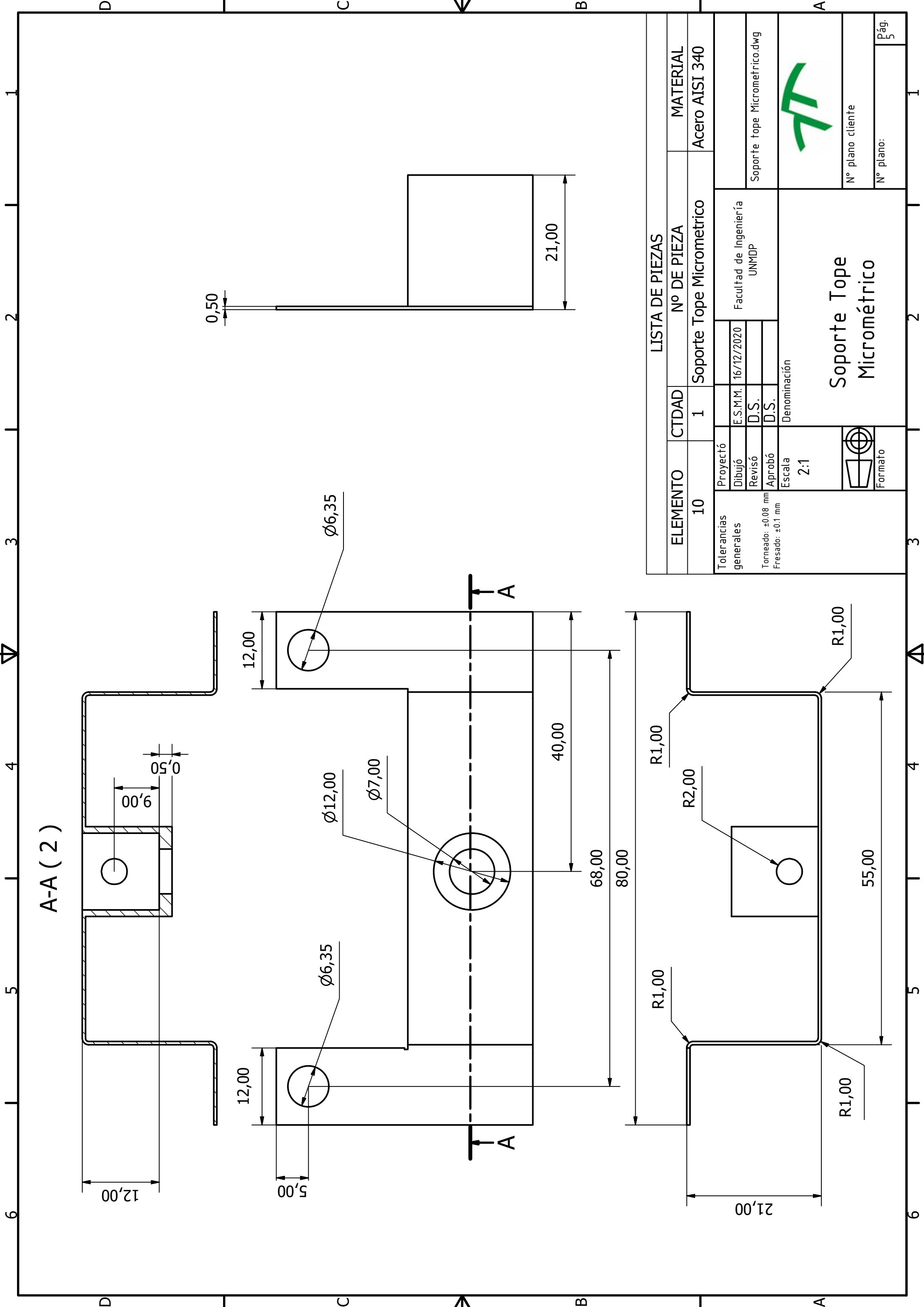
LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL
6	1	Cantilever	Acero SAE 4140
Tolerancias generales		Proyecto	Facultad de Ingeniería UNMDP
Dibujó		E.S.M.M. 13/10/2020	
Revisó		D.S.	
Aprobó		D.S.	
Torneado: ±0.08 mm Fresado: ±0.1 mm		Denominación	Cantilever.dwg
Escala		1 : 1	
Formato		Cantilever	
Formato			
Nº plano:		Nº plano cliente	
Pág.		3	




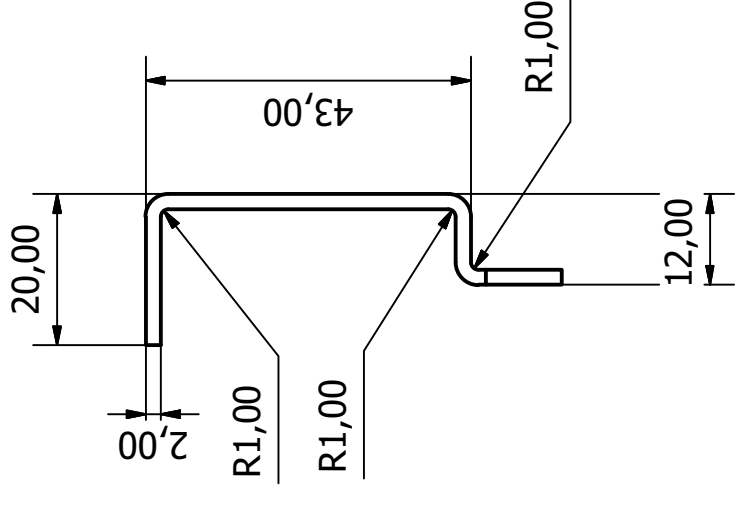
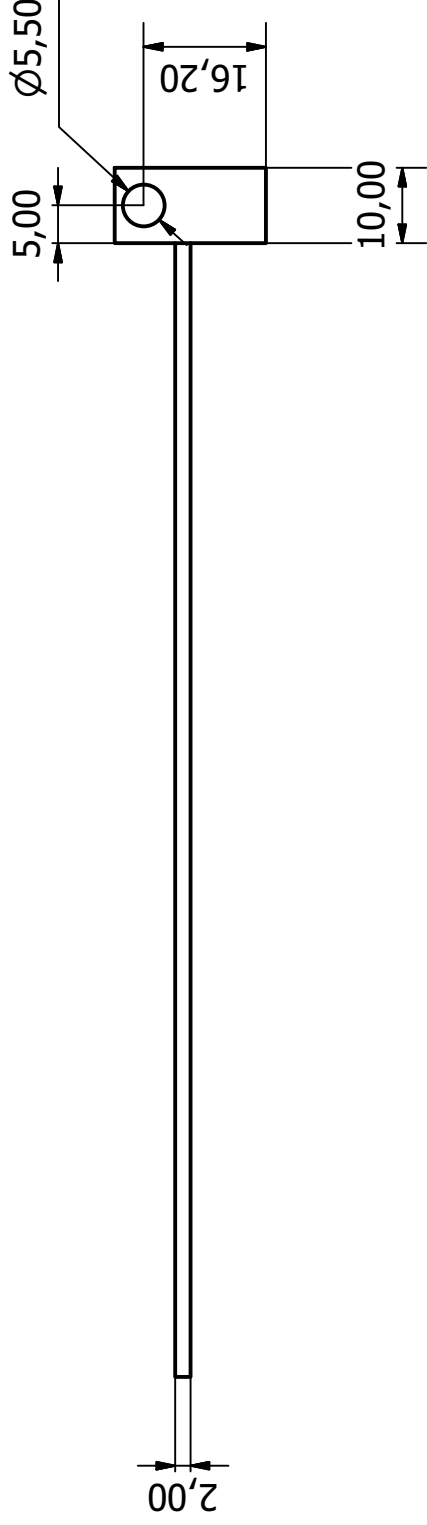
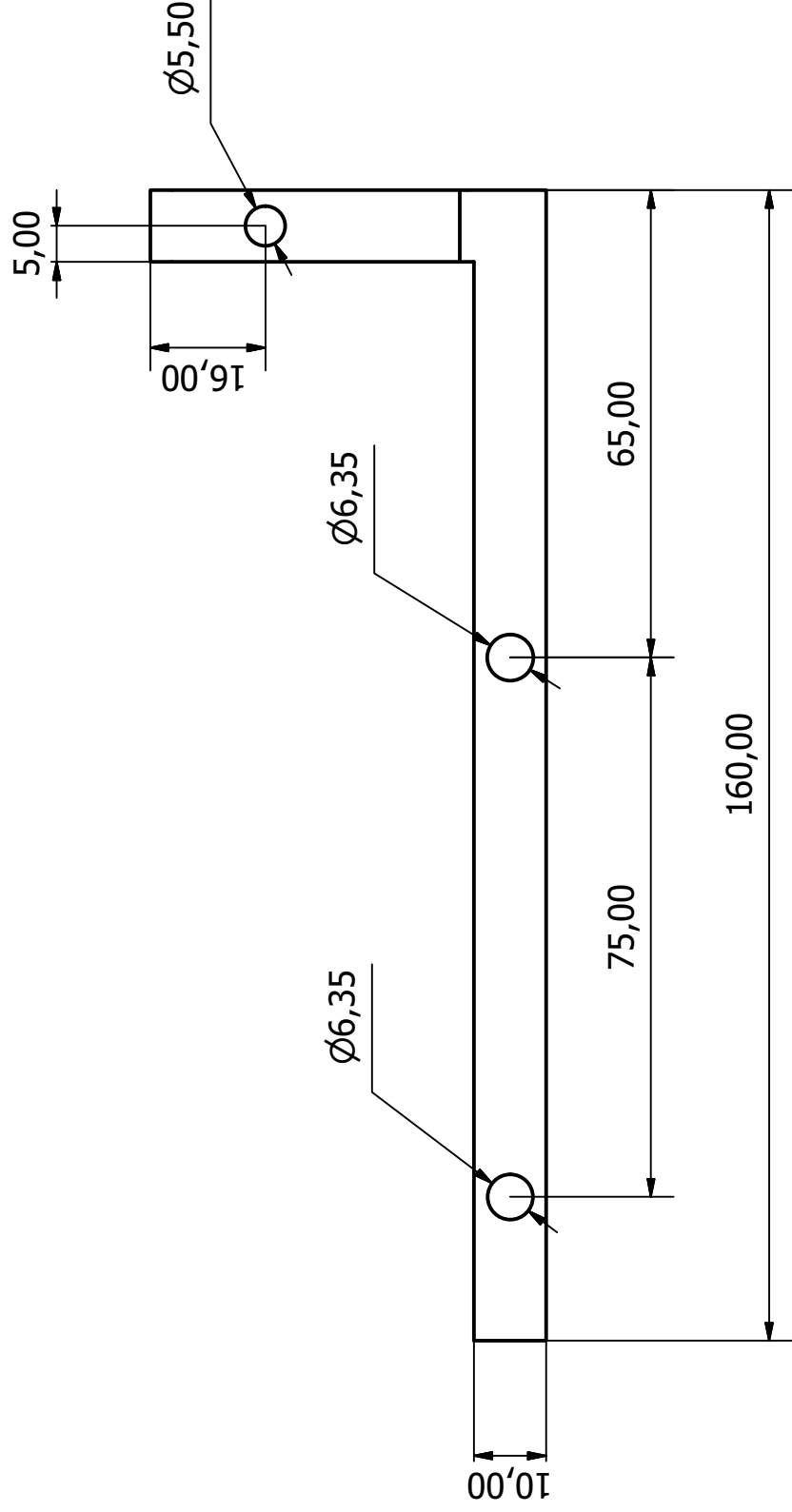




LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL
5	2	Guía inferior	Acero SAE 1045
Tolerancias generales Torneado: ±0.08 mm Fresado: ±0.1 mm	Proyectó		
	Dibujó	E.S.M.M. 11/11/2020	Facultad de Ingeniería UNMDP
	Revisó	D.S.	
	Aprobó	D.S.	
	Escala	Denominación	
	2 : 1		
 Formato		<h2 style="text-align: center;">Guía Inferior</h2>	
			
N° plano cliente			
N° plano			
Pág. 4			



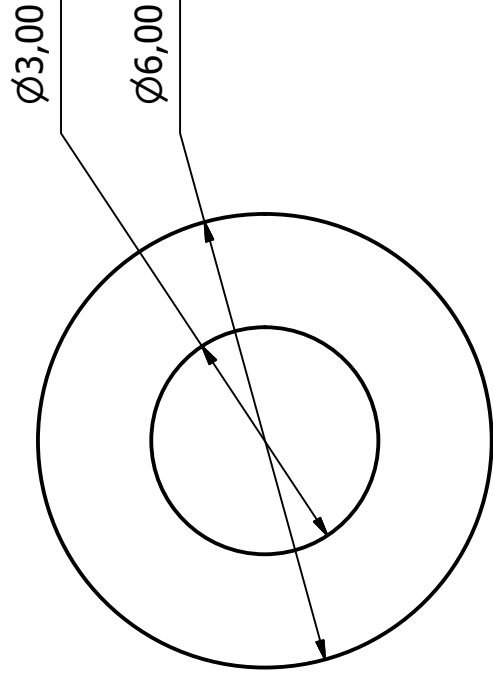
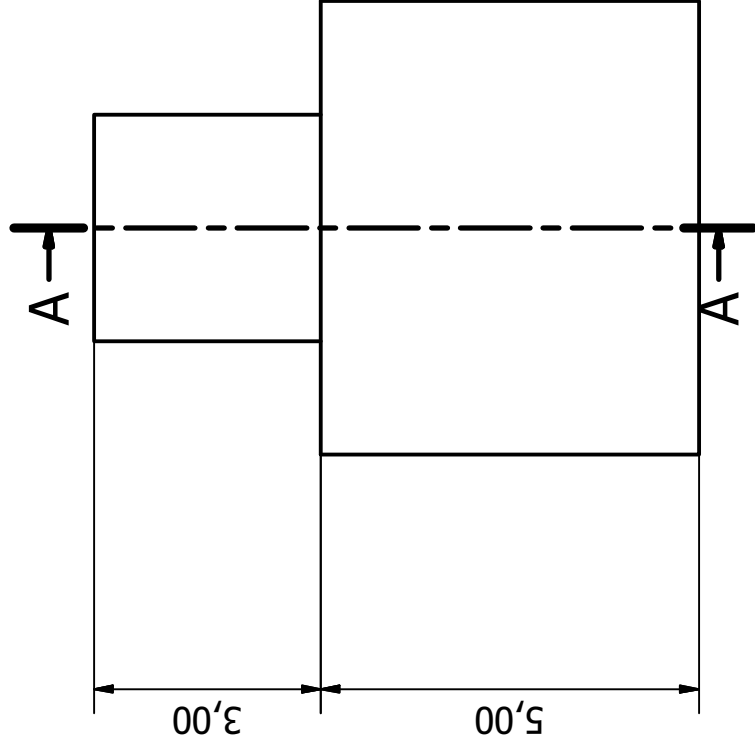
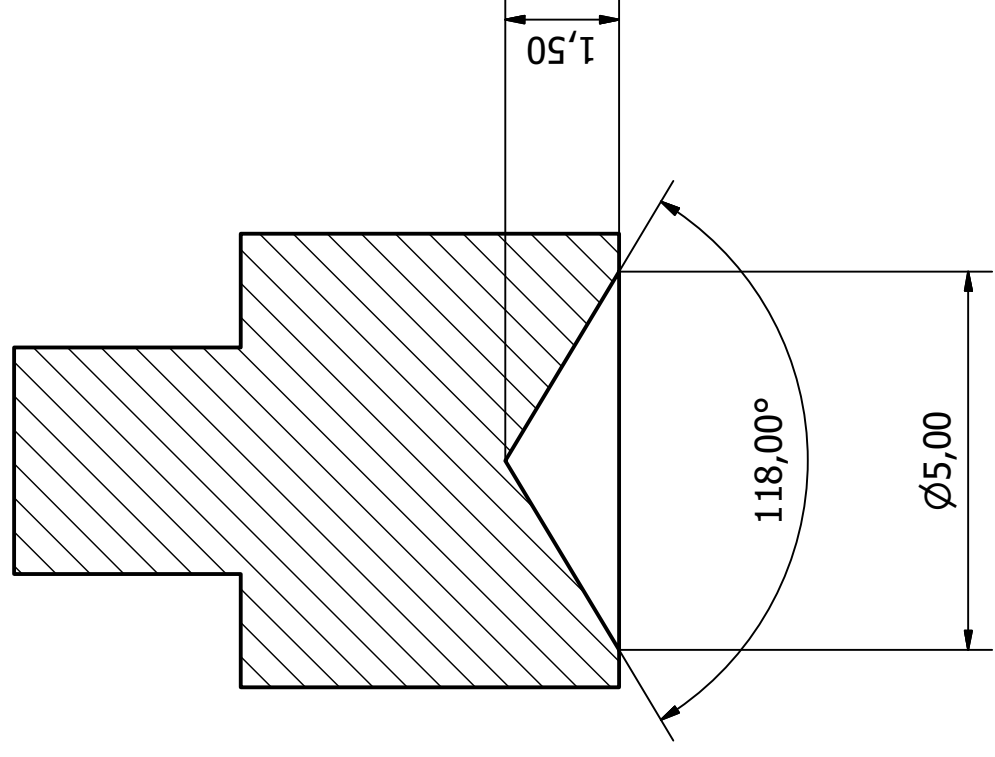
LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL	
10	1	Soporte Tope Micrometrico	Acero AISI 340	
Tolerancias generales		Proyectó	Soporte tope Micrometrico.dwg	
Torneado: ± 0.08 mm		E.S.M.M. 16/12/2020		Facultad de Ingeniería UNMDP
Fresado: ± 0.1 mm		D.S.		
		D.S.		
Escala 2:1		Denominación	 Soporte Tope Micrométrico	
Formato		Nº plano cliente		
		Nº plano:		

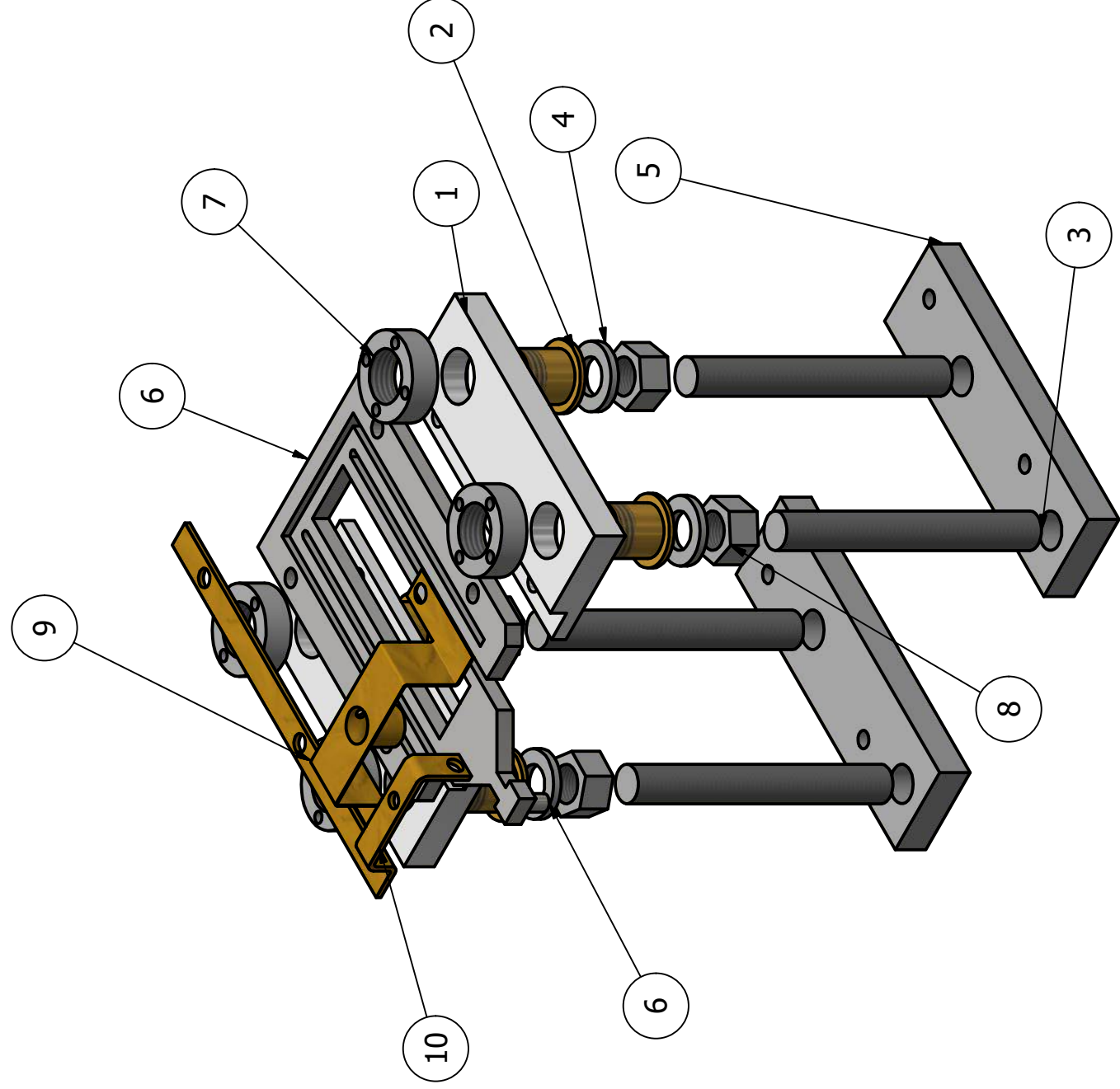


Tolerancias generales		± 0.2		Proyectó		E.S.M.M. 12/3/2021		Facultad de Ingeniería UNMDP		Porta sensores.idw	
				Dibujó		D.S.		Soporte sensores			
				Revisó		D.S.					
				Aprobó		Denominación				N° plano:	
				Escala		1 : 1				Pág. 6	
				Formato							

A-A (10 : 1)





LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL
6	1	Porta Esfera	Delrin
Tolerancias generales			
±0.08 mm			
Proyectó	E.S.M.M.	6/4/2021	Facultad de Ingeniería UNMDP
Dibujó	D.S.		
Revisó	D.S.		
Aprobó	D.S.		
Escala	Denominación		
10 : 1	Porta Esfera		
Formato		Nº plano cliente	
		Nº plano:	
		Pág. 7	



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL
1	2	Guia superior	Acero SAE 1045
2	4	Buje	Delrin
3	4	Varilla Roscada 1/2" 20h/"	Acero inoxidable
4	4	Arandela	Delrin
5	2	Guia inferior	Acero SAE 1045
6	1	Cantilever/portaesferas	Acero SAE 4140/Delrin
7	4	Tuerca de Regulacion	Delrin
8	4	Tuerca de Ajuste	Acero inoxidable
9	1	Soporte tope micrometrico	Acero AISI 340
10	1	Porta sensores	Acero AISI 340

Tolerancias generales Torneado: ±0.08 mm Fresado: ±0.1 mm	Proyectó	E.S.M.M.	19/3/2021	Facultad de Ingeniería UNMDP	Máquina definitiva.idw	
	Dibujó	D.S.				
	Revisó	D.S.				
	Aprobó	D.S.				
Escala 1 : 2			Denominación			
			<h2 style="text-align: center;">Maquina Definitiva</h2>			
Formato						Nº plano cliente
					Nº plano:	
					Pág. 8	

ANEXO 2

Manual de operación y mantenimiento

Manual de instrucciones y mantenimiento

Instrucciones

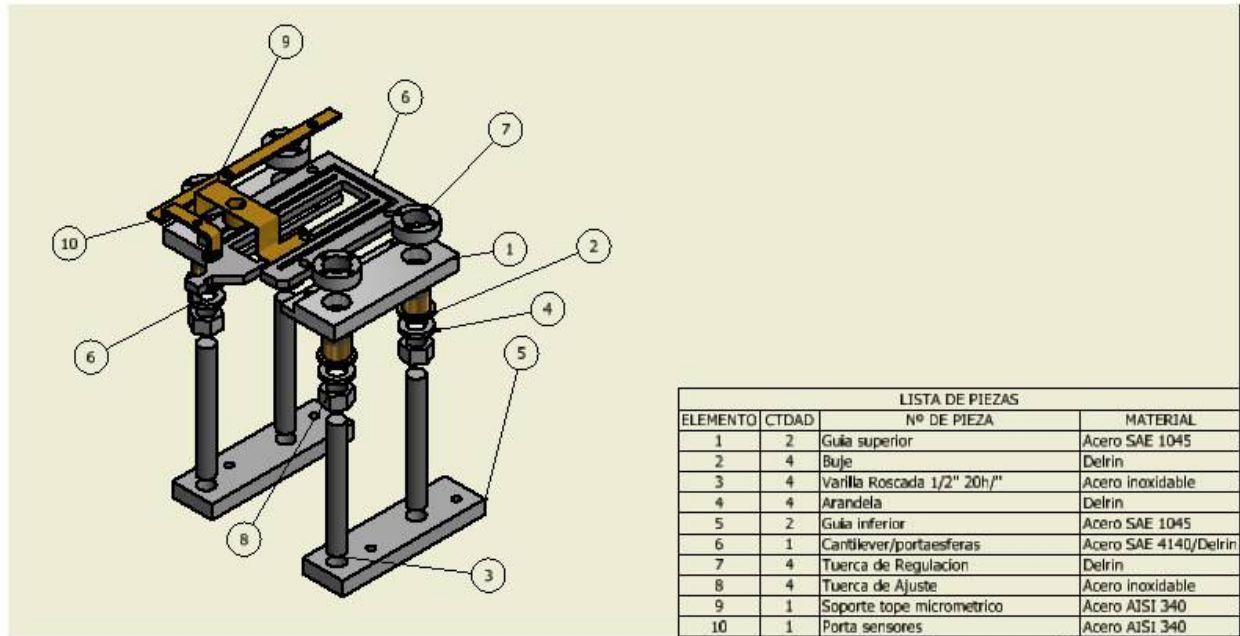


Figura 1. Despiece del conjunto completo

A continuación, se listan los aspectos básicos y la secuencia de operaciones para poder regular la carga de ensayo y saber determinar los valores que arrojan los sensores.

Una vez establecidos los parámetros de ensayo deseados, se procede de la siguiente manera:

1. Asegurarse que el motor, el tope micrométrico, los sensores (entradas y salidas) se encuentren en su posición correspondiente y bien ajustados según se muestra en las siguientes figuras (figuras 2 y 3).

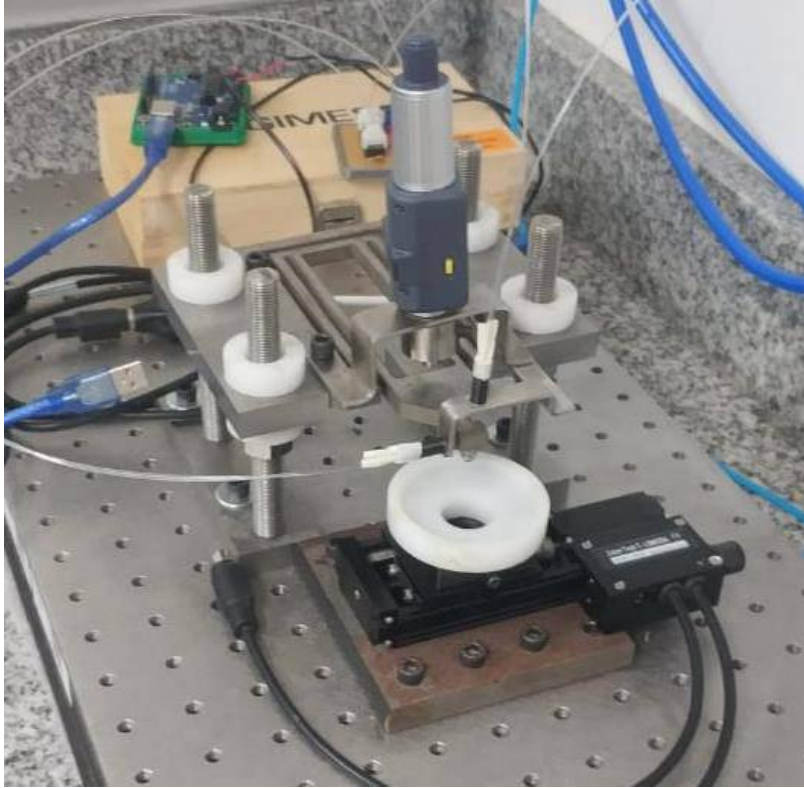


Figura 2. Ensamble completo

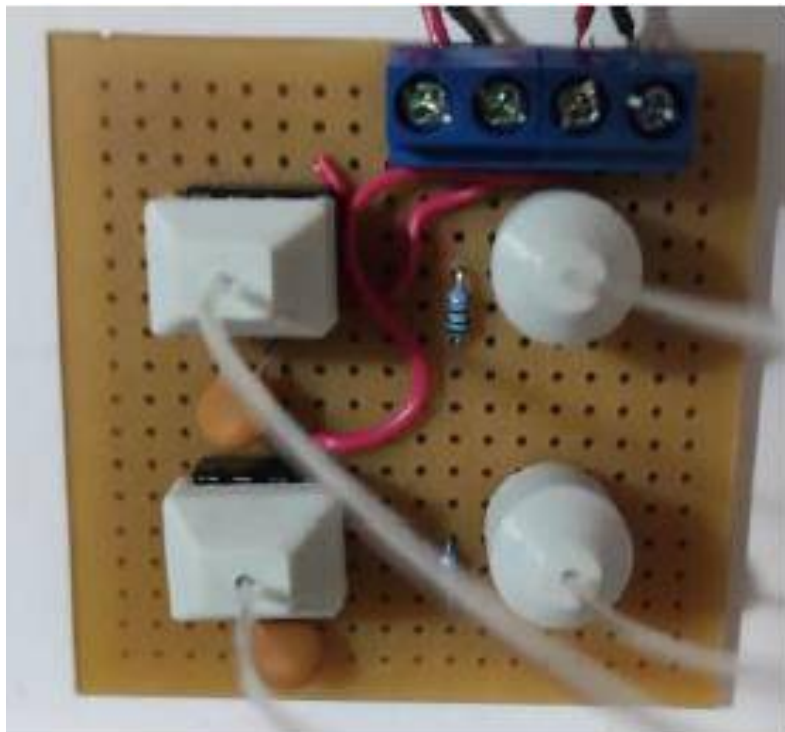


Figura 3. Conexión de sensores en circuito intermedio

2. Verificar que la superficie de la punta donde refleja la luz de los sensores este sin suciedad y mantenga el pulido espejo. Si esto no es así podría traer problemas con los datos obtenidos.

3. Conectar la fuente de energía (computadora) de la placa Arduino y constatar que los LEDs indicadores (de la placa) y emisores (de los sensores) se enciendan.
4. Abrir el programa de Arduino, aparecerá la ventana donde se representa los desplazamientos verticales y tangenciales. Verificar que marque un valor continuo cuando la máquina está estática.
5. Verificar que las tuercas de sujeción se encuentren desajustadas y separadas del cantilever como mínimo la distancia a la que se llevará el mismo.
6. Colocar la probeta en la celda sumergida en el líquido que se desee.
7. Descender el sistema de carga hasta que la esfera haga contacto con la superficie de la muestra. Esto debe realizarse mediante las tuercas de regulación, girándolas en sentido horario con la llave reguladora (figura 4). Hasta acercarse a la muestra, se puede ajustar de a una vuelta máximo por tuerca. Asegurarse de realizar el mismo giro en todas para que el sistema siga nivelado. Luego, cercano a la zona de contacto hacerlo de manera más limitada. El contacto se puede verificar con el valor en cero del sensor vertical, donde al momento de tocar con la muestra marcará un cambio en la pantalla donde representa la señal.



Figura 4. Llave reguladora.

8. Setear en cero el tope micrométrico. Esto se logra llevando la punta del mismo hasta el contacto con el cantilever empleando el embrague y presionando el botón 'set' (mantener apretado el botón on/off). Luego se debe girar (Figura 5) en sentido anti-horario con el fin que suba la punta y permita el libre movimiento del cantilever.



Figura 5. Tope micrométrico.

9. Posterior al contacto, se deberá girar las tuercas hasta alcanzar la carga necesaria. La carga máxima a aplicar es de 100 N, por encima el motor no soportará. Por cada vuelta de tuerca el sistema de carga se desplaza 1.27 mm. Esto se visualiza en el cambio de la señal del sensor vertical.

En la siguiente tabla se presentan los valores de fuerza resultante, según el desplazamiento vertical del cantilever.

Movimiento vertical correcto				
Fuerza [N]	Desplazamiento [μm]	aproximacion por ecuacion lineal [N]	error	tension von Mises
10	473,3	10,02	0,19%	48,77
20	945,7	20,03	0,17%	93,88
30	1418	30,05	0,16%	139
40	1890	40,05	0,13%	184,1
50	2363	50,08	0,16%	229,3
60	2835	60,09	0,15%	274,4
70	3308	70,12	0,16%	319,5
80	3780	80,12	0,15%	364,6
90	4253	90,15	0,17%	409,7
100	4725	100,16	0,16%	454,9

Tabla 1. Valores de fuerza resultante según desplazamiento vertical.

10. Para corroborar la carga fijada, se puede utilizar el tope micrométrico, sabiendo que lo que éste marca, es 0.75 veces la distancia que se desplazó la punta del cantiléver.
11. Una vez establecida la carga del ensayo, se procederá a accionar el motor. Para fijar la frecuencia, amplitud y número de ciclos, se deberá modificar el código de programación presente en la plataforma virtual de Zaber en la computadora de la máquina, siguiendo las instrucciones del mismo.

12. El valor que devolverá el sensor tangencial será el del desplazamiento seteado por el motor menos la deformación del cantilever. esta deformación es debido a la fuerza tangencial. La relación fuerza tangencial- desplazamiento se observa en la siguiente tabla:

Movimiento tangencial	
Fuerza [N]	Desplazamiento [μm]
2,5	20
5	40
7,5	61
10	81
12,5	101
15	122
17,5	142
20	162
22,5	182
25	203

Tabla 2. Valores de fuerza tangencial según desplazamiento de la punta.

La fuerza tangencial está limitada por las características del motor en carga máxima en ese sentido de movimiento.

13. Una vez concluido el ensayo, aflojar las tuercas de sujeción en las 4 varillas. Girar en sentido antihorario las tuercas de regulación y levantar el cantilever para poder quitar la muestra.
14. Retirar la celda portamuestras y limpiar con algún lubricante multiuso las superficies que puedan haber sufrido alguna salpicadura de líquido corrosivo.

Mantenimiento

A continuación, se muestran en un esquema (figura 6) y se listan los componentes del circuito eléctrico intermedio por si fuera necesario reemplazar alguno de ellos.

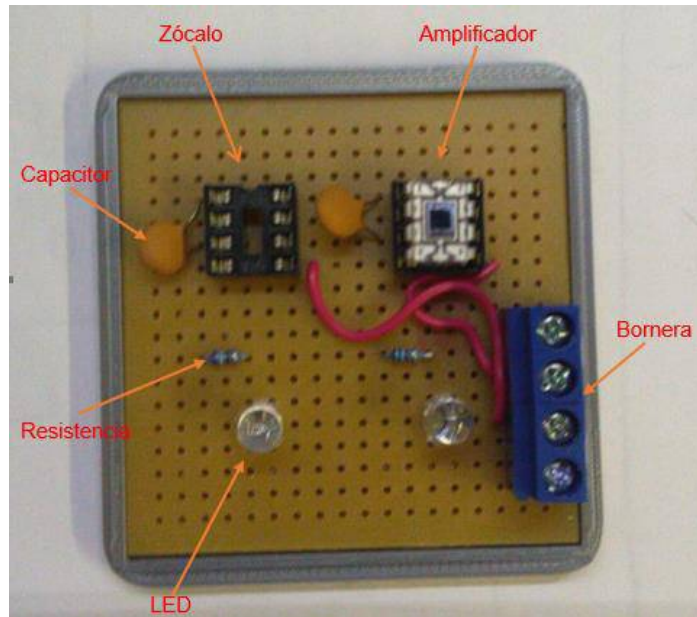


Figura 6. Esquema circuito eléctrico intermedio.

- Resistencia de 100 ohm para LED verde.
- Resistencia de 150 ohm para LED rojo.
- Capacitores de 0,1 μ F.
- Bornera de 4 entradas.
- Zócalo de 8 patas para alojar el circuito integrado.
- Circuito integrado OPT101P-J

Si surgiera un problema en el otro lado del circuito, significa que hay un defecto en la placa Arduino UNO, por lo que se deberá reemplazar la misma.

Montaje y desmontaje de punta de contacto

El portaesferas va montado en la punta del cantilever a presión. En el caso de tener que reemplazarlo solo se retira la punta dañada y se monta la nueva.

Se requiere una mínima alineación y nivelación del sistema para evitar el volcado del fluido corrosivo.