



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

## ROBOTS CONTINUOS BASADOS EN VÉRTEBRAS INTELIGENTES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

GUSTAVO EDUARDO HOLMBERG CORTÉS

PROFESOR GUÍA:  
JUAN ZAGAL MONTEALEGRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
BRUNO GROSSI CÓRDOVA  
RUBEN FERNANDEZ URRUTIA

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: GUSTAVO EDUARDO HOLMBERG CORTÉS  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: JUAN ZAGAL MONTEALEGRE

## **ROBOTS CONTINUOS BASADOS EN VÉRTEBRAS INTELIGENTES**

El siguiente trabajo tiene como objetivo diseñar, construir y estudiar el comportamiento de un robot continuo integrado con un apéndice de vértebras inteligentes inspiradas en la cola del hipocampo.

Para lograr el movimiento se utilizará un sistema inspirado en la actuación de los FOAMS (Fluid-Driven Origami-Inspired Artificial Muscles), sellando herméticamente el robot mediante una membrana flexible que permite generar un diferencial de presión entre en el robot y su entorno, esto a su vez genera tensiones en la membrana que impulsan el movimiento del robot acorde a la geometría del contorno del apéndice.

Aprovechando la geometría de la estructura es posible impulsar movimientos complejos a partir de un único estímulo. Adicionalmente, si se considera la rigidez de los componentes, se pueden diseñar sistemas con respuestas programadas desde el diseño.

A partir de las tecnologías asistidas por computador se estudian y fabrican piezas elásticas que hacen posible un control preciso de la geometría de cada componente.

Con los resultados obtenidos se evidencia que es posible lograr una gama de movimientos tridimensionales diseñados a partir de la respuesta o lógica incluida en el diseño de las vértebras y distribución de ellas en la estructura. Combinando los efectos locales y globales de la rigidez se puede producir un movimiento más complejo que el individual de cada vertebra.

*A toda mi familia que desde siempre dió hasta lo que no tenía para apoyarme, y al amor de mi vida, que convirtió un día en 851 en el comienzo de la mejor aventura.*

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Caracterización de la cola del hipocampo . . . . .	3
2.2. Robots continuos . . . . .	5
2.3. Fluid driven origami inspired artificial muscles (FOAMs) . . . . .	6
2.3.1. Bases teóricas . . . . .	7
2.4. Termoplásticos . . . . .	7
2.4.1. Elastómeros termoplásticos . . . . .	9
<b>3. Desarrollo del trabajo</b>	<b>10</b>
3.1. Proceso de diseño . . . . .	10
3.1.1. Caracterización del robot . . . . .	12
3.1.1.1. Flexión y retracción . . . . .	12
3.1.1.2. Vértebra . . . . .	14
3.1.1.3. Segmento . . . . .	15
3.1.1.4. Apéndice . . . . .	17
3.1.2. Lógica de control del sistema . . . . .	17
3.1.3. Diseños de las vértebras . . . . .	18
3.1.4. Simulación . . . . .	20
3.2. Proceso de fabricación . . . . .	22
3.2.1. Selección de materiales . . . . .	22
3.2.2. Parámetros de impresión . . . . .	23
3.3. Fabricación del actuador . . . . .	26
3.3.1. Sistema de succión . . . . .	26
3.3.2. Membrana y conexión . . . . .	26
3.4. Toma de datos . . . . .	27
3.4.1. Peso de las piezas . . . . .	27
3.4.2. Pruebas de flexión . . . . .	27
3.4.2.1. Cola S frontal . . . . .	28
3.4.2.2. Cola S lateral . . . . .	29
3.4.2.3. D2 perfil S . . . . .	29
3.4.2.4. D3 perfil S . . . . .	30
3.4.2.5. D4 perfil S rugoso . . . . .	30
3.4.2.6. D4 perfil S liso . . . . .	31
3.4.2.7. D4 Perfil S retracción . . . . .	31
3.4.3. Prueba de impacto . . . . .	32



<b>4. Resultados</b>	<b>33</b>
4.1. Efecto de la orientación del sellado de la membrana . . . . .	33
4.2. Efecto de la terminación superficial de la membrana . . . . .	34
4.3. Deflexión del apéndice . . . . .	36
<b>5. Análisis y Discusión</b>	<b>39</b>
<b>6. Trabajo propuesto</b>	<b>41</b>
<b>7. Conclusión</b>	<b>43</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>45</b>
<b>8. Anexos</b>	<b>46</b>
<b>Anexo A. Equipos utilizados</b>	<b>47</b>
<b>Anexo B. Planos</b>	<b>51</b>
<b>Anexo C. Simulaciones</b>	<b>54</b>
<b>Anexo D. Capturas fotográficas de las pruebas</b>	<b>55</b>
<b>Anexo E. Código Python</b>	<b>63</b>
<b>Anexo F. Links relacionados</b>	<b>71</b>

# Índice de Tablas

3.1.	Nombres de las variables . . . . .	13
3.2.	Distribución de segmentos utilizados por video . . . . .	17
3.3.	Parámetros del diseño D2 y D4 . . . . .	20
3.4.	Parámetros de impresión seleccionados . . . . .	25
3.5.	Nomenclatura de los videos . . . . .	25
3.6.	Pesos por componente. . . . .	27
3.7.	Fuerza aplicada en el área de contacto del peso . . . . .	32
4.1.	RSE Cola S frontal . . . . .	34
4.2.	RSE Cola S lateral . . . . .	34
4.3.	RSE D4 perfil S liso . . . . .	35
4.4.	RSE D4 perfil S rugoso . . . . .	35
4.5.	RSE D1 perfil S . . . . .	36
4.6.	RSE D3 perfil S . . . . .	37
4.7.	RSE D4 perfil S rugoso . . . . .	37
4.8.	RSE D4 perfil S retracción. . . . .	38
C.1.	Configuraciones utilizadas . . . . .	54
F.1.	Links a recursos adicionales. . . . .	71

# Índice de Ilustraciones

2.1.	(A y B) Imagen $\mu$ CT del (A) esqueleto de un Hipocampo (H. reidi) y (B) su cola. (C) Imagen $\mu$ CT de un segmento de la cola de un hipocampo (H. kuda) después de ser comprimido a un 60 % de su altura original [4]. . . . .	4
2.2.	Cola del Hipocampo ventralmente flectada en una espiral logarítmica. (A) Gráfico del ángulo de rotación de la cola del Hipocampo (H. kuda) desde la base proximal (0 %) hasta el extremo distal (100 %) de la cola en diferentes orientaciones de flexión [4]. . . . .	5
2.3.	Curvatura de estructuras discretas vs continuas[6]. . . . .	6
2.4.	Clasificación de técnicas de fusión de termoplásticos [9] . . . . .	8
2.5.	Técnicas de fusión de termoplásticos [9] . . . . .	8
3.1.	Diagrama de flujo seguido a lo largo de todo el proyecto. . . . .	10
3.2.	Fractura por uso, maqueta PLA, sin separación. . . . .	11
3.3.	Maqueta con puentes. . . . .	11
3.4.	Primera aproximación. . . . .	11
3.5.	Descomposición de las fuerzas que impulsan el movimiento del músculo artificial con patrón de resorte. . . . .	13
3.6.	Descomposición de las fuerzas que interactúan en un músculo artificial con patrón de monte . . . . .	14
3.7.	Simulación del desplazamiento de una vértebra correspondiente al diseño 4. . .	15
3.8.	Simulación del desplazamiento de la vértebra activada. . . . .	16
3.9.	vértebras de las distintas fases de diseño. . . . .	18
3.10.	Apéndices de las distintas fases de diseño. . . . .	18
3.11.	Unión clavija implementada desde el segundo diseño. . . . .	19
3.12.	Vista isométrica del diseño 4. . . . .	19
3.13.	Prueba de funcionamiento segundo diseño . . . . .	20
3.14.	Vistas laterales, simulación de esfuerzos en la vértebra d2. . . . .	21
3.15.	Vistas laterales, simulación de esfuerzos en la vértebra d3. . . . .	22
3.16.	Vistas laterales, simulación de esfuerzos en el segmento $S_{2a}$ de diseño d4. . . .	22
3.17.	Archivo STL del cubo de calibración. . . . .	23
3.18.	Vista eje x del Resultado de las pruebas a) b) c) d) . . . . .	24
3.19.	Vista eje y del Resultado de las pruebas: a) b) c) d) . . . . .	24
3.20.	Componentes principales del sistema de succión . . . . .	26
3.21.	Proceso de sellado de la membrana [7] . . . . .	26
3.22.	Punto de unión entre la bomba, el vacuómetro y el robot . . . . .	27
3.23.	Cola S lateral . . . . .	29
3.24.	D2 perfil S . . . . .	29
3.25.	D3 perfil S . . . . .	30
3.26.	D4 perfil S rugoso . . . . .	30

3.27.	D4 perfil S liso. . . . .	31
3.28.	D4 perfil S retracción. . . . .	31
3.29.	Diagrama de la prueba realizada a las vértebras d1 y d4. . . . .	32
3.30.	Estado del apéndice posterior a la prueba de impacto . . . . .	32
4.1.	Cola S frontal . . . . .	33
4.2.	Cola S lateral . . . . .	34
4.3.	D4 perfil S liso . . . . .	35
4.4.	D4 perfil S rugoso . . . . .	35
4.5.	D1 perfil S . . . . .	36
4.6.	D3 perfil S . . . . .	36
4.7.	D4 perfil S rugoso . . . . .	37
4.8.	D4 perfil S retracción. . . . .	37
A.1.	Impresora Ender 5 . . . . .	47
A.2.	TPE . . . . .	48
A.3.	Fuente de poder . . . . .	48
A.4.	Bomba de vacío . . . . .	49
A.5.	Vacuómetro . . . . .	49
A.6.	Selladora . . . . .	50
A.7.	Bolsas de sellado . . . . .	50
B.1.	Plano del diseño 1, vértebra flexible. . . . .	51
B.2.	Reemplazo del hilo elástico. . . . .	52
B.3.	Plano del diseño 2, vértebra rígida . . . . .	52
B.4.	Plano del diseño 2, vértebra flexible . . . . .	53
B.5.	Plano del diseño 3 . . . . .	53
D.1.	Cola 12 grados . . . . .	55
D.2.	Cola 24 grados . . . . .	56
D.3.	Cola 36 grados . . . . .	56
D.4.	Cola S frontal . . . . .	57
D.5.	Cola S lateral . . . . .	57
D.6.	D2 perfil S . . . . .	58
D.7.	D3 perfil S . . . . .	58
D.8.	D4 perfil S retracción . . . . .	59
D.9.	D4 diagonal . . . . .	59
D.10.	D4 diagonal n . . . . .	60
D.11.	D4 perfil S liso . . . . .	60
D.12.	D4 perfil S rugoso . . . . .	61
D.13.	D4 S ortogonal frente . . . . .	61
D.14.	D4 S ortogonal lateral . . . . .	62

# Capítulo 1

## Introducción

En los últimos años, el interés por el estudio de los robots continuos se ha disparado debido a las potenciales ventajas que proporcionan frente a los sistemas tradicionales<sup>[1]</sup>; como una mejor maniobrabilidad o su capacidad para deformarse y navegar en espacios reducidos. Estas características les dan ventajas en tareas que requieren de movimientos precisos en entornos delicados; así es el caso de la cirugía mínimamente invasiva, donde los instrumentos quirúrgicos flexibles de estilo continuo permiten llegar a lugares inaccesibles operando con dispositivos tradicionales<sup>[2]</sup>.

Su fluidez de movimiento se debe principalmente a su origen bioinspirado; lo que significa que el diseño de estos robots suele modelarse imitando soluciones que se encuentran en la anatomía de otros organismos vivos; por ejemplo, el cuerpo de las serpientes o la trompa de los elefantes. Los diseños en el presente trabajo se basaron a su vez en la cola del hipocampo<sup>[3]</sup>, apéndice que debido a sus particulares características ha sido objeto de distintos estudios sobre aspectos como su genoma, la evolución de su morfología, la mecánica de su movimiento, entre otras. Lo que hace a la cola del hipocampo tan particular, es que su columna vertebral es protegida por una serie de discos óseos superpuestos; configuración que le otorga una serie de características interesantes de replicar, como lo es por ejemplo su alto grado de flexibilidad y absorción de impacto.

Otra línea de investigación relevante al diseño de robots continuos es aquella que estudia los músculos artificiales actuados mediante diferenciales de presión (FOAMS). A partir de su geometría de estructuras selladas herméticamente dentro de las membranas, al momento de retirar el fluido dentro de la membrana, y debido a la distribución de fuerzas que generan los pliegues, son capaces de levantar pesos muy superiores al propio. Además, al utilizar presiones negativas se reduce en gran medida el riesgo de explosión de componentes, por lo que este tipo de robots son altamente seguros.

En el siguiente trabajo, aprovechando las ventajas que ofrecen las técnicas de modelado por deposición fundida; propias de las impresoras 3D, y junto al uso de software CAD/CAM, se busca diseñar y construir un robot continuo inspirado en la estructura de la cola del hipocampo.

### **Objetivo general:**

El presente trabajo tiene como objetivo general diseñar, construir y estudiar el comportamiento de un robot continuo integrado con un sistema de vértebras inteligentes bioinspiradas, que debe ser capaz de moverse con múltiples grados de libertad.

### **Objetivo específicos:**

1. Diseñar y modelar el sistema de vértebras utilizadas en el robot, y la geometría utilizada para fabricar los actuadores del robot.
2. Fabricar las vértebras y actuadores acorde a los diseños anteriores.
3. Realizar experimentalmente pruebas de flexibilidad y mediante software de elemento finito.
4. Realizar pruebas de impacto y evaluar el daño.

### **Alcances:**

Los alcances de este trabajo de título abarcan desde el diseño de las vértebras y músculos artificiales, hasta su evaluación. Primero de manera computacional a partir de software especializado, y luego, experimentalmente utilizando las pruebas mencionadas en la sección de metodología. Esto implica que posterior al diseño se realizará la impresión 3D de las piezas necesarias, se prepararán los materiales que deban ser trabajados y se fabricará tanto el sistema de actuación como el ambiente de experimentación.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1. Caracterización de la cola del hipocampo

A diferencia de la mayoría de las colas presentes en el reino animal, los hipocampos presentan una armadura ósea de estructura cuadrada que acompaña a la vértebra. Esta estructura le otorga una ventaja comparativa frente a otros animales marinos, ya que su cola de caras planas aumenta la superficie de contacto con corales y otros objetos. Además, gracias a su flexibilidad, puede enrollar su cola en si misma (2.2) aumentando el agarre.

Desde el punto de vista mecánico-estructural es claro que el hipocampo opta por una estrategia de supervivencia que minimiza el gasto energético. Su estructura no solamente funciona como un método de defensa pasivo, sino que también permite al hipocampo pasar tiempos prolongados aferrado a un lugar, mientras que con su boca tubular realiza un movimiento rápido de cabeza para capturar su alimento.

Este es un claro ejemplo de una evolución que sacrificó la velocidad en pos de estructuras especializadas. Estas estructuras pueden presentar soluciones no convencionales a problemas generalizables a otras situaciones, por lo que son de especial interés para el campo de la biomimética. Por ejemplo; un estudio realizado para analizar las ventajas de la sección cuadrada de la cola <sup>[4]</sup> (en comparación a una sección circular) concluyó que esta sección otorga al hipocampo ventajas mecánicas en la flexión, torsión y frente a la resistencia a impactos.

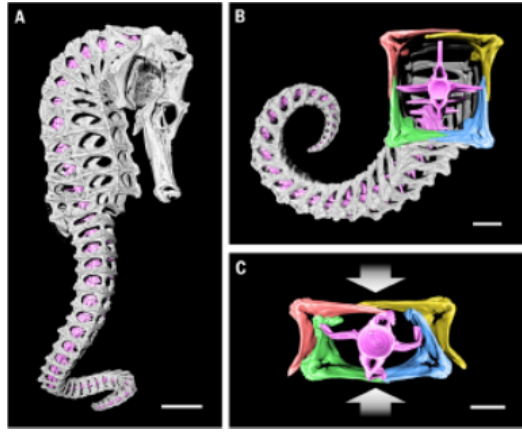


Figura 2.1: (A y B) Imagen  $\mu$  CT del (A) esqueleto de un Hipocampo (*H. reidi*) y (B) su cola. (C) Imagen  $\mu$  CT de un segmento de la cola de un hipocampo (*H. kuda*) después de ser comprimido a un 60% de su altura original [4].

Tal como se puede ver en la figura 2.1 la cola se compone por seis elementos principales, cuatro placas óseas que demarcan los vértices del segmento (dorsal-dextral, dorsal-sinistral, ventral-dextral y ventral-sinistral), la vértebra central y las uniones entre la vértebra central y las placas [5].

Debido a los tipos de uniones que existen entre los alerones de la vértebra, cuando se aplican fuerzas compresivas a la estructura, como en el caso de la figura 2.1 esta se deforma, permitiendo que se absorba gran parte de la energía de potenciales impactos y de esta manera, se protege a la vértebra central. Esta compresibilidad le permite además al hipocampo, sin provocar daños internos, flectar su cola en hasta  $850^\circ$  (2.2). Esto se debe a que al momento de realizar el movimiento se genera un ángulo de inclinación de no más de  $12^\circ$  entre cada una de los segmentos, de esta manera, con la gran cantidad de segmentos, se logra un amplio rango de movimiento lo que captura la esencia del diseño de la cola, cambios discretos repetidos numerosamente para lograr un movimiento final.



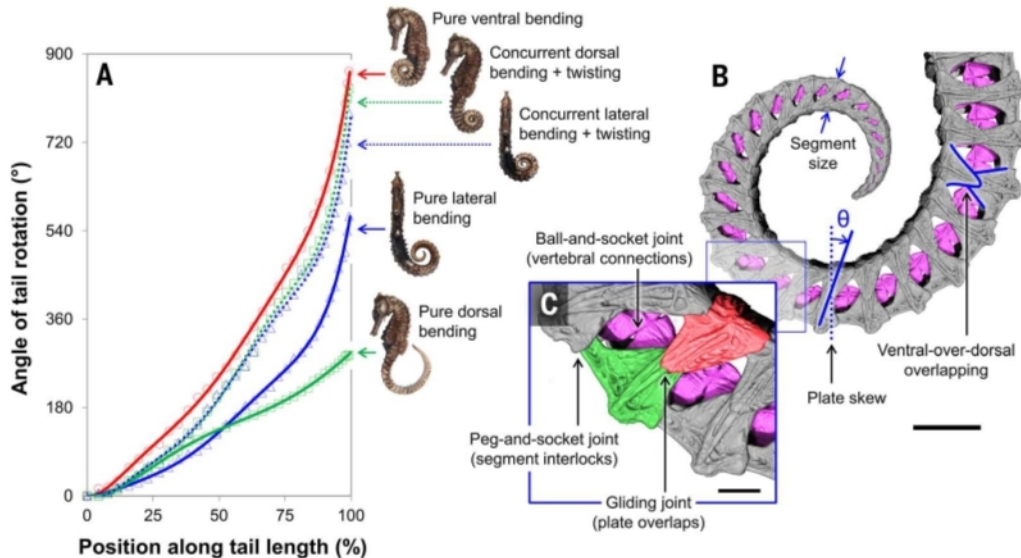


Figura 2.2: Cola del Hipocampo ventralmente flectada en una espiral logarítmica. (A) Gráfico del ángulo de rotación de la cola del Hipocampo (*H. kuda*) desde la base proximal (0%) hasta el extremo distal (100%) de la cola en diferentes orientaciones de flexión [4].

Por último, cabe destacar que la estructura de la cola no es la única peculiaridad que presenta el hipocampo, las mismas placas óseas son compuestos inorgánicos/orgánicos altamente deformables. En comparación con el fémur de un bovino, el hipocampo presenta un menor porcentaje de contenido mineral y mayor de agua, lo que amortigua impactos y reduce el riesgo de fracturas. Además estas placas contienen agrupaciones de microtubulos alineados que aportan rigidez ante el pandeo, lo que hace que las placas sean altamente anisotrópicas. Estas fibras de colágeno que se mineralizan ayudan a resistir el pandeo y evitar la propagación de grietas en el hueso.

## 2.2. Robots continuos

Los robots continuos son sistemas electromecánicos, hiperflexibles, con infinitos grados de libertad, lo que les permite maniobrar en entornos complejos y generar movimientos que normalmente no serían posibles para otros robots. Aun así, debido a la no linealidad de sus movimientos, estos robots son más complejos de controlar y podrían representar un problema a las industrias que adopten este tipo sistemas [6].

Tal como se puede apreciar en la figura 2.3 a medida que aumenta el número de secciones, la curvatura y movimientos son más suaves, ofreciendo una mayor flexibilidad y precisión, con el costo de un control más complejo.

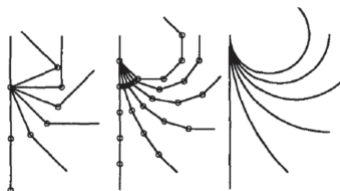


Figura 2.3: Curvatura de estructuras discretas vs continuas[6].

Un típico robot que se puede encontrar en sitios industriales consiste en una serie de uniones rígidas ancladas al suelo, que trabajan en conjunto para controlar la posición de un actuador ubicado al final del robot. Debido al reducido número de secciones y grados de libertad que permite cada unión, el control de estos dispositivos es relativamente sencillo. En contraste, la complejidad del movimiento de los robots continuos viene acompañado de un gran potencial para un amplio rango de aplicaciones e industrias.

En general, existe una gran diferencia entre los robots que transmiten movimiento a través de cables y los que no, teniendo una relación inversa entre la facilidad de control y la complejidad de su estructura. En el presente trabajo se presenta un compromiso entre ambos, buscando un sistema con el potencial para tener un comportamiento continuo, facilitando su control mediante la discretización de su estructura y restricción selectiva de sus grados de libertad.

La estructura concebida en este trabajo resulta análoga a los robots continuos multi-segmento/multi-disco, ya que cada segmento del apéndice de la cola puede ser considerado como un disco asimétrico. Las vértebras y secciones se unen entre ellas, por lo que además de la membrana no existe una estructura continua que acompañe al apéndice. Gracias a esto, el robot puede retraerse y es más liviano que sus contrapartes, favoreciendo su movilidad [6] sobre otras características.

### 2.3. Fluid driven origami inspired artificial muscles (FOAMs)

Los FOAMS son músculos artificiales actuados mediante un fluido, normalmente esto se logra con membranas o tubos flexibles. En esta instancia se estudiará el mecanismo de actuación por vacío, sellando herméticamente el robot mediante una membrana flexible que permite generar un diferencial de presión entre en el robot y su entorno.

Ya que el mecanismo de actuación requiere de un sellado hermético, este sistema puede ser utilizado en contacto con distintos fluidos e incluso ser sumergido manteniendo el funcionamiento [7]. Gracias a esto presenta una buena alternativa para distintos tipos de aplicaciones médicas y de rescate.

Adicionalmente a la actuación, la aplicación de técnicas de origami que utilizan los FOAMS, requieren a partir de una selección cuidadosa de restricciones al movimiento, producir una redistribución de fuerzas que favorezca al movimiento deseado. Las bases teóricas respecto a esto han sido revisadas en estudios anteriores y cimientan las bases del presente trabajo.

### 2.3.1. Bases teóricas

En estudios anteriores realizados por Lia Shuguang [7], para el mismo sistema de FOAMs actuados por vacío [8], se derivó la siguiente relación.

Para calcular la fuerza teórica producida por el actuador se suma de las tensiones de la membrana, con la fuerza que empuja la sección transversal del actuador cuando existe un diferencial de presiones  $\Delta P$  entre el fluido al interior y exterior de la membrana.

$$F_{output} = 2T_x + F_p \quad (2.1)$$

Adicionalmente, la fuerza que empuja la sección transversal se puede calcular como el diferencial de presión por el área transversal, o descomponiendo el área en alto (H) y ancho (W) del actuador

$$F_p = \Delta P \times A = \Delta P H W \quad (2.2)$$

En cuanto a la componente horizontal de la tensión, se realiza una simple descomposición de fuerzas con respecto a la tensión total, considerando el ángulo entre T y la horizontal.

$$T_x = T \cos \beta \quad (2.3)$$

$$\beta = \arccos \frac{L}{R} \quad (2.4)$$

A partir de la ley de Laplace.

$$\Delta P = T * \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.5)$$

Además puede aproximar la tensión conociendo el radio de curvatura de la membrana en el punto de contacto 0.

$$T = \Delta P \times R \times W \quad (2.6)$$

Considerando que la curvatura de la membrana se puede aproximar por una curva parabólica, queda que R se expresa de la siguiente manera.

$$R = \frac{(1 + (\frac{4h}{c})^2)^{\frac{3}{2}}}{\frac{8h}{c^2}} = \frac{L^2(1 + (\frac{2h}{L})^2)^{\frac{3}{2}}}{2h} \quad (2.7)$$

## 2.4. Termoplásticos

Al momento de seleccionar los materiales a utilizar, uno de los puntos más relevantes recae en la facilidad para trabajar el material. Ya que el sellado hermético requerido pone una carga significativa sobre los mecanismos para unir las dos capas de la membrana, es necesario seleccionar aquellos materiales pueden ser trabajados con facilidad, pero sin perder resistencia o integridad frente a los cambios de presión a los que e verán sometidos en la actuación del robot.

Dentro de las opciones evaluadas destacan los termoplásticos, esto es principalmente ya que en comparación a otros materiales puede ser laminados a espesores muy bajos y existen numerosas técnicas para trabajar con estos materiales, muchas de ellas requieren poco equipo especializado y pueden ser trabajados a nivel de prototipado, pero una vez escalada la producción es un producto reciclable que permite la incorporación de economías circulares al proceso productivo, manteniendo un bajo peso y buenas propiedades mecánicas.

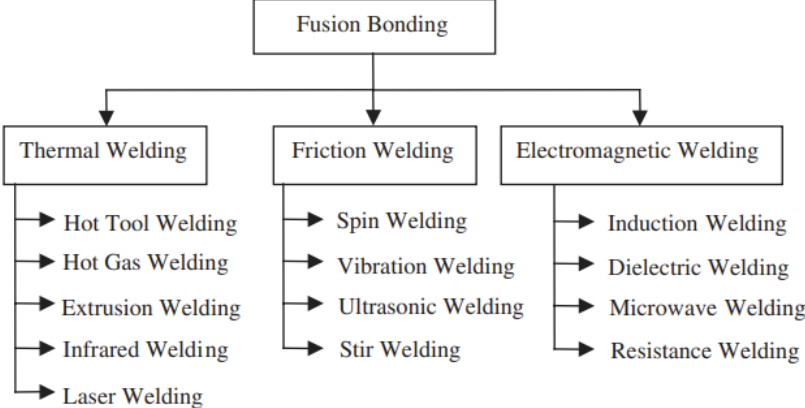


Figura 2.4: Clasificación de técnicas de fusión de termoplásticos [9]

Como se mencionó anteriormente, existe múltiples técnicas para trabajar con termoplásticos 2.4 pero las más accesibles y relevantes para este estudio son: **hot tool welding**, **extrusion welding** y **resistance welding**. En las siguientes secciones se discutirán los contextos de aplicación de estas técnicas acompañadas de resultados del proceso.

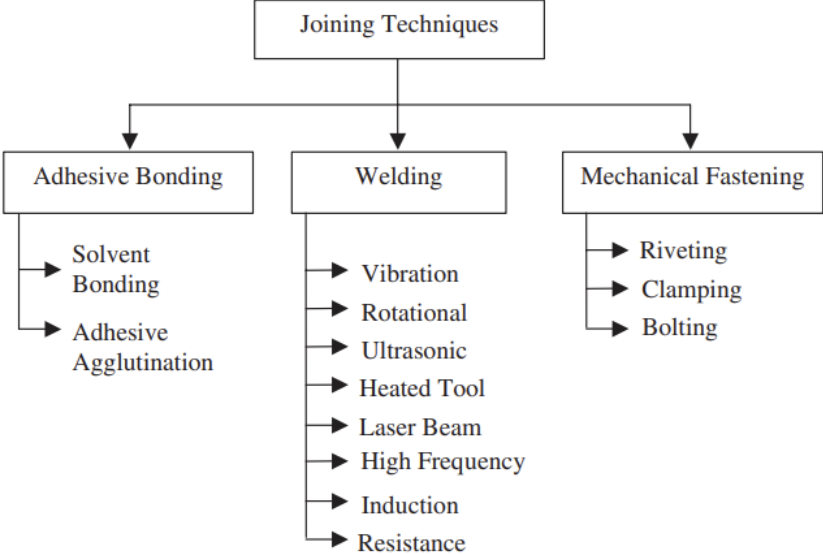


Figura 2.5: Técnicas de fusión de termoplásticos [9]

Además de las técnicas de fusión existen otros dos tipos de uniones que fueron consideradas para el proceso de fabricación del robot. pero las uniones mecánicas como remaches, pernos y

otros, fueron descartadas posteriormente debido a que las concentraciones de esfuerzo podrían en algunos casos afectar el movimiento de la membrana.

### **2.4.1. Elastómeros termoplásticos**

Cabe destacar una categoría de elastómeros que poseen propiedades muy particulares: El TPE es parte de la familia de elastómeros termoplásticos que la norma ASTM D1566 define como un grupo de materiales similares al caucho, que a diferencia del caucho vulcanizado convencional, pueden ser procesados y reciclados como materiales termoplásticos. A diferencia de otros elastómeros el TPE puede ser fácilmente procesado con técnicas tradicionales de los termoplásticos. Esto implica la posibilidad de crear piezas por inyección, extrusión, e incluso por soplado, esto además de su flexibilidad lo convierten en un buen material para cualquier desarrollo en robots blandos.

Gracias a los últimos desarrollos en la tecnología de impresión 3d, es posible utilizar filamentos que tienen una temperatura de transición vítrea más alta, permitiendo imprimir piezas flexibles con una precisión de 0.5mm. En el siguiente estudio se toma ventaja de esta precisión para fabricar piezas con geometrías complejas, de manera que se pueda ajustar la rigidez en distintas secciones del apéndice.

# Capítulo 3

## Desarrollo del trabajo

### 3.1. Proceso de diseño

Debido a los altos tiempos de espera en las entregas de componentes y equipos se optó por seguir la metodología de prototipado rápido ya que a pesar de no tener los medios para realizar pruebas desde un inicio, los problemas de fabricación pueden causar retrasos inesperados si no son resueltos antes de comenzar la producción de piezas.

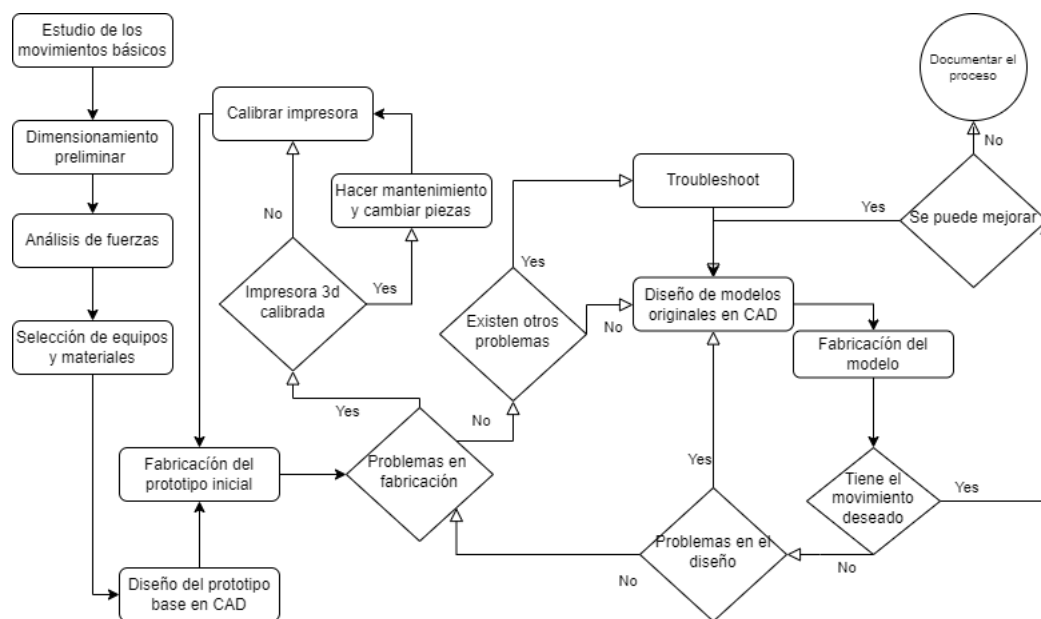


Figura 3.1: Diagrama de flujo seguido a lo largo de todo el proyecto.

Tal como indica el diagrama 3.1, si bien el trabajo comienza con los estudios teóricos de las reacciones y movimientos, una vez se obtuvo una base suficiente de antecedentes se comenzó con maquetas demostrativas de los movimientos y prototipos iniciales de las vértebras. De esta manera se pueden resolver tempranamente los problemas con las herramientas e fabricación y materiales, concentrando los esfuerzos finales en ajustar el diseño de las vértebras.

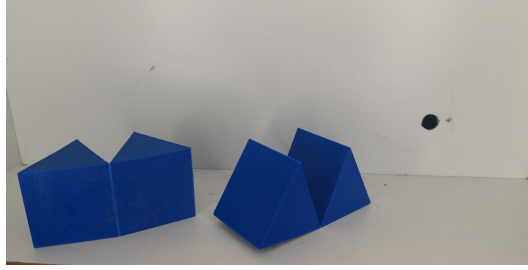


Figura 3.2: Fractura por uso, maqueta PLA, sin separación.

Las primeras maquetas se inspiraron en el trabajo de Lia Shuguang con FOAMS [7], a partir de esto se estableció una línea base para los desarrollos posteriores, pudiendo evaluar movimientos simples y estudiar los efectos de ajustar parámetros dentro del diseño. A partir de estas maquetas se pudo verificar el efecto de modificar la posición de los centros de giro aliviando los esfuerzos que podrían producir fracturas en las piezas.

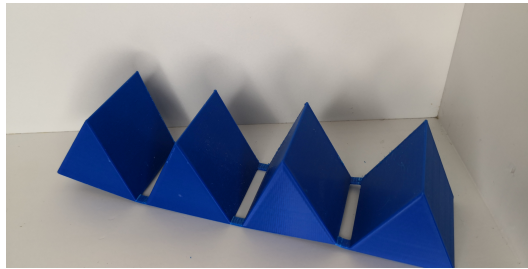


Figura 3.3: Maqueta con puentes.

Al aumentar la distancia entre los montes se observó una menor concentración de esfuerzos que en la maqueta inicial, pero la banda que unía los montes opuso mucha resistencia, para solucionar esto se removió parte de esta banda dejando únicamente dos puentes que unen los montes. A partir de este concepto de modificar la rigidez local para facilitar el giro, nació la base que se encuentra detrás de este trabajo.

Una vez iniciada la fase de prototipado, se comenzó por crear diseños rudimentarios que mantuvieran las principales características de la estructura de la cola del hipocampo. 3.4.



Figura 3.4: Primera aproximación.

Para simular el efecto de las uniones deslizantes y de clavija, se utilizó en una primera instancia hilo elástico, ya que este permite un juego similar al visto en las colas de los hipocampos. El hilo elástico fue utilizado en algunos diseños pero finalmente se optó por

removerlo del diseño final, ya que se pudo simular su efecto a partir de otras estructuras incluidas en los diseños finales.

### 3.1.1. Caracterización del robot

Como se comentó anteriormente el sistema diseñado puede ser clasificado como un robot continuo multi-segmento/multi-disco actuado pneumáticamente mediante vacío[6].

Este sistema aprovecha la geometría innata de la cola del hipocampo, en conjunto con modificaciones de algunos parámetros, para guiar las fuerzas producidas por el diferencial de presión y producir movimientos en más de una orientación.

El movimiento realizado se logra manipulando la rigidez en los vértices y haciendo el mecanismo compliant frente a algunos estímulos.

Para entender mejor el comportamiento del apéndice es necesario subdividir el problema y comprender las interacciones de los distintos elementos presentes en el sistema, además del efecto que produce su combinación.

#### 3.1.1.1. Flexión y retracción

En la base del diseño de las piezas se encuentran dos movimientos clave, la flexión y retracción. Al utilizar el sistema de actuación de los FOAMS, esencialmente se desea utilizar la tensión que existe en la membrana para generar un movimiento. Esto se logra incluyendo vacancias de geometrías específicas en la estructura.

La retracción se logra creando una geometría similar a un resorte (3.5), de esta manera cuando se aplica una fuerza axial disminuye el largo de la vértebra, este  $\Delta x = b * \min\{N_{izq}, N_{der}\}$  es igual a la base de la vacancia por el número de vacancias en el lado con menos de ellas. Cualquier desbalance en el número de vacancias producirá una mayor flexión pero someterá al componente a esfuerzos más concentrados.

Ahora observando la figura 3.6, la flexión funciona de manera similar al caso anterior, pero cuando la membrana se tensa, encuentra oposición en uno de los lados de la estructura, por lo que la vértebra se acorta solo de un lado y esta diferencia curva la estructura hacia el lado con las vacancias.



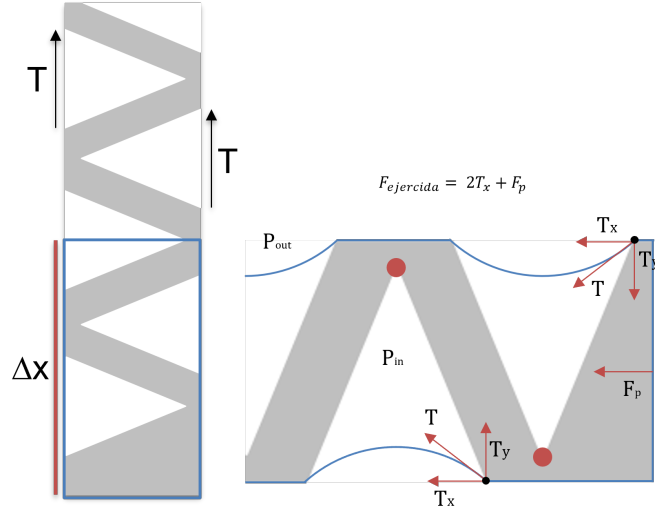


Figura 3.5: Descomposición de las fuerzas que impulsan el movimiento del músculo artificial con patrón de resorte.

Si se piensa en un cilindro empotrado al piso y se le aplica una fuerza  $F$  en la parte más alta del cilindro, la deflexión estará determinada por las propiedades físicas y geométricas del material.

$$k_i = \frac{F}{\delta_i} \quad (3.1)$$

$$k_i = \alpha_i \frac{ES_i}{L^{\beta_i}} \quad (3.2)$$

donde:

Tabla 3.1: Nombres de las variables

$k_i$	Rigidez
$\delta_i$	Módulo de deflexión en el eje $i$
$F$	Fuerza aplicada
$E$	Módulo de Young
$L_i$	Longitud de la barra
$S_i$	Magnitud puramente geométrica dependiente del tamaño y forma de la sección transversal
$\alpha_i$	Coficiente adimensional dependiente del tipo de rigidez que se está examinando
$\beta_i$	Coficiente adimensional dependiente del tipo de rigidez que se está examinando

Para controlar la respuesta del cilindro se pueden crear vacancias que regulan la rigidez de

la estructura a partir del cambio de sección, de esta manera se pueden crear puntos bisagra en los que se concentra el giro. Estos puntos son más proclives a la ruptura y deben ser considerados en el diseño para evitar la falla del componente en el primer uso.

En la figura 3.6 se puede apreciar el efecto de aplicar vacío a una estructura elástica, con un patrón de montes y valles. Cuando la membrana se comienza a tensar forma un arco entre los vértices opuestos de manera que el manto formado determina el área con la que se puede calcular la fuerza local producida por el diferencial de presión [8].

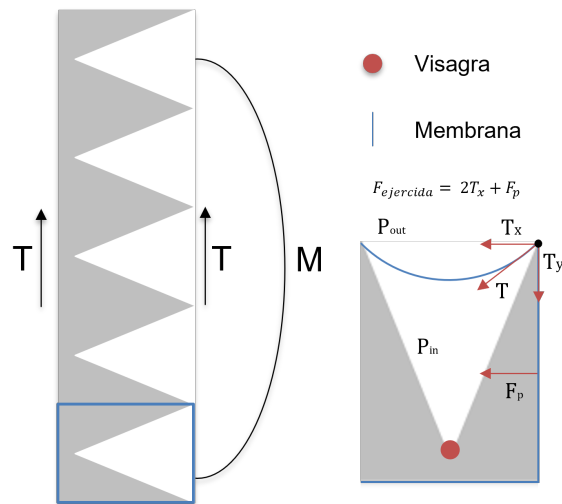


Figura 3.6: Descomposición de las fuerzas que interactúan en un músculo artificial con patrón de monte

A partir de la reducción asimétrica del largo del apéndice, se produce una curva relacionada a la diferencia de largos entre las vértebras. Este efecto es más suave que la flexión pura pero es necesario considerarlo ya que este efecto se percibe antes de que comience

### 3.1.1.2. Vértebra

En el diseño final existen 2 tipos de vértebras una flexible y otra rígida. La vértebra flexible tiene un comportamiento similar a un resorte frente a cargas axiales y en las otras dos direcciones ortogonales similar a un cable que, como se ve en la figura 3.7, favorece la flexión hacia el centro de la estructura.

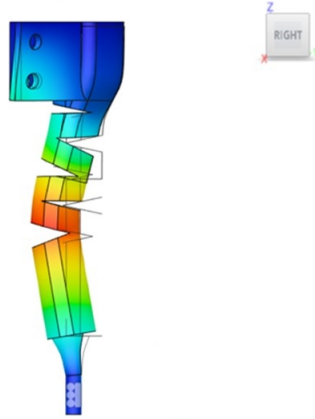


Figura 3.7: Simulación del desplazamiento de una vértebra correspondiente al diseño 4.

Gracias a la unión de clavija, el efecto radial que tiene la presión sobre las vértebras flexibles fija la vértebra y logra que se comporte como un cable, es decir, en el ideal se puede calcular la deflexión de la vértebra a partir de la tensión, la cual coincide con la membrana.

En el diseño de las vacancias existen 3 factores principales que revisar. si se analiza la vacancia como un triángulo isoceloes, estos 3 factores corresponden a la base, la altura y el ángulo que subtiende la base. A partir de esto se puede obtener una relación entre el largo de la vértebra y su sección transversal más pequeña. Este es un indicador directamente relacionado con la rigidez y se puede utilizar como punto de comparación entre diseños.

En cuanto a las vértebras rígidas, un primer análisis de la deformación se puede aproximar por la deflexión de una viga apoyada en 1 apoyo articulado y 1 apoyo de rodillo. Con esto se puede calcular la deflexión mediante algunas de las propiedades del material.

### 3.1.1.3. Segmento

Como se puede apreciar en la siguiente imagen, existe una gran diferencia entre los desplazamientos de una vértebra flexible y los de una rígida, por ende es importante expresar de manera clara la direccionalidad.

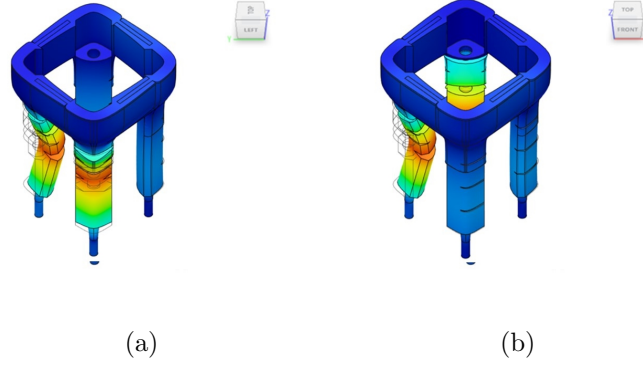


Figura 3.8: Simulación del desplazamiento de la vértebra activada.

Para esto se utiliza una representación matricial con cada segmento conteniendo vértebras rígidas (1) o flexibles (0)

$$S_0 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$S_1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$S_{2a} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$S_{2b} = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$S_3 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$S_4 = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Al tener claras las distribuciones, es posible aproximar la rigidez equivalente usando las siguientes ecuaciones derivadas de la ley de Hook.

Rigidez equivalente en serie:

$$k = \sum k_i \quad (3.3)$$

Rigidez equivalente en paralelo:

$$k = \frac{1}{\sum \frac{1}{k_i}} \quad (3.4)$$

A pesar de ser una aproximación, hasta el momento esto

### 3.1.1.4. Apéndice

Para explicar el movimiento del apéndice es necesario remitirse a los cálculos realizados por Shuguang Lia [8]. En primer lugar, se analiza el comportamiento en la componente axial del apéndice. Axialmente este sistema se puede aproximar como una torre con soportes incompresibles y compresibles intercalados. Gracias a las componentes en el eje z que produce la tensión en la membrana esta torre se comprime, produciendo una diferencia de largo entre las vértebras rígidas y flexibles, lo que a su vez genera la curvatura del apéndice.

Adicionalmente existen flexiones permitidas por la sobreextensión del ángulo en la vacancia central de la vértebra. A pesar que esta sobreextensión permita obtener curvas más cerradas, esto pone una carga muy alta en una sección muy pequeña y por lo tanto puede fallar por uso continuo.

Tabla 3.2: Distribución de segmentos utilizados por video

Nombre del video	Distribución de segmentos
Diagonal <sub>1</sub>	$S_1, S_1, S_1, S_1, PuntaApendice$
Perfil S	$S_{2a}, S_{2a}, Giro180^\circ, S_{2a}, S_{2a}, PuntaApendice$
Perfil S Ortogonal	$S_{2a}, S_{2a}, Giro90^\circ, S_{2a}, S_{2a}, PuntaApendice$
Perfil S Retracción	$S_4, S_4, S_{2a}, S_{2a}, PuntaApendice$

### 3.1.2. Lógica de control del sistema

Para facilitar la representación del apéndice, se utilizó un sistema binario para determinar el tipo de vértebra que existe en cada posición, las vértebras flexibles corresponden al 0 y las rígidas a 1.

El apéndice estará representado por una matriz tridimensional, donde cada segmento corresponde a una matriz de 2x2, indicando cada uno de los vértices del segmento. Esta representación es conveniente ya que visualmente permite entender sin ambigüedad cual es la distribución y orientación de vértebras en el robot, gracias a esto, se puede utilizar la matriz como interfaz de datos entre el diseño y el control.

Tal como se explicó anteriormente, el movimiento final del sistema depende de la distribución y orientación de los segmentos de vértebras, así como el tipo de vértebra que compone cada segmento. A partir de esto se puede construir la matriz de rigidez y usando el mismo tipo de análisis que los vistos para el cálculo de pórticos en Ingeniería estructural, para ajustar el control del movimiento a través del cambio en la rigidez del sistema. Para esto se deberán ajustar los cálculos considerando la flexibilidad del robot.

Ya que las vértebras flexibles son iguales, en condiciones ideales su rango de compresión axial y la concavidad producida en cada vértebra es igual en cualquier posición. Con esta aproximación se facilita el mecanismo de control, aprovechando la naturaleza discreta del robot.

Debido a que el diseño de la estructura no se puede modificar fácilmente en la mitad del

funcionamiento del robot, es necesario encontrar otra forma de crear un segundo estímulo que modifique la geometría o la rigidez para lograr un control real del sistema.

### 3.1.3. Diseños de las vértebras

En la imagen 3.10 se puede apreciar la evolución de los diseños, aquí se destacan dos puntos; A partir del segundo diseño se agrega una extrusión cónica que une axialmente las vértebras y funciona como la clavija de la unión; Ya que un punto débil de la vértebra se encuentra en el aleron más delgado del diseño 2, desde el tercer diseño se fijan las uniones deslizantes para evitar el colapso de la estructura.

Como se puede ver en la imagen 3.10 a partir del diseño 3 se agrega un componente final al apéndice. Esta punta cumple la función de repartir la presión que llega a sus caras hacia el resto de la estructura, y mantiene las últimas vértebras en tensión.



Figura 3.9: vértebras de las distintas fases de diseño.



Figura 3.10: Apéndices de las distintas fases de diseño.

A continuación se muestra el sistema integrado en el diseño 2, gracias a esta estructura se reduce el tiempo de ensamble y logra que el diseño sea completamente modular, lo que puede

significar una gran ventaja a la hora de mover y construir estos robots. Adicionalmente, de esta manera se logra reducir factores externos al diseño que intervengan en las pruebas a realizar.

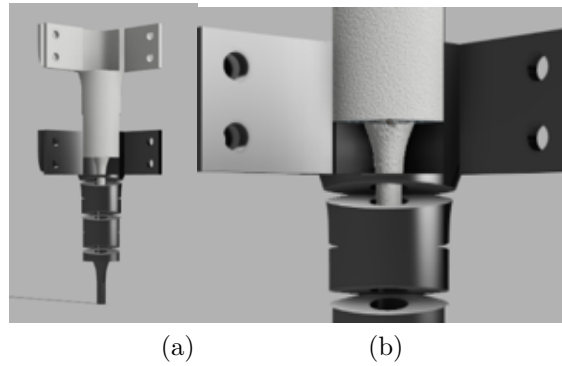


Figura 3.11: Unión clavija implementada desde el segundo diseño.

La Figura 3.12.a corresponde a la vista isométrica del diseño 4, como se puede ver, esta incluye aportes que vienen desde el diseño 1 y agregan las pequeñas vacancias paralelas al lado de la vértebra para portar a la flexibilidad de la estructura.

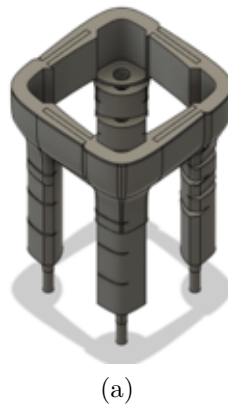


Figura 3.12: Vista isométrica del diseño 4.

Entre todos los diseños, el segundo (D2) presentó fallas que resultaron en el colapso de la estructura sin poder generar curvaturas considerables 3.13, esto lleva a pensar que efectivamente dentro del diseño existen relaciones importantes para el funcionamiento de la estructura.



Figura 3.13: Prueba de funcionamiento segundo diseño

Tabla 3.3: Parámetros del diseño D2 y D4

	Largo de la vértebra	espesor de la sección	razón $e/L$
D2	20	6.173	0.31
D4	30	6.173	0.21

Tal como se explicó anteriormente, la disminución de largo de la vértebra implica un aumento de rigidez en las estructuras, gracias a esto es más difícil lograr la flexión local de 1 vértebra y por ende las uniones deslizantes estructura colapsan y se pierde la geometría que da dirección a la curvatura. De esta manera, es conveniente definir una razón de diseño acorde a la ecuación 3.2 para definir los límites necesarios para el funcionamiento de la estructura

### 3.1.4. Simulación

A continuación se presentan algunas simulaciones realizadas con el software Fusion 360. Los detalles de configuración se encuentran en la tabla C.1 del anexo

#### Consideraciones:

Debido a que las impresiones 3D por FDM deben sus propiedades finales a múltiples variables, algunas definibles desde los slicers y otras asociadas a la técnica de fabricación, el resultado son piezas ortotrópicas, es decir las propiedades del material resultante no son axisimétricas, llegando en algunos casos a necesitar 9 constantes elásticas para caracterizar la deformación del material. Es necesario tomar en cuenta este punto antes de aplicar cualquier simplificación, ya que de otra manera se puede llegar a resultados erróneos por una mala definición del problema. Para evitar, esto no se evaluarán numéricamente las simulaciones y solo se espera evaluar los gradientes de esfuerzo y deformación.



En este caso, las simplificaciones realizadas podrían llevar a dichas situaciones, pero debido a que solo se requiere observar el comportamiento general de la estructura (Deformación, puntos de esfuerzo máximo y mínimo) estas definiciones serán suficientes para identificar los problemas que existan en el diseño y como afectan las presiones a la estructura.

### **Simplificaciones:**

- 1) Las piezas se asumen como un material isotópico.
- 2) Las piezas tienen un comportamiento lineal.
- 3) Todas las propiedades mecánicas de las piezas derivan del filamento que las compone.
- 4) El material es completamente sólido.
- 5) Las pruebas se realizan con el máximo esfuerzo teórico que podría ejercer el sistema de actuación.
- 6) Se realiza un análisis estático, debido a que en la simulación no es relevante el estado transiente de la pieza o el sistema. Esto se evaluará posteriormente con con las pruebas experimentales.

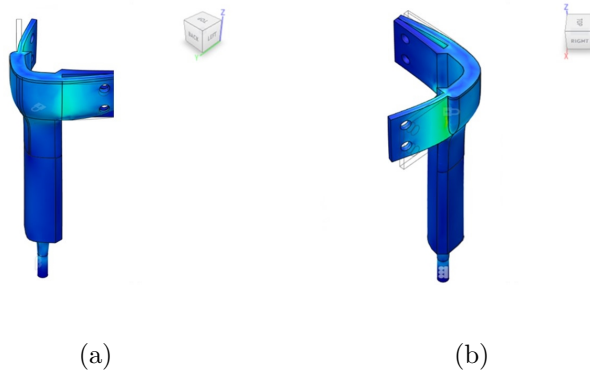


Figura 3.14: Vistas laterales, simulación de esfuerzos en la vértebra d2.

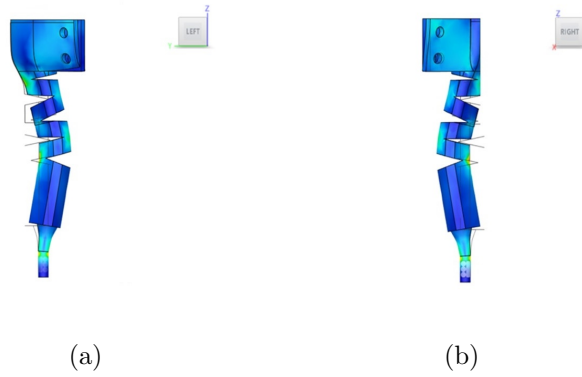


Figura 3.15: Vistas laterales, simulación de esfuerzos en la vértebra d3.

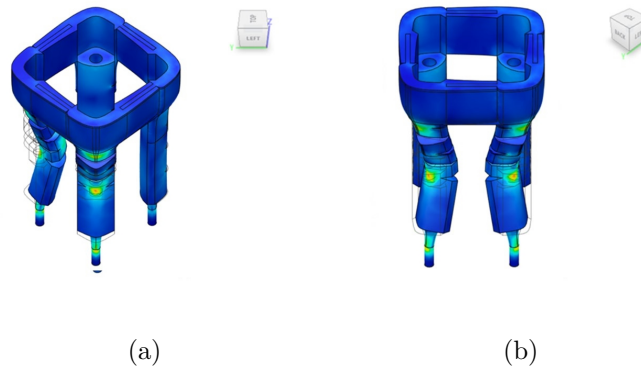


Figura 3.16: Vistas laterales, simulación de esfuerzos en el segmento  $S_{2a}$  de diseño d4.

A partir de los estudios realizados dentro del programa Fusion 360, se encontraron algunos puntos débiles dentro del diseño, los cuales se discutirán en las siguientes secciones y deberán ser abordados en desarrollos posteriores.

## 3.2. Proceso de fabricación

### 3.2.1. Selección de materiales

Para la selección de filamentos a utilizar en la estructura se estudió un rango de materiales, dentro de los que destacaron el PLA y TPE gracias su facilidad de uso y propiedades mecánicas respectivamente.

En primera instancia, ya que es uno de los materiales que presenta menos problemas en su uso, se utilizó un filamento de PLA para fabricar los primeros prototipos, con esto fue posible enfocarse en otros temas que tenían prioridad y cuando se tuvo un modelo CAD

apropiado, se paso a utilizar un filamento de TPE, lo que conlleva un proceso de calibración más complejo.

Para fabricar la membrana se utilizó un film termoplástico compuesto por poliamida (20%) y polietileno (80%), esta mezcla es comúnmente usada en bolsas de sellado al vacío de grado gastronómico. En cuanto a las conexiones, se utilizaron mangueras de PVC transparente para la línea de succión ya que este material reacciona y de silicona en el instrumento de medición

### 3.2.2. Parámetros de impresión

Debido a que el TPE es un material elástico y requiere mayores temperaturas en el hotbed y hotend, fue necesario realizar ajustes antes de poder generar piezas con una calidad que no interfiera con los resultados. Para la calibración del equipo se utilizó un cubo de calibración que permite identificar múltiples problemas, ya que su diseño incluye geometrías que comúnmente tienen problemas. Los diseños de este cubo 3.17 pertenecen al usuario sch00f, quien los comparte de manera gratuita en la plataforma thingiverse[10].

Ya que las primeras impresiones no alcanzaron a completarse debido a irregularidades en el flujo de TPE, se reemplazó el cabezal del extrusor por una pieza de 0.5[mm], disminuyendo la resolución de la pieza pero evitando por completo este problema de flujo.

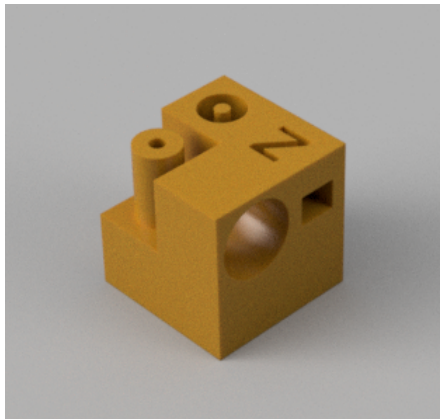


Figura 3.17: Archivo STL del cubo de calibración.

Tal como se observa en las imágenes 3.18 y 3.19, las primeras pruebas presentan encordado (*stringing*) y pandeo (*warping*), pero en todas se obtiene un buen acabado, sin presentar separación de capas (*delamination*) ni desfaces entre ellas (*layer shift*).

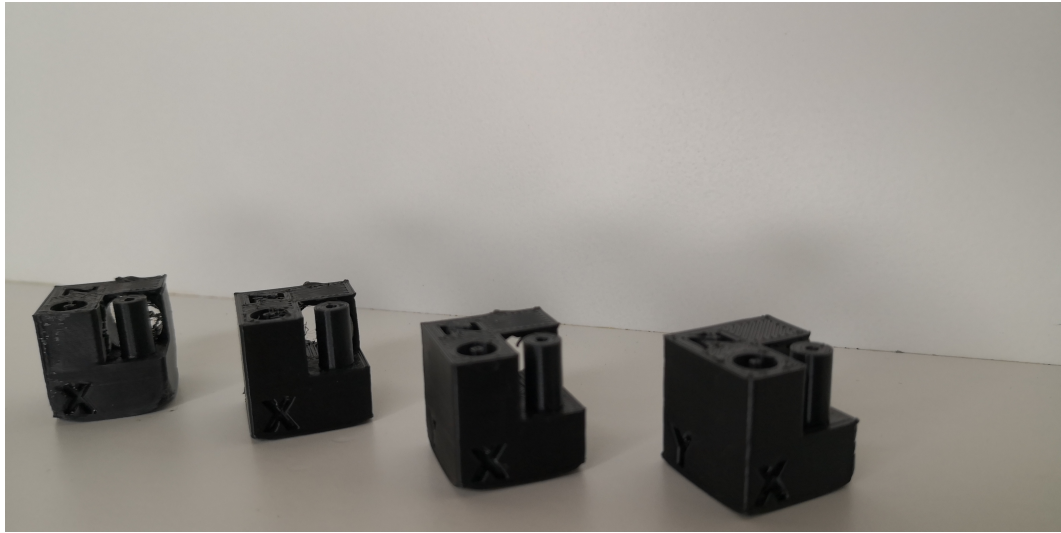


Figura 3.18: Vista eje x del Resultado de las pruebas a) b) c) d)



Figura 3.19: Vista eje y del Resultado de las pruebas: a) b) c) d)

Ya que a partir de las pruebas se logró una impresión bien calibrada, se almacenó la configuración de la tabla que minimizó los efectos negativos 3.4.

Para facilitar el reconocimiento de los patrones correspondientes a cada video, a continuación se listan las nomenclaturas utilizadas para los nombres. Esto en conjunto con las otras tablas pueden lograr representar por completo al apéndice.

Tabla 3.4: Parámetros de impresión seleccionados

Pruebas	Velocidad hotend [ $mm/s$ ]	Temperatura hotend [ $^{\circ}C$ ]	Temperatura cama [ $^{\circ}C$ ]
a	50	220	40
b	35	220	50
c	20	230	70
d	20	230	50

Tabla 3.5: Nomenclatura de los videos

Nomenclaturas	Comentarios
Cola	Estructura de prueba construida a partir de una serie de prismas triangulares concatenados
12 - 24 - 36 Grados	Ángulo de separación que existe entre dos prismas contiguos
S - Perfil S	Estructura de prueba con un ángulo de 24 grados en las estructuras triangulares, es uno de los perfiles más fáciles de analizar por tener movimientos co-planares
S ortogonal	Al igual que el perfil S, se crean movimientos en 2 sentidos, pero a diferencia, en este caso las curvas son ortogonales respecto a la otra
S diagonal	Set de datos obtenido con una distribución de únicamente segmentos $s_3$
D1 o diseño 1	Primera versión del diseño de las vértebras, este diseño utiliza hilo elástico para simular las uniones deslizante y de clavija
D2 o diseño 2	Segunda versión del diseño de las vértebras, disminuye el largo de la vértebra y se agrega un anexo en la base de la vértebra para ensamblar las uniones de clavija
D3 o diseño 3	Tercera versión del diseño de las vértebras, se alarga axialmente la vértebra manteniendo las otras dimensiones y se fijan los segmentos eliminando la unión deslizante
D4 o diseño 4	Cuarta versión del diseño de las vértebras, se agregan pequeñas vacancias en las vértebras rígidas para facilitar la flexión
Punta apéndice	Elemento final del apéndice, que mantiene en tensión las últimas vértebras y distribuye la carga producida por la presión hacia el origen del apéndice

### 3.3. Fabricación del actuador

Un punto a considerar cuando se dimensiona la membrana a utilizar, es cuidar que ella no se encuentre pre-tensada al momento del sellado ya que esto puede provocar un sellado débil o puede afectar los resultados obtenidos, bloqueando la salida de aire o deformando previamente la estructura en su interior.

#### 3.3.1. Sistema de succión

El sistema de succión se encuentra compuesto principalmente por:

- a) Bomba de vacío 12VDC 1A
- b) Fuente de poder 30V/10A
- c) Vacuómetro +70 [kPa]/- 90 [kPa]

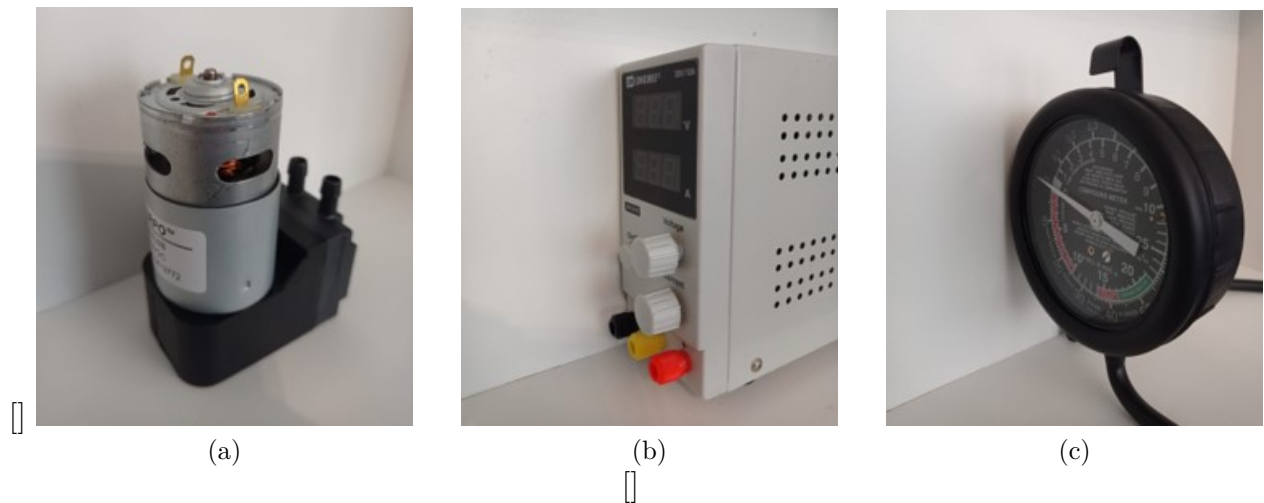


Figura 3.20: Componentes principales del sistema de succión

#### 3.3.2. Membrana y conexión

Para realizar la conexión entre el interior de la membrana y la bomba, se utilizó una sección de 2 cm de manguera la cual fue unida a la membrana utilizando un adhesivo termo fusible, comúnmente referido como silicona caliente. De esta manera ya que los tres materiales son considerados termoplásticos y cuentan con una temperatura de transición vítrea similar, cuando se exponen a estas temperaturas se produce un sellado hermético entre los tres materiales.

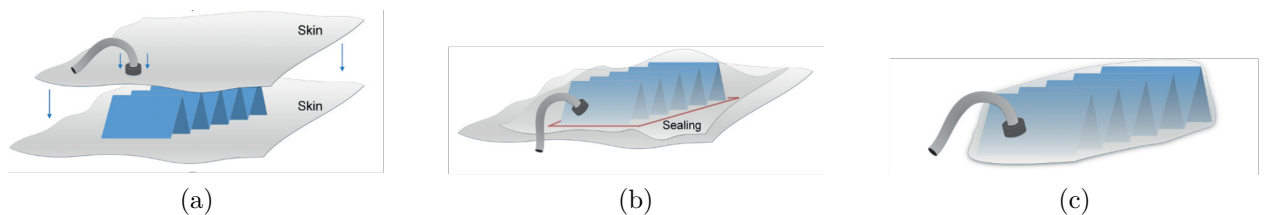


Figura 3.21: Proceso de sellado de la membrana [7]

Para evaluar el tipo de membrana a utilizar se realizó una prueba control con una membrana rugosa y otra lisa, ambas están compuestas por los mismos materiales y solamente difieren en su acabado superficial.



Figura 3.22: Punto de unión entre la bomba, el vacuómetro y el robot

Buscando facilitar la conexión entre la bomba y la membrana sellada, se utilizó una sección de manguera de PVC la cual se conecta a la bomba y al vacuómetro mediante un divisor de flujo. Ya que tanto la membrana como la manguera tienen una temperatura de transición vítrea entre los 70-80 °C, esto permite que utilizando una pistola de silicona se pueda soldar ambos componentes y lograr un sellado hermético

## 3.4. Toma de datos

### 3.4.1. Peso de las piezas

A continuación se muestran los pesos de los distintos diseños y componentes que integran el robot.

Tabla 3.6: Pesos por componente.

<b>Peso segmento D1</b>	4.2 gr
<b>Peso segmento D2</b>	3.8 gr
<b>Peso segmento D4</b>	4.2 gr
<b>Peso punta apéndice</b>	1.85 gr
<b>Membrana</b>	4.6 gr

### 3.4.2. Pruebas de flexión

Para realizar la toma de datos se grabaron los apéndices con distintas distribuciones de segmentos y cada uno con orientaciones específicas. Después de grabar el contenido, se utilizó el software WebPlotDigitizer [11] para marcar el eje neutro del apéndice y crear un set de datos con las coordenadas de los puntos marcados.

Utilizando un script de python se analizan los puntos y se realiza un polifit para encontrar el polinomio de tercer grado que mejor se ajusta. De esta manera es posible obtener un

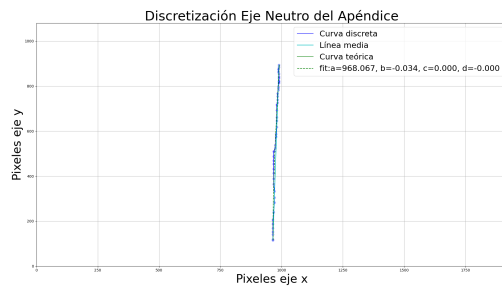
aproximado de las curvas y a partir de estas construir una simulación del apéndice para contrastar con el sistema de control.

A partir de los gráficos se logra relacionar la deflexión en cada una de las curvas que se generan con la presión interna producida por la bomba, de esta manera se puede analizar la relación que tiene la presión respecto a la deformación del apéndice, y ajustando individualmente parámetros como la terminación superficial de la membrana u orientación de las secciones, se tiene un punto de comparación para evaluar sus efectos en el comportamiento global.

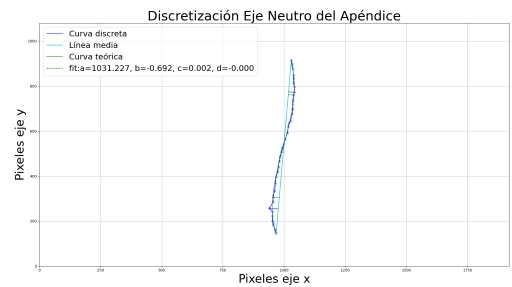
Para tener una referencia con la que medir la deflexión, se utilizó la recta que une el primer y último punto del apéndice para separar la deflexión izquierda y derecha. Adicionalmente se calcula el ángulo de la recta respecto a la vertical y la distancia de la ella, de esta manera se puede caracterizar el movimiento del sistema, recordando que lo anterior es una representación 2D de un fenómeno 3D.

A continuación se muestran las mediciones de 4 momentos representativos para cada prueba de deflexión del apéndice. En el apéndice es posible encontrar las imágenes desde donde se extrajeron los datos.

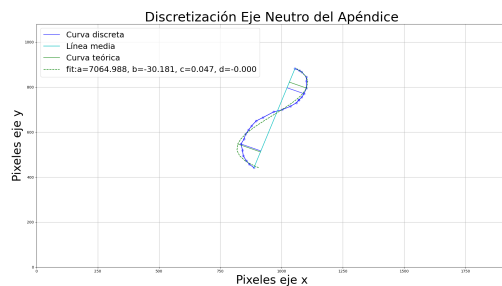
### 3.4.2.1. Cola S frontal



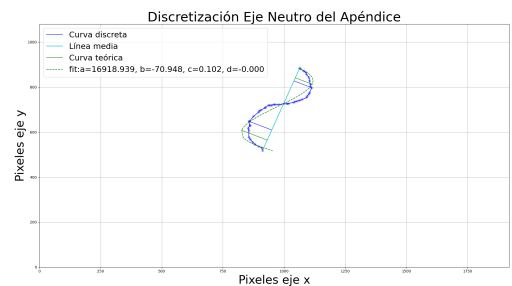
(a) 0 kPA



(b) 16 kPA



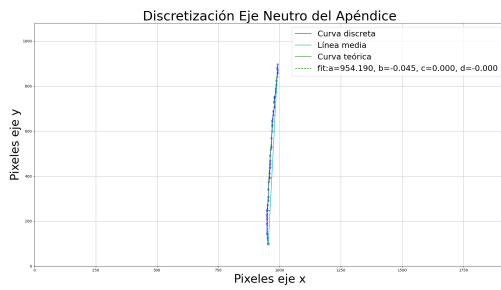
(c) 25 kPA



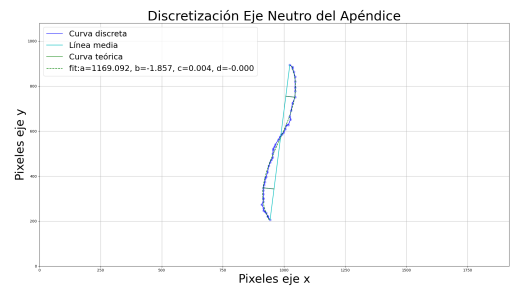
(d) 37 kPA



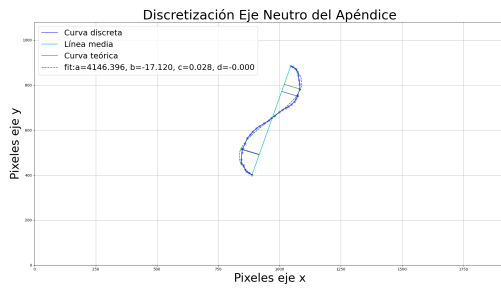
### 3.4.2.2. Cola S lateral



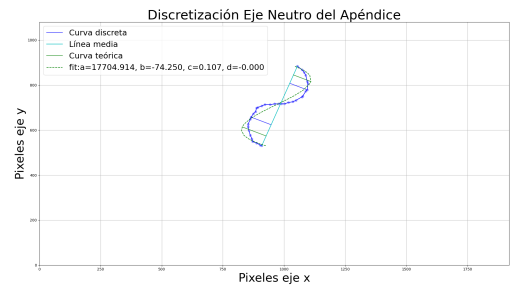
(a) 0 kPA



(b) 16 kPA



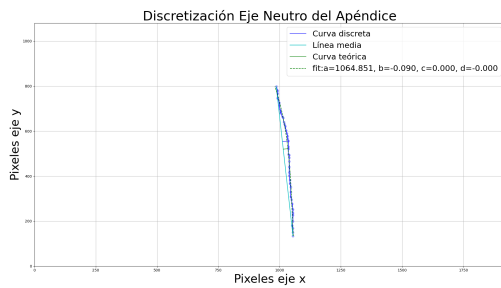
(c) 25 kPA



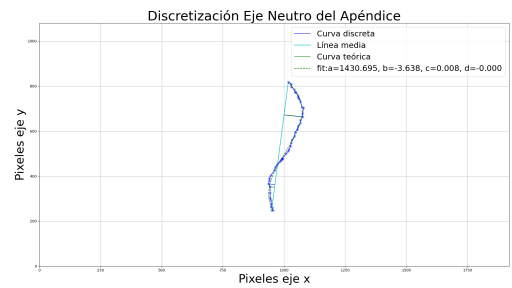
(d) 37 kPA

Figura 3.23: Cola S lateral

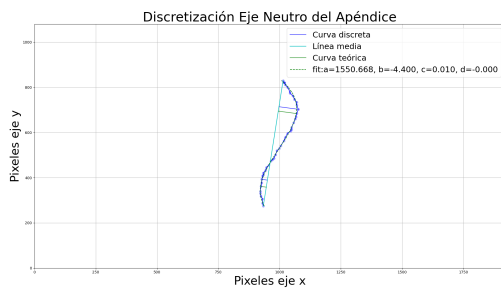
### 3.4.2.3. D2 perfil S



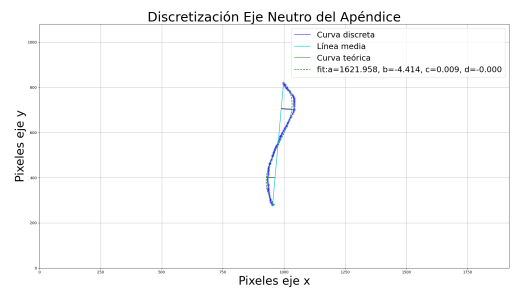
(a) 0 kPA



(b) 19 kPA



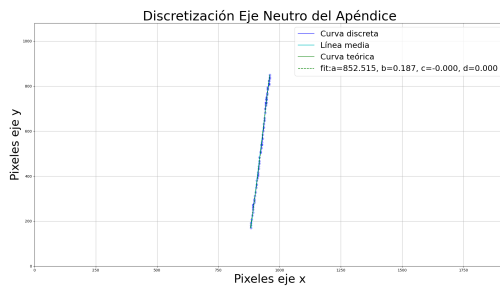
(c) 35 kPA



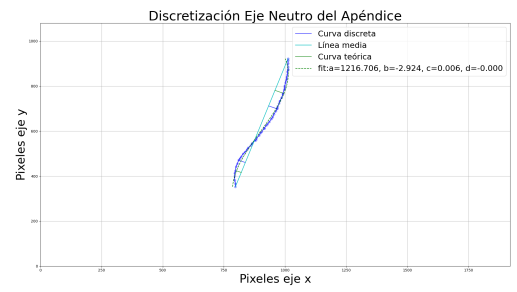
(d) 46 kPA

Figura 3.24: D2 perfil S

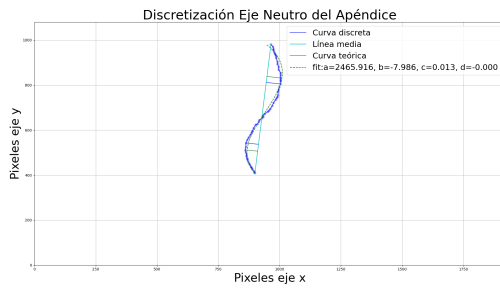
### 3.4.2.4. D3 perfil S



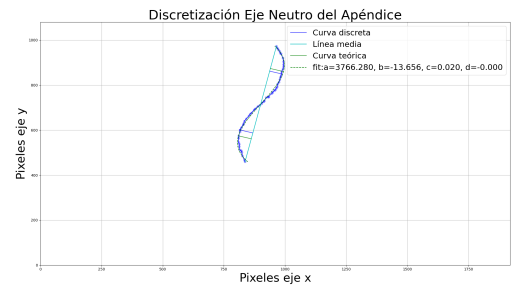
(a) 0 kPA



(b) 18 kPA



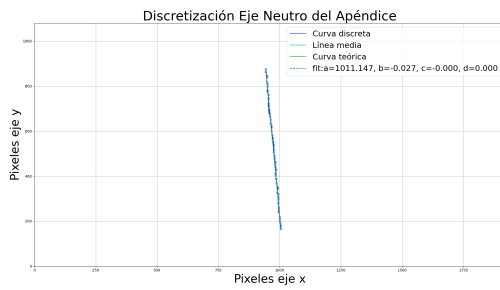
(c) 35 kPA



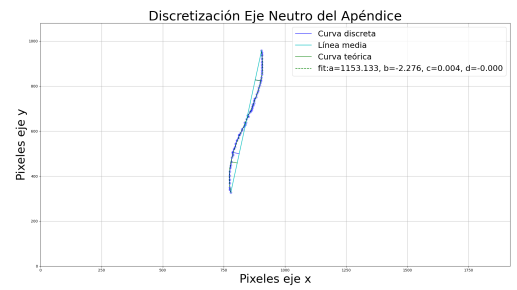
(d) 45.5 kPA

Figura 3.25: D3 perfil S

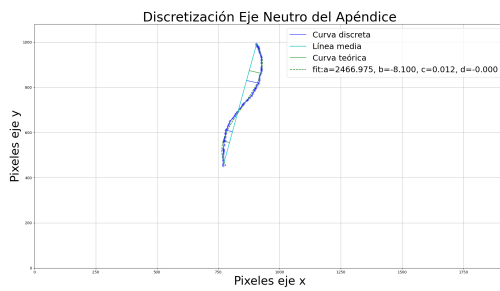
### 3.4.2.5. D4 perfil S rugoso



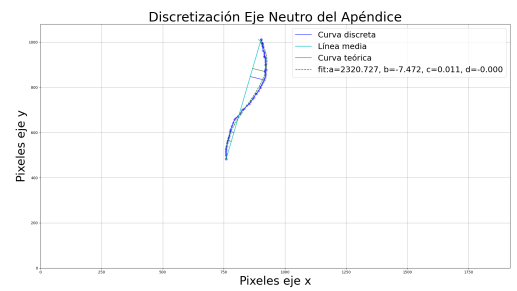
(a) 0 kPA



(b) 13 kPA



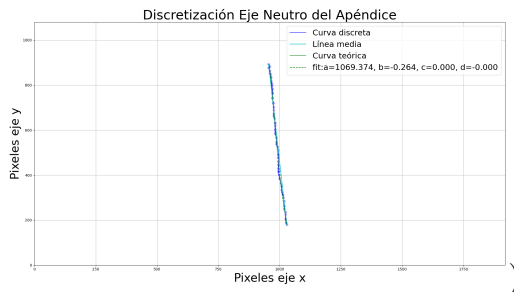
(c) 27 kPA



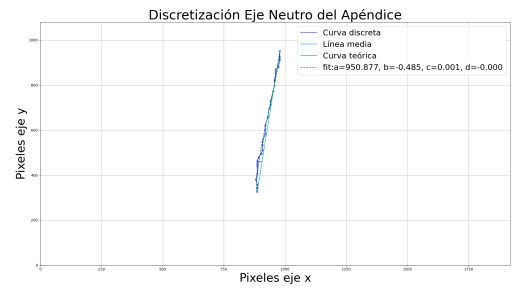
(d) 39 kPA

Figura 3.26: D4 perfil S rugoso

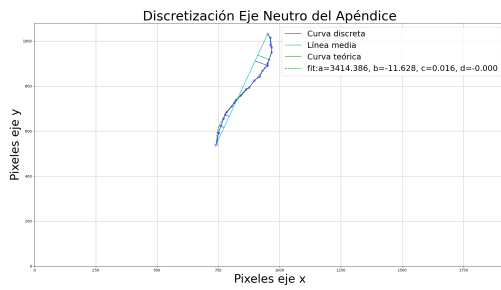
### 3.4.2.6. D4 perfil S liso



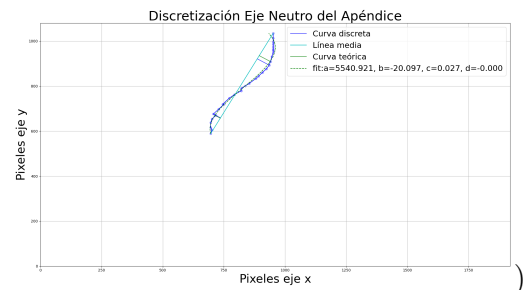
(a) 0 kPA



(b) 6 kPa



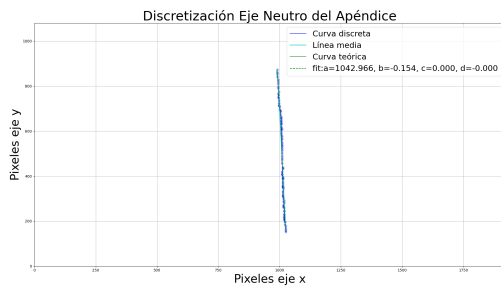
(c) 32 kPa



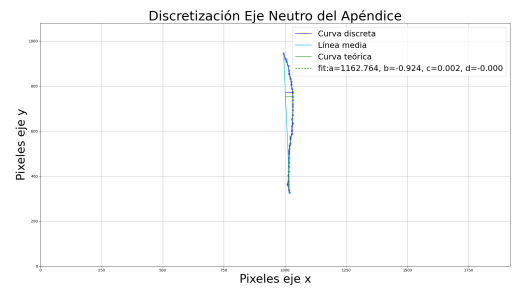
(d) 45 kPa

Figura 3.27: D4 perfil S liso.

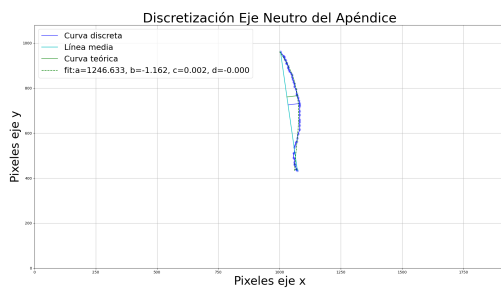
### 3.4.2.7. D4 Perfil S retracción



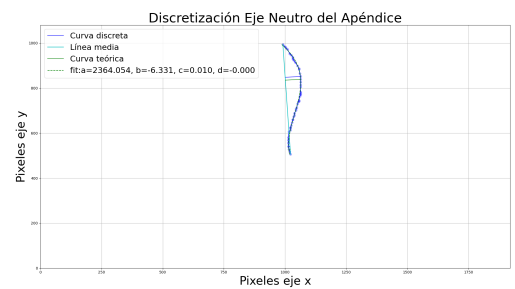
(a) 0 kPa



(b) 22 kPa



(c) 31 kPa



(d) 45.5 kPa

Figura 3.28: D4 perfil S retracción.

### 3.4.3. Prueba de impacto

Para evaluar la resistencia del sistema y su capacidad de continuar operando posterior a colisiones, se realizó una prueba de impacto dejando caer un peso de 1.8 kg y 12 [cm<sup>2</sup>] desde una altura de 8 [cm], o 0,08 [m], de esta manera se puede probar la reacción del sistema frente a impactos puntuales dentro de su rango de funcionamiento.

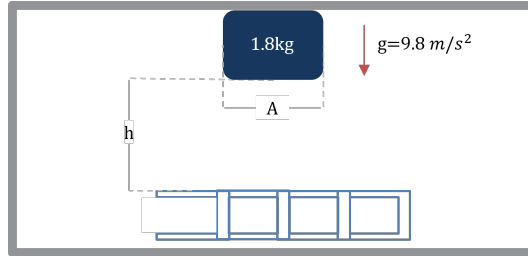


Figura 3.29: Diagrama de la prueba realizada a las vértebras d1 y d4.

Tabla 3.7: Fuerza aplicada en el área de contacto del peso

<b>Prueba de impacto</b>	17.6[N]
<b>Funcionamiento máximo</b>	70.8[N]



(a)



(b)

Figura 3.30: Estado del apéndice posterior a la prueba de impacto

Después de una inspección visual la pieza no parece haber sufrido daño alguno, pero como se discutirá en la siguiente sección, el colapso de la estructura implica que el efecto del impacto no es visible pero efectivamente modificó el comportamiento de la estructura.

# Capítulo 4

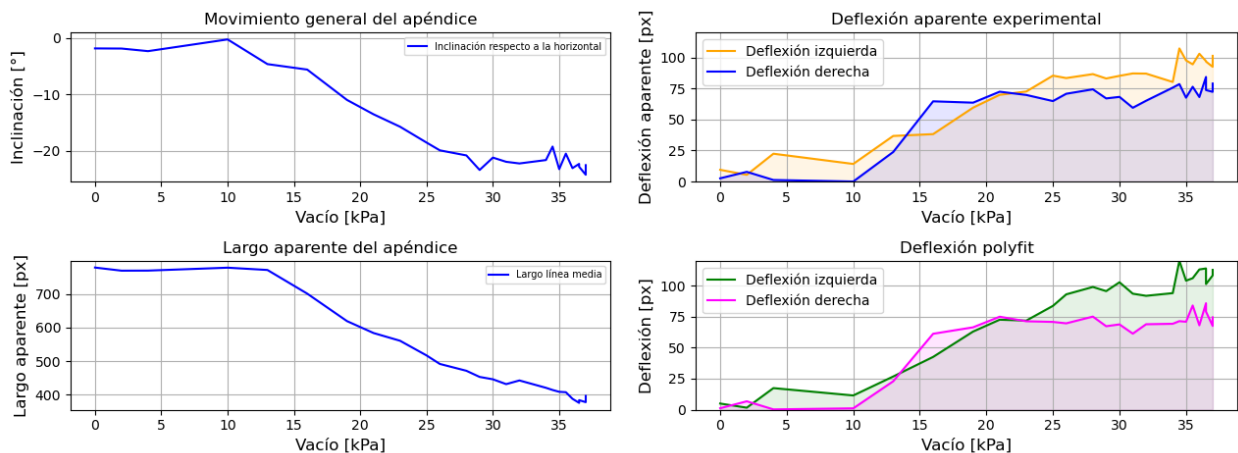
## Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis realizado sobre los vídeos de las pruebas de flexión. Para evaluar los efectos externos al diseño del apéndice, se realizaron pruebas modificando un único componente para evaluar las mejores condiciones a utilizar en la evaluación del funcionamiento actuado del robot.

### 4.1. Efecto de la orientación del sellado de la membrana

En los siguientes gráficos se encuentran las mediciones obtenidas de cola s frontal y lateral. En ambos casos la estructura al interior de la membrana es la misma, pero sus flexiones son ortogonales respecto al sellado de la membrana, lo que implica que la cola lateral se flexa en el mismo plano del sellado de la membrana, mientras que cola frente se flexa en el plano perpendicular.

Ya que el diseño de cola S es más simple y la estructura base del diseño fue bien estudiado por Lia Shuguang [7][8], es conveniente usar las mediciones obtenidas como punto base para las siguientes.



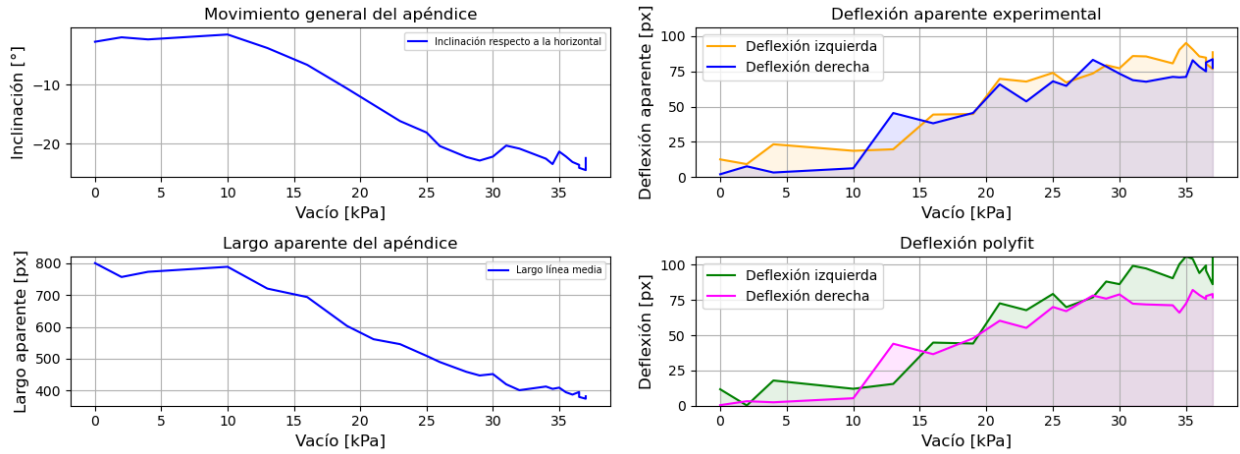
(a) Gráfico de parámetros

(b) Gráfico de deflexión

Figura 4.1: Cola S frontal

Tabla 4.1: RSE Cola S frontal

Deflexión derecha	Deflexión izquierda	Set de datos
3.07	8.91	14.37



(a) Gráfico de parámetros

(b) Gráfico de deflexión

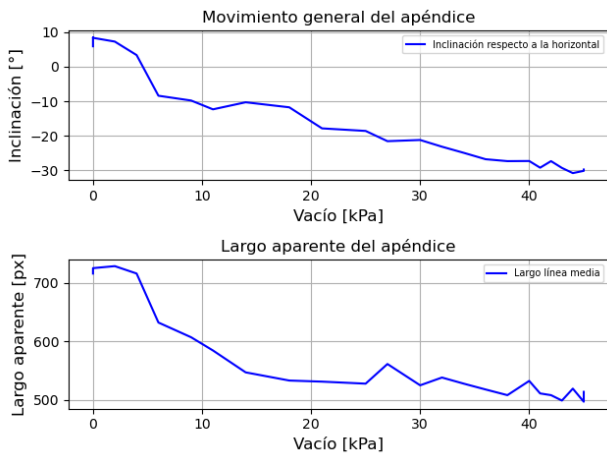
Figura 4.2: Cola S lateral

Tabla 4.2: RSE Cola S lateral

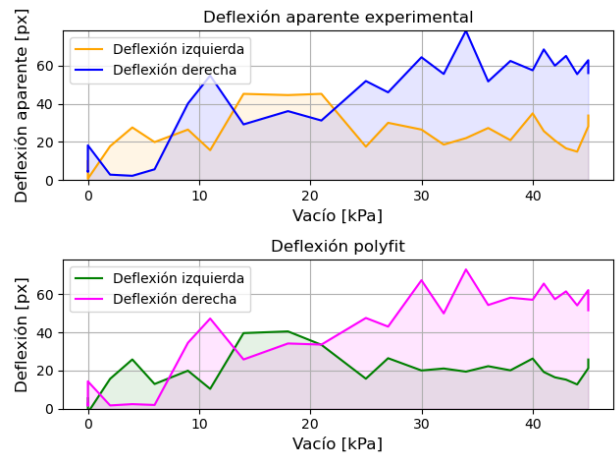
Deflexión derecha	Deflexión izquierda	Set de datos
2.69	8.44	14.06

## 4.2. Efecto de la terminación superficial de la membrana

Los gráficos presentes corresponden a mediciones de la misma estructura, con dos membranas de terminación superficial diferente.



(a) Gráfico de parámetros

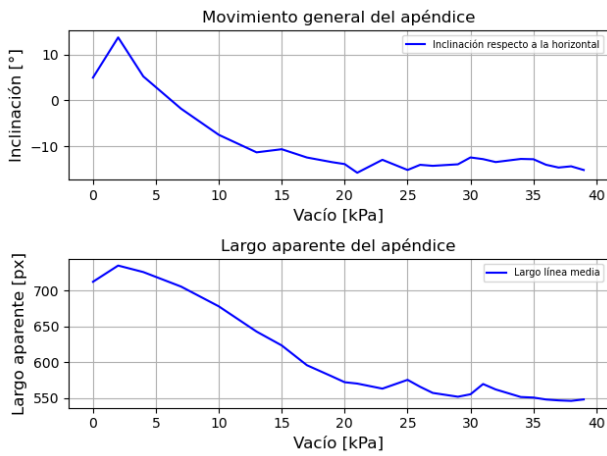


(b) Gráfico de deflexión

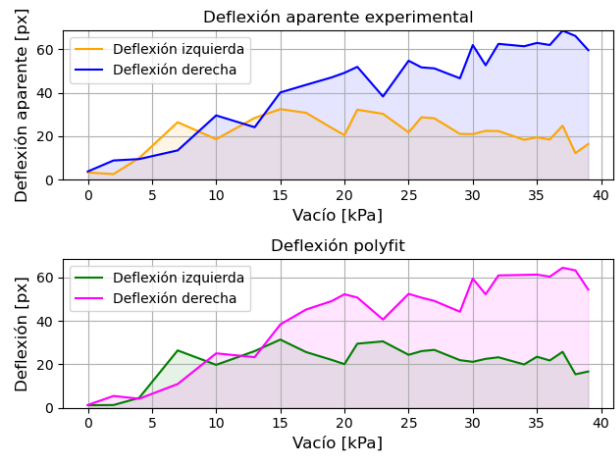
Figura 4.3: D4 perfil S liso

Tabla 4.3: RSE D4 perfil S liso

Deflexión derecha	Deflexión izquierda	Set de datos
3.42	4.97	5.03



(a) Gráfico de parámetros



(b) Gráfico de deflexión

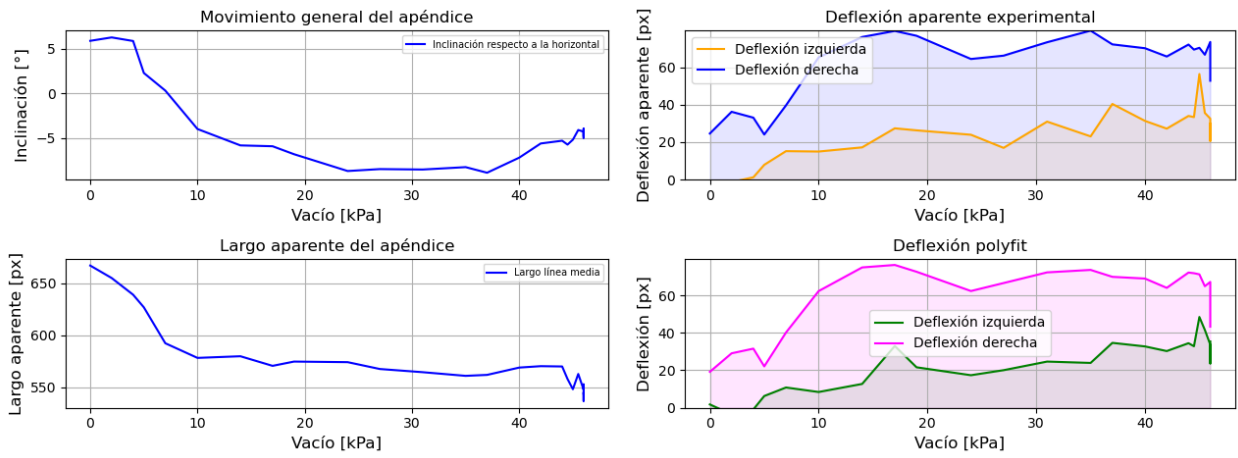
Figura 4.4: D4 perfil S rugoso

Tabla 4.4: RSE D4 perfil S rugoso

Deflexión derecha	Deflexión izquierda	Set de datos
2.56	1.99	3.99

### 4.3. Deflexión del apéndice

A continuación se muestran las mediciones de los distintos diseños, con la misma terminación superficial y orientación de la membrana.



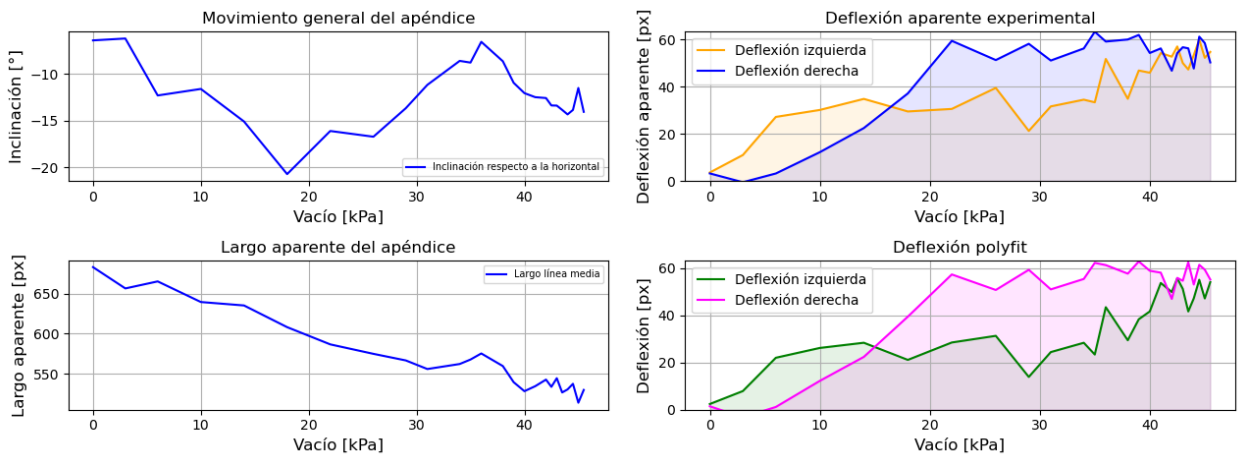
(a) Gráfico de parámetros

(b) Gráfico de deflexión

Figura 4.5: D1 perfil S

Tabla 4.5: RSE D1 perfil S

Deflexión derecha	Deflexión izquierda	Set de datos
3.91	4.21	5.28



(a) Gráfico de deflexión

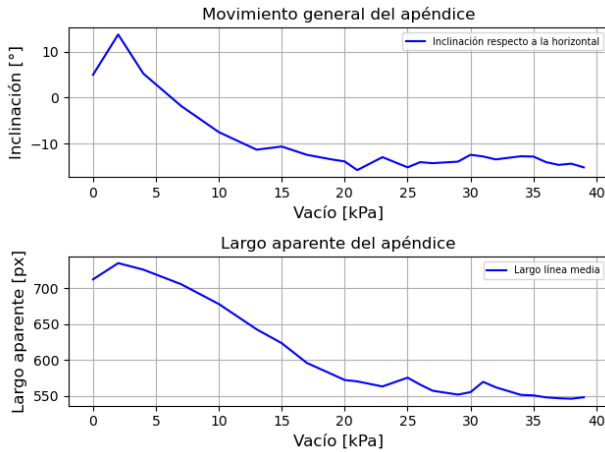
(b) Gráfico de parámetros

Figura 4.6: D3 perfil S

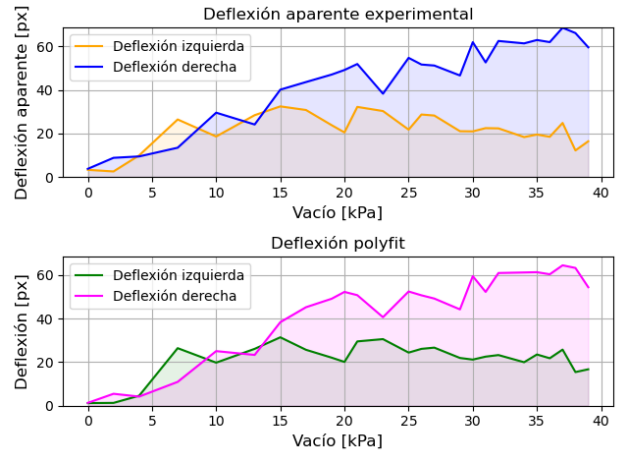


Tabla 4.6: RSE D3 perfil S

Deflexión derecha	Deflexión izquierda	Set de datos
2.08	5.40	4.53



(a) Gráfico de deflexión

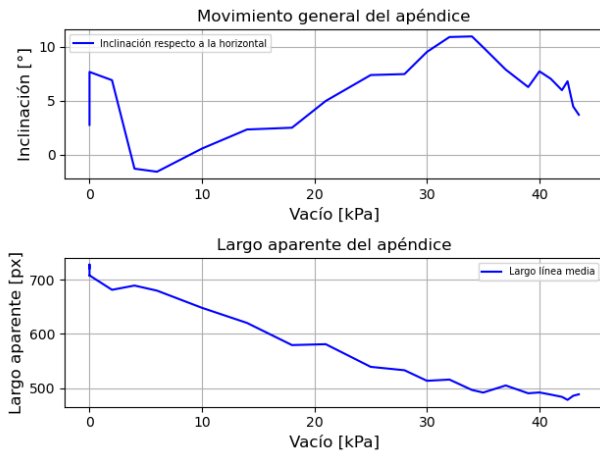


(b) Gráfico de parámetros

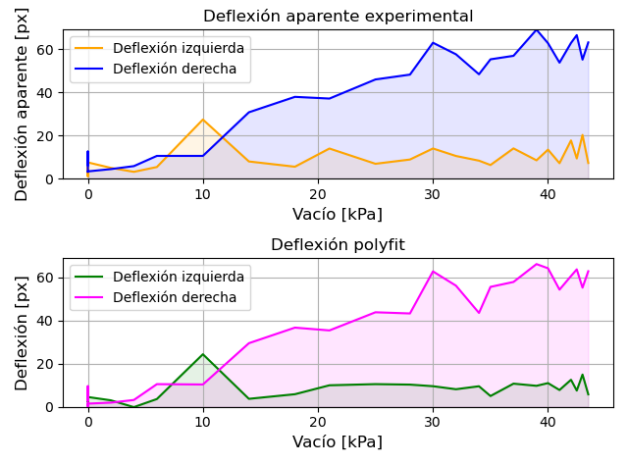
Figura 4.7: D4 perfil S rugoso

Tabla 4.7: RSE D4 perfil S rugoso

Deflexión derecha	Deflexión izquierda	Set de datos
2.56	1.99	3.99



(a) Gráfico de parámetros



(b) Gráfico de deflexión

Figura 4.8: D4 perfil S retracción.

Tabla 4.8: RSE D4 perfil S retracción.

Deflexión derecha	Deflexión izquierda	Set de datos
2	2.73	3.19

# Capítulo 5

## Análisis y Discusión

A partir de los datos obtenidos en los gráficos, no es inmediatamente evidente que la dirección del sellado de la membrana tenga algún impacto en la deflexión de las estructuras, pero al analizar la suavidad de la curva de inclinación, se puede ver que la Cola frontal S tiene movimientos más abruptos que su contraparte.

Esta hipótesis se ve reforzada por la tendencia que siguen las deflexiones de ambas colas, aquí la cola frontal tiene un aumento abrupto pero una vez llega a dicha deflexión la curva se aplanan. En contraste la cola lateral tiene un crecimiento con tendencia lineal.

Por último, la cola lateral presenta una mayor simetría, es decir, las deflexiones derecha e izquierda comparten gran parte del área bajo la curva, ya que en este caso la estructura es sólida y bien definida, por lo que cualquier disimilitud entre secciones viene dada por condiciones externas.

En general, a pesar de no presentar ventajas muy conclusivas, la evidencia parece llevar a que conviene que el sello de la membrana sea perpendicular a los desplazamientos.

Tal como se puede ver en los videos de las pruebas, cuando se utiliza la membrana lisa se producen saltos en la deflexión lo que indica algún tipo de irregularidad. Además de esto, el alto grado de inclinación y la disminución del largo aparente respecto al observado con la membrana rugosa, indican que efectivamente existen factores externos al diseño influyendo.

Ya que la única diferencia entre las pruebas es la membrana, tiene sentido asumir que el bajo coeficiente de roce hace que la membrana no se adhiera bien a la superficie de las vértebras, creando estos saltos de deflexión y efectos no deseados. Por esta razón se decidió continuar las pruebas con la membrana rugosa, a pesar de que su opacidad limite la visibilidad del apéndice.

Al comparar las deflexiones de los perfiles s en los distintos diseños, es fácil identificar un número de problemas con el primer diseño, pero el punto interesante radica en la importante diferencia de deflexión entre el diseño 3 y 4. A pesar que ambos diseños difieren únicamente en las pequeñas vacancias incluidas en las vértebras rígidas del diseño 4, la deflexión izquierda del diseño 3 aumenta hasta alcanzar la del lado derecho.

Comparando las inclinaciones se observa una amplitud de movimiento similar pero el diseño 3 se acerca a la vertical cercano a los 20 kPa. Este tipo de movimiento es más parecido al visto en el perfil s retracción, lo que puede indicar un comportamiento del sistema frente a la sobre extensión de uno de los ángulos de las vértebras. En el caso del perfil s retracción este comportamiento es deseable ya que la base retráctil actúa como pivote, mientras al mismo tiempo se mantiene toda la estructura compacta, pero ya que como se pudo ver en las simulaciones, existen grandes concentradores de esfuerzos en los puntos visagra, es conveniente no forzar en extremo esta sobre extensión.

Como se puede apreciar a partir de las pruebas de impacto, el primer diseño no se ve afectado de gran manera por el golpe. A partir de esto y los gráficos de deflexión, se sugiere que a pesar de lograr una curvatura, probablemente esta se genera gracias al hilo elástico que cruza axialmente las vértebras y las mantiene unidas, esto fue suficiente para dar algo de flexión, pero no comparable a los últimos diseños.

En la prueba de impacto del diseño 4 y posterior prueba de funcionamiento, es claro que algún daño se produjo en los segmentos ya que la estructura cedió antes de generar una curvatura. Al igual que lo visto con las simulaciones 3.14.a, 3.15.a y 3.16.a, un problema recurrente con el diseño es la concentración de esfuerzos en el interior del ángulo de 90°. Aun así la unión de clavija entre las vértebras se mantuvo a pesar de la deformación local.

A partir de lo visto, si bien dichos impactos no producen daños visibles, al momento de actuar el robot puede existir un desgaste que modifica el comportamiento futuro del apéndice. Este tipo de resultados no es deseable ya que aumenta la incertidumbre y dificulta cualquier método de control que no sea un loop cerrado.

Por esta razón, los desarrollos futuros deben concentrarse en evitar este tipo de colapso ajustando la relación que existe entre el espesor de los alerones que unen las vértebras y el espesor o rigidez en el codo donde se unen ambos alerones. De esta forma los colapsos que se permiten son únicamente los que toman las direcciones de diseño.

# Capítulo 6

## Trabajo propuesto

Antes de poder utilizar este tipo de diseños en aplicaciones directas, es necesario realizar un número de desarrollos para que estos apéndices puedan rivalizar con la precisión y control que presentan los robots continuos en el estado del arte, es en esta línea que se listan algunos de los desarrollos que podrían continuar con la investigación de esta línea de robots continuos.

1. Debido a que las propiedades asignada a las vértebras en su diseño no puede ser modificado a posteriori, el punto más importante para hacer este sistema viable es lograr activar un segundo movimiento o cambiar el comportamiento de una sección mientras se genera el vacío. De esa manera se podría alcanzar un control real del apéndice.

Queda propuesto incluir en el diseño del robot un refuerzo en las paredes del hueco que pasa axialmente por la vértebra y recibe la estructura cónica de las otras secciones. A partir de esto se puede generar una red de presión positiva al interior de cada vértebra, permitiendo controlar la rigidez del material para lograr el control a través de la lógica mencionada anteriormente.

2. Otra línea de desarrollo que puede ser interesante es la aplicación de diseños independientes a cada vértebra para maximizar el rango de movimiento que el apéndice ofrece sin colapsar en si mismo. A pesar de complicar en cierto nivel la lógica, aun así es posible utilizar la matriz de rigidez como interfaz entre el movimiento continuo y la estructura discreta.
3. Debido que la estructura diseñada es hueca y tiene un bajo peso, esta es apta para integrarse con sistemas electrónicos para el control u otros componentes que aporten funcionalidad.
4. Otro desarrollo interesante es estudiar el efecto de utilizar metamateriales para reemplazar a las vacancias modificando la rigidez de una sección. En esta misma línea, una prueba interesante consiste en manipular por secciones el infill del componente para que la densidad y la malla del infill sean las responsables de regular la rigidez.
5. Se propone realizar un algoritmo de control que interactúe con las variables de diseño, así se podrá entrenar un asistente de diseño que a partir de las aproximaciones iniciales que calcule utilizando variables de diseño.
6. a partir del polifit de los resultados y sus RSE se puede decir con un grado de certeza que la aproximación lograda con la curva es bastante cercana. Queda propuesto evaluar

la evolución de los parámetros del polinomio, conociendo esto es posible construir una simulación a partir de la curva continua y así poder acoplarla con nuevos estímulos que otorguen una guía para los siguientes desarrollos.

# Capítulo 7

## Conclusión

A pesar de ser un campo relativamente nuevo, los desarrollos e investigaciones de robots continuos continúan abriéndose camino a más posibilidades de actuación, aplicaciones y control. Con los avances en tecnologías es importante mantener los progresos en esta área en continua innovación, de esta manera sistemas que se consideraron obsoletos, como el control análogo vs digital, pueden volver a ser utilizados y ofrecer una gama de soluciones no explotadas.

Las nuevas técnicas de manufactura y mayor disponibilidad de materiales blandos abre las puertas nuevas líneas de desarrollos para la robótica. En este estudio podemos ver aplicadas algunas de estas técnicas para lograr una actuación basada en la respuesta predefinida a partir del diseño de una estructura base.

Cabe notar que a pesar del resultado en la prueba de impacto, el TPE y la familia de los elastómeros termoplásticos presentan una gran oportunidad para replicar el comportamiento de la composición osea de los hipocampos.

Los resultados muestran que es posible generar movimientos con múltiples grados de libertad a partir de un único estímulo de actuación. Aun hacen falta nuevos desarrollos, pruebas y re-diseño antes de lograr un robot implementable en tareas reales, pero el potencial del sistema es aparentemente alto.

Logrando combinar esta estructura con actuadores secundarios que ajusten la geometría o que modifiquen la rigidez, sería posible construir robots continuos que además de livianos, son escalables y de bajo costo, así como seguros de utilizar ya que los rangos de presión manejados no pueden causar grandes daños y por tener una estructura blanda las concusiones también son de menor gravedad. Considerando esto, se proponen desarrollos nuevos para un método de control y el sistema de actuación secundario que podría modificar la rigidez de los componentes discretos.

Gracias a que este método de actuación, por diseño mantiene un sellado hermético, hace este sistema ideal para acompañar a electrónica sensible que deba ser inmersa en fluidos o entornos que podrían dañar los componentes. Por lo que implementar un sistema de control podría abrir la posibilidad de otras líneas de robots continuos especializados en actuación en ambientes complejos como cuevas, ríos, aguas poco profundas, así como distintas aplicaciones

médicas.



# Bibliografía

- [1] Kolachalama, S. y Lakshmanan, S., “Continuum robots for manipulation applications: A survey,” 2020, <https://doi.org/10.1155/2020/4187048>.
- [2] Opie, J., Jaiprakash, A., Ploderer, B., Brereton, M., y Roberts, J., “Towards surgical robots: Understanding interaction challenges in knee surgery,” 2019, <https://doi.org/10.1145/3369457.3370916>.
- [3] Kastor, N., Mukherjee, R., Cohen, E., Vikas, V., Trimmer, B. A., y White, R. D., “Design and manufacturing of tendon-driven soft foam robots,” 2020, <https://doi.org/10.1017/S0263574719000481>.
- [4] Porter, M. M., Adriaens, D., Hatton, R. L., Meyers, M. A., y McKittrick, J., “Why the seahorse tail is square,” *Science*, vol. 349, no. 6243, p. 46, 2015, [doi:https://doi.org/10.1126/science.aaa6683](https://doi.org/10.1126/science.aaa6683).
- [5] Porter, M. M., Novitskaya, E., Castro-Ceseña, A. B., Meyer, M. A., y McKittrick, J., “Highly deformable bones: Unusual deformation mechanisms of seahorse armor,” *Acta Biomaterialia*, vol. 9, p. 6763–6770, 2013, [doi:https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.02.045](https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.02.045).
- [6] Kolachalama, S. y Lakshmanan, S., “Continuum robots for manipulation applications: A survey,” 2020, <https://doi.org/10.1155/2020/4187048>.
- [7] Lia, S., Vogta, D. M., Rus, D., y Wood, R. J., “Fluid-driven origami-inspired artificial muscles,” *PNAS*, vol. Early Edition, no. 00, p. 00, 2017, [doi:https://doi.org/10.1073/pnas.1713450114](https://doi.org/10.1073/pnas.1713450114).
- [8] Lia, S., Vogta, D. M., Rus, D., y Wood, R. J., “Fluid-driven origami-inspired artificial muscles, si appendix,” *PNAS*, vol. Early Edition, no. 00, p. 00, 2017, [doi:https://doi.org/10.1073/pnas.1713450114](https://doi.org/10.1073/pnas.1713450114).
- [9] Yousefpour, A., Hojjati, M., y Immarigeon, J.-P., “Fusion bonding/welding of thermoplastic composites,” 2004, <https://doi.org/10.1177/0892705704045187>.
- [10] sch00f, “Documentación cubo de calibración,” 2017, <https://www.thingiverse.com/thing:2166102>.
- [11] Rohatgi, A., “Webplotdigitizer: Version 4.5,” 2021, <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>.
- [12] Creality, “Especificaciones técnicas impresora 3d ender 5,” 2021, <https://www.creality.com/goods-detail/ender-5-3d-printer>.

# Capítulo 8

## Anexos

# Anexo A

## Equipos utilizados



(a) Imagen

### Product parameters

Molding technology	FDM
Printing size	220*220*300mm
Machine size	552*485*510mm
N.W. of machine	11.8KG
Number of nozzle	1
Slice thickness	0.1mm-0.4mm
Printing method	online or TF card offline
File format	STL/OBJ/AMF
Filament diameter	1.75mm
Printing precision	±0.1mm
Rated power	270W
Nozzle diameter	standard 0.4mm, optional 0.2/0.3mm
Power supply	rated voltage 115V/230V, output 24V
Operating system	Win XP/Vista/7/10/Mac/Linux
Slicing software	Cura/Repetier-Host/Simplify3D

(b) Especificaciones técnicas

Figura A.1: Impresora Ender 5



(a) Imagen

Parameter	Value
Density	1.1 g/cm <sup>3</sup>
Tensile strength along with layers	17.5MPa
Tensile modulus along with layers	63.7MPa
Bending strength	5.3 MPa
Bending modulus	72.9MPa
Young's Modulus	900 MPa
Maximum bending load	8N
Maximum tensile load	633N
Shore hardness (scale A)	88
Poisson's ratio	0.41

(b) Especificaciones técnicas  
[12]

Figura A.2: TPE



(a) Imagen

Brand	LONG WEI
Model	K3010D
Line Voltage	AC110/240V ±10% 60Hz /50Hz
Output Voltage	0-30V
Output Current	0-10A
Voltage Display Accuracy	±0.5%
Current Display Accuracy	±0.5%
Efficiency	>85%
<b>Voltage Regulation</b>	
Load Regulation(10-100%)	50mV
Line Regulation(200-240VAC)	20mV
Ripple & Noise(P-P)	50mV
<b>Current Regulation</b>	
Load Regulation(10-100%)	20mV
Line Regulation(200-240VAC)	20mA
Ripple & Noise(P-P)	20mA
<b>Others</b>	
Display	3 Digit LED Display
Display Accuracy	±1%±1
Operating Ambient	-10°C to + 60°C/ 30%RH to 90% RH
Dimension	70 x 160 x 220mm
Weight	1.35KG

(b) Especificaciones técnicas

Figura A.3: Fuente de poder



(a) Imagen

**AIR PUMP SERIES** FOREVER

---

**D2028 Pump Specifications**

Free Flow Range.....12-15LPM  
 Vacuum Range.....0-16"Hg  
 Pressure Range.....0-32PSI  
 Standard Motor Voltage Options.....12VDC  
 Power.....12W  
 Motor Construction Option.....Iron Core-Oil Bearing  
 Diaphragm Material Option.....EPDM  
 Operating Temperature Range.....32°-120°F (0°-50°)

(b) Especificaciones técnicas

Figura A.4: Bomba de vacío



(a) Imagen

**Specifications**

Pressure Gauge	4" diameter, gauge scales: 0-28 IN-Hg (0-70 cm-Hg) vacuum; 0-10 PSIG (0-0.7 kg/cm <sup>2</sup> ) pressure
Brass Fittings	1/4"-18 (male) x 1/8" - 27 (female) 1/8"-27 (male) x 7/32" (barbed fitting) 1/8"-27 (female) x 3/8" - 18 (male)
Rubber Hose	13/64" (ID), 23/64" (OD), x 24", 40 PSI (max) working pressure
Weight	2 lb. <sup>1</sup> / <sub>2</sub>

(b) Especificaciones técnicas

Figura A.5: Vacuómetro



(a) Imagen

Marca	FDV
Modelo	Astro
Tensión	220 V
Potencia	0.8 bar
Peso	1.0 kg
Materiales especiales	Acero inoxidable

(b) Especificaciones técnicas

Figura A.6: Selladora



(a) Imagen

Item No.	Type of Bag	For Use With Type of Machine	Dimensions Inches (CM)	Capacity (L)					Max Temp °F (°C)	Oxygen Transfer Rate: (65% RH, 73° F)	Moisture Vapor Transfer Rate: (90% RH, 100° F)	Material	Made In	
				Gallon	Quart	Cups	Liter	Milliliter						
23850			6 x 8 (15.2 x 20.3)	.132	.53	2.11	.5	500	212 (100)	4.0	37.2	5.58	Nylon LLDPE Co-ex (Low Density Polyethylene). This material is extruded together during the manufacturing process. BPA free.	U.S.A.
23852	Boil-In Vacuum		8 x 12 (20.3 x 30.5)	.475	1.9	7.6	1.8	1800	158 (70)	3.0	61.8	8.37		
23854			12 x 16 (30.5 x 40.6)	1.3	5.7	22.8	5.4	5400						
40815	Vacuum Sealer	In Chamber	8 x 12 (20.3 x 30.5)	.475	1.9	7.6	1.8	1800	158 (70)	3.0	61.8	8.37		
40816			10 x 15 (25.4 x 38.1)	1	4.0	16	3.8	3800						
40817			12 x 16 (30.5 x 40.6)	1.43	5.7	22.8	5.4	5400						
40818			14 x 20 (35.6 x 50.8)	2.86	11.4	45.6	10.8	10800						
40812	Vacuum Sealer - Mesh	Out of Chamber	6 x 12 (15.2 x 30.5)	.2	.85	3.3	.8	800	158 (70)	3.9	75%	85% RH *73F	PA/PE 20/80 (Polyamide and Polyethylene in a 20%/80% blend). This is a blend of two materials mixed before the bag is manufactured. BPA free.	Italy
40813			8 x 12 (20.3 x 30.5)	.34	1.4	5.4	1.3	1300						
40814			10 x 14 (25.4 x 35.6)	.63	2.5	10	2.4	2400						

(b) Especificaciones técnicas

Figura A.7: Bolsas de sellado

# Anexo B

## Planos

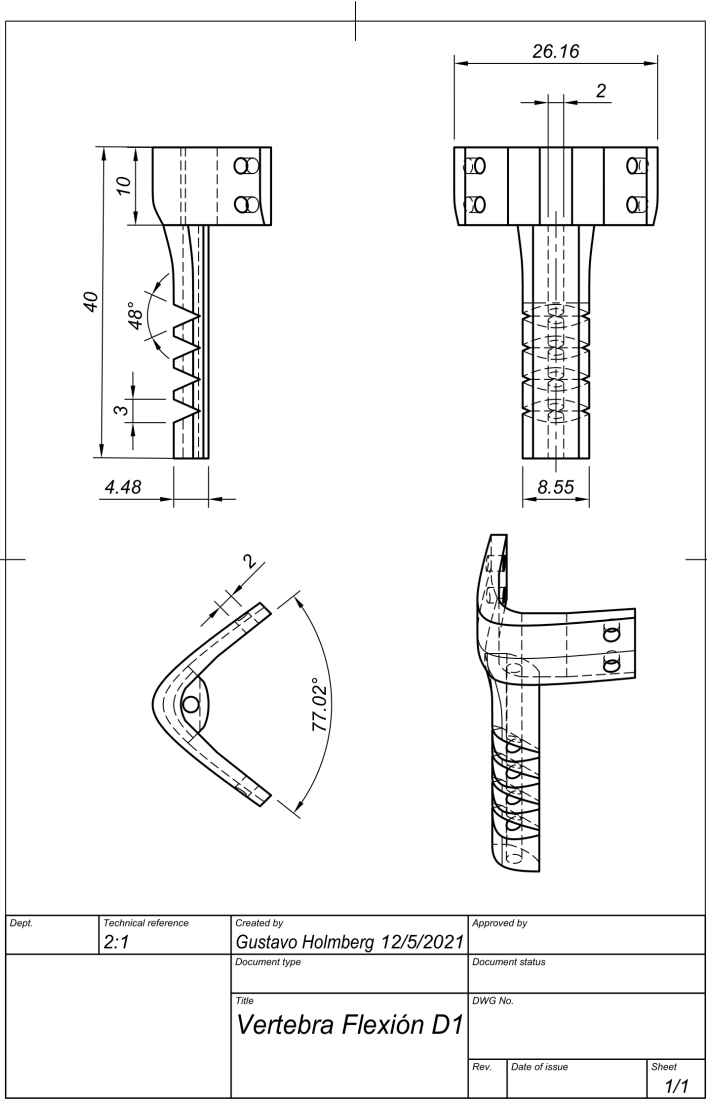


Figura B.1: Plano del diseño 1, vértebra flexible.

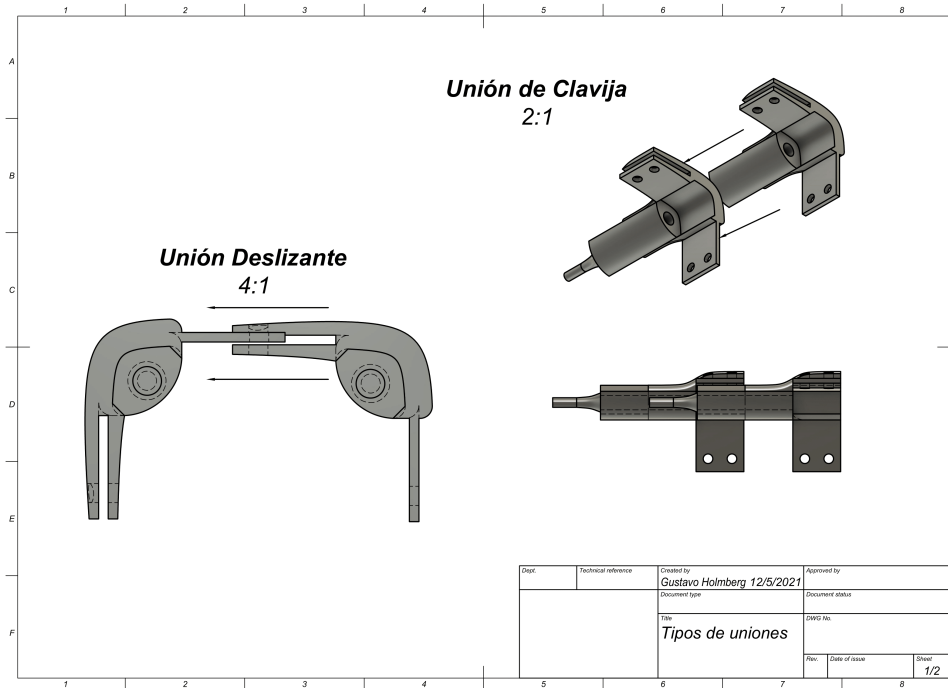


Figura B.2: Reemplazo del hilo elástico.

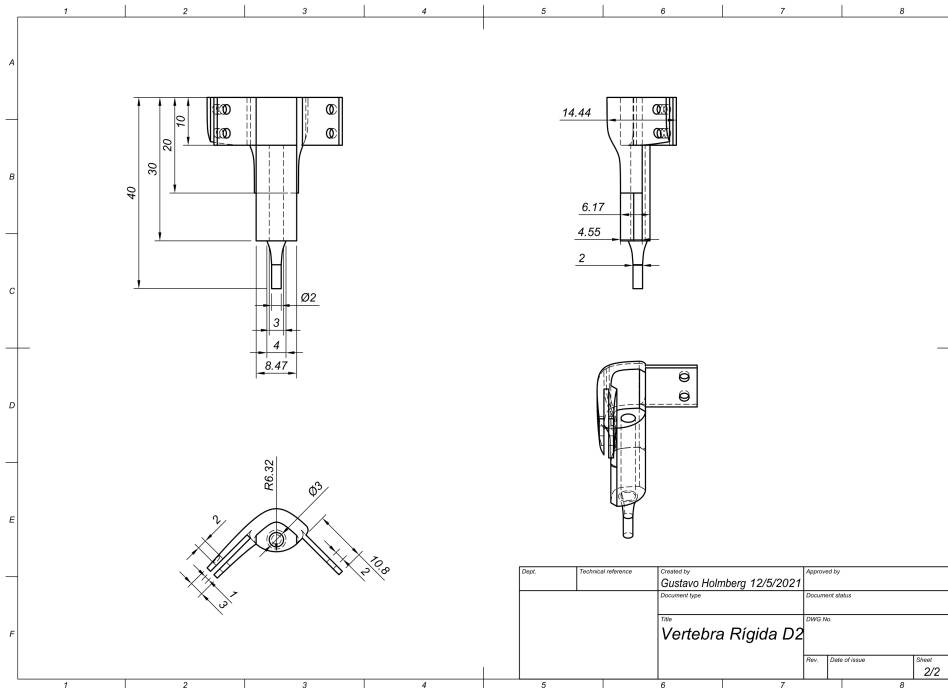


Figura B.3: Plano del diseño 2, vértebra rígida



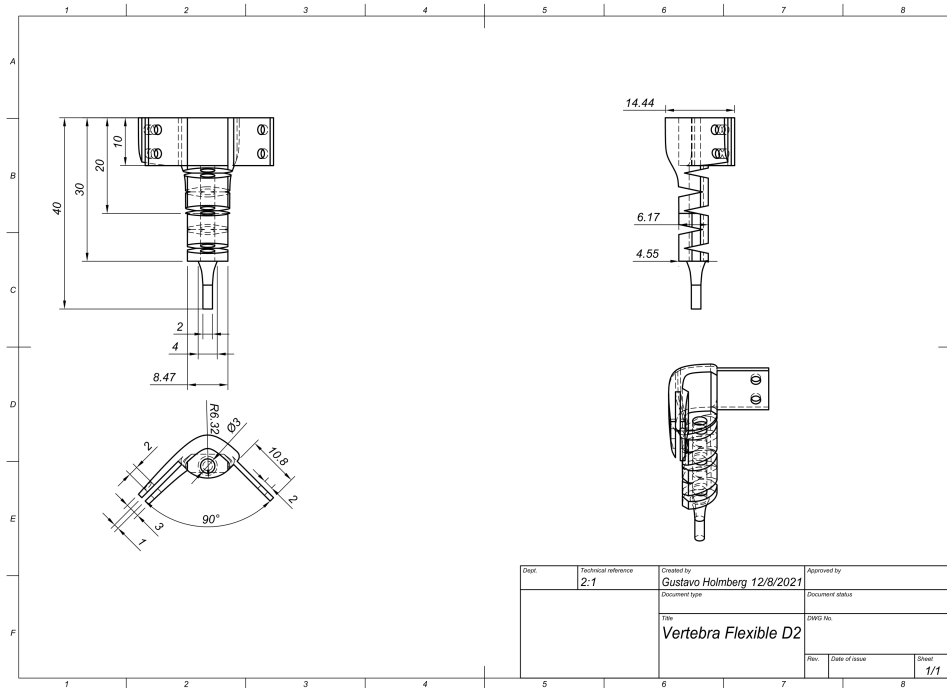


Figura B.4: Plano del diseño 2, vértebra flexible

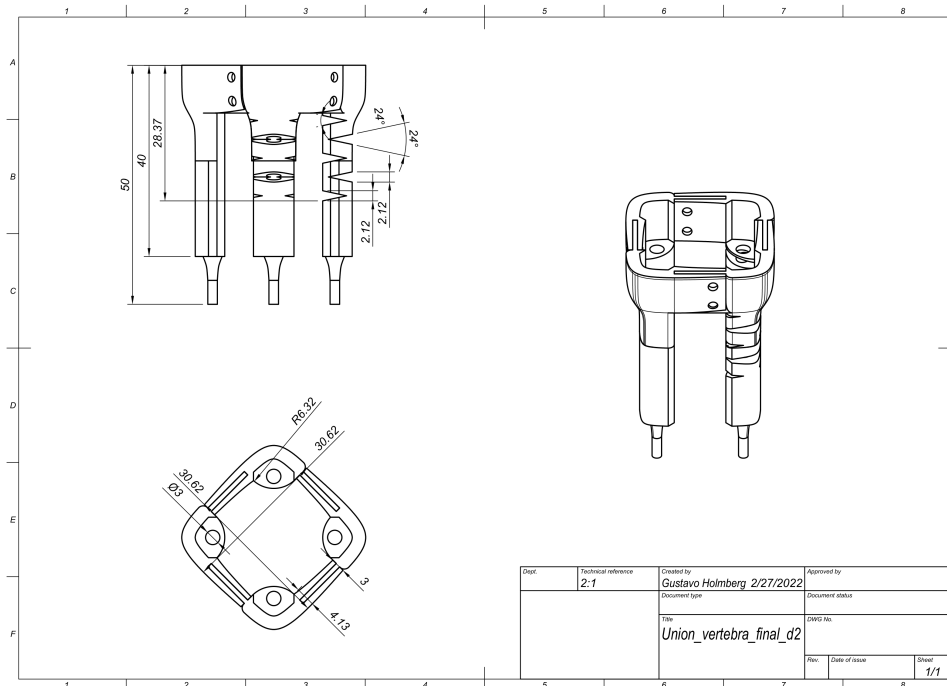


Figura B.5: Plano del diseño 3

# Anexo C

## Simulaciones

Tabla C.1: Configuraciones utilizadas

Material	TPE (ver propiedades en la figura A.2.b)
Carga	Presión 59 [kPa]
Restricciones	estructura cónica - deslizante, cara superior - fija

# Anexo D

## Capturas fotográficas de las pruebas



(a) 0 kPA



(b) 29 kPA

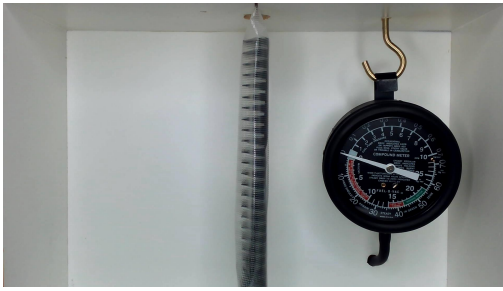


(c) 33 kPA



(d) 46 kPA

Figura D.1: Cola 12 grados



(a) 0 kPA



(b) 23 kPA



(c) 28 kPA



(d) 45 kPA

Figura D.2: Cola 24 grados



(a) 0 kPA



(b) 14 kPA



(c) 21 kPA



(d) 45.5 kPA

Figura D.3: Cola 36 grados



(a) 0 kPA



(b) 13 kPA



(c) 28 kPA



(d) 37 kPA

Figura D.4: Cola S frontal



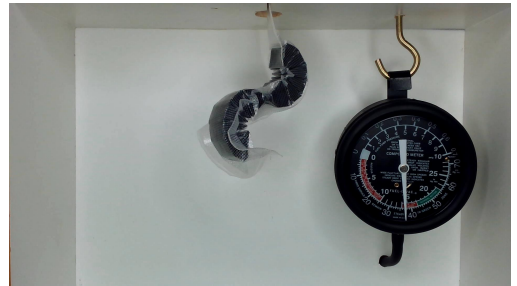
(a) 0 kPA



(b) 16 kPA



(c) 25 kPA



(d) 37 kPA

Figura D.5: Cola S lateral



(a) 0 kPA



(b) 19 kPA



(c) 35 kPA



(d) 46 kPA

Figura D.6: D2 perfil S



(a) 0 kPA



(b) 18 kPA



(c) 35 kPA



(d) 45.5 kPA

Figura D.7: D3 perfil S





(a) 0 kPA



(b) 22 kPA



(c) 31 kPA



(d) 45.5 kPA

Figura D.8: D4 perfil S retracción



(a) 0 kPA



(b) 22 kPA



(c) 31 kPA



(d) 45.5 kPA

Figura D.9: D4 diagonal



(a) 0 kPA



(b) 7 kPA



(c) 25 kPA



(d) 45 kPA

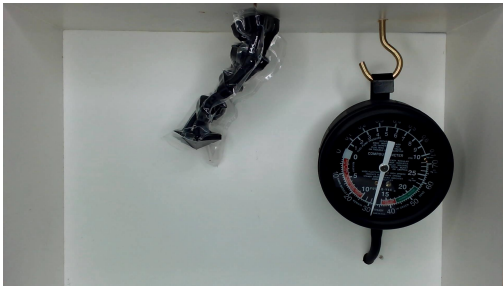
Figura D.10: D4 diagonal n



(a) 0 kPA



(b) 6 kPA



(c) 32 kPA



(d) 45 kPA

Figura D.11: D4 perfil S liso





(a) 0 kPA



(b) 12 kPA



(c) 27 kPA



(d) 40 kPA

Figura D.12: D4 perfil S rugoso



(a) 0 kPA



(b) 9 kPA



(c) 31 kPA



(d) 46 kPA

Figura D.13: D4 S ortogonal frente



(a) 0 kPA



(b) 6 kPA



(c) 14 kPA



(d) 44 kPA

Figura D.14: D4 S ortogonal lateral

# Anexo E

## Código Python

Código E.1: Script usado para el análisis de los datos.

```
1 from logging import error, warning
2 from unittest.loader import VALID_MODULE_NAME
3 from matplotlib.patches import Polygon
4 import numpy as np
5 import pandas as pd
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 from scipy.optimize import curve_fit
8 from scipy.interpolate import make_interp_spline, BSpline
9
10 #Calculates the coordintares of the middle point
11 def calc_half(coord1, coord2):
12     x1 = coord1[0]
13     y1 = coord1[1]
14     x2 = coord2[0]
15     y2 = coord2[1]
16     xm = (x2-x1)/2
17     ym = (y2-y1)/2
18     half_coord = (xm,ym)
19     return half_coord
20
21 #Calculate the distance between 2 points
22 def calc_distance(coord1, coord2):
23     x1 = coord1[0]
24     y1 = coord1[1]
25     x2 = coord2[0]
26     y2 = coord2[1]
27     d = np.sqrt((x2-x1)**2+(y2-y1)**2)
28     return d
29
30 #sine equation
31 def fit_func_sin(x, freq, amplitude, phase, offset):
32     return np.sin(x * freq + phase) * amplitude + offset
33
34 #calculate the theoretical deflection using design parameters to estimate the curvature radius
35     ↪ angle
36 def calc_deflection_t(R,side_l,shortening):
```

```

36 #print(np.pi,side_l,shortening)
37 beta = np.pi - 2 * np.arctan(2*side_l/shortening)
38 deflect = R * (1-np.cos(beta/2))
39 return deflect
40
41 #Return y value calculating the slope and intercept using 2 set of coordinates as reference
42 def point_slope(coord1, coord2):
43     x1 = coord1[0]
44     y1 = coord1[1]
45     x2 = coord2[0]
46     y2 = coord2[1]
47     m, b = np.polyfit([x1,x2],[y1,y2],1)
48     return m, b
49
50 def analyze_deflection_t(x,y,a,b,c,d):
51     #Designs parameters passed as global variables
52     l = 30.62
53     dh = 2.12*4
54     deflections_t = []
55     x_tm = []
56     y_tm = []
57     m1, b1 = point_slope((x[0],y[0]), (x[-1],y[-1]))
58     #uses only the lines perpendicular to the line from the first and last data
59     m2 = -1/m1
60     for i in range(1, len(x)-1,1):
61         y_t = y[i]
62         x_t = a + b*y_t + c*y_t**2 + d*y_t**3
63         b_t = y_t - x_t*m2
64         x_tm.append((b_t-b1)/(m1-m2))
65         y_tm.append(m1*x_tm[-1]+b1)
66         d_t = calc_distance((x_t,y_t),(x_tm[-1],y_tm[-1]))
67         side_t = np.sign(x_tm[-1]-x_t)
68         deflections_t.append(side_t*d_t)
69
70     index_t_der = deflections_t.index(min(deflections_t))
71     index_t_izq = deflections_t.index(max(deflections_t))
72     deflect_t_der = deflections_t[index_t_der]
73     deflect_t_izq = deflections_t[index_t_izq]
74
75     x_td = a + b*y[index_t_der+1] + c*y[index_t_der+1]**2 + d*y[index_t_der+1]**3
76     y_td = y[index_t_der+1]
77     x_ti = a + b*y[index_t_izq+1] + c*y[index_t_izq+1]**2 + d*y[index_t_izq+1]**3
78     y_ti = y[index_t_izq+1]
79     coord_ti = (x_ti,y_ti)
80     coord_td = (x_td,y_td)
81     coord_tmi = (x_tm[index_t_izq],y_tm[index_t_izq])
82     coord_tmd = (x_tm[index_t_der],y_tm[index_t_der])
83     curv_radius_ci = 1 / calc_curvature_t(y_ti,b,c,d)
84     curv_radius_cd = 1 / calc_curvature_t(y_td,b,c,d)
85     deflect_c_izq = calc_deflection_t(curv_radius_ci,l,dh)
86     deflect_c_der = calc_deflection_t(curv_radius_cd,l,dh)
87     deflect_c = (deflect_c_der,deflect_c_izq)

```

```

88     deflect_t = (-deflect_t_der,deflect_t_izq)
89     print(deflect_c, deflect_t)
90     return deflect_c, deflect_t, coord_td, coord_ti, coord_tmd, coord_tmi
91
92 def analyze_deflection_e(x,y):
93     deflections_e = []
94     x_em = []
95     y_em = []
96     m1, b1 = point_slope((x[0],y[0]), (x[-1],y[-1]))
97     #uses only the lines perpendicular to the line from the first and last data
98     m2 = -1/m1
99     theta_inclination = np.arctan(m2) * 180 / np.pi
100    for i in range(1, len(x)-1,1):
101        b_e = y[i] - x[i]*m2
102        x_em.append((b_e-b1)/(m1-m2))
103        y_em.append(m1*x_em[-1]+b1)
104        d_e = calc_distance((x[i],y[i]),(x_em[-1],y_em[-1]))
105        side_e = np.sign(x_em[-1]-x[i])
106        deflections_e.append(side_e*d_e)
107
108    index_e_der = deflections_e.index(min(deflections_e))
109    index_e_izq = deflections_e.index(max(deflections_e))
110    deflect_e_der = deflections_e[index_e_der]
111    deflect_e_izq = deflections_e[index_e_izq]
112    coord_emi = (x_em[index_e_izq],y_em[index_e_izq])
113    coord_ei = (x[index_e_izq+1], y[index_e_izq+1])
114    coord_emd = (x_em[index_e_der],y_em[index_e_der])
115    coord_ed = (x[index_e_der+1], y[index_e_der+1])
116
117    deflect_e = (-deflect_e_der,deflect_e_izq)
118    return deflect_e, coord_emd, coord_emi, coord_ed, coord_ei, theta_inclination
119
120
121
122
123 #given the directory sorts the data and return it
124 def handle_dataset(main_dir, vid_name, ds, file_name):
125     coord_dict = {}
126     file_loc = main_dir + vid_name + file_name + str(ds) + ".csv"
127     data = pd.read_csv(file_loc, header=None)
128     data = data.reset_index()
129
130     for index, row in data.iterrows():
131         coord_dict[index] = (row[0],(1080*ds)-row[1])
132     x, y = zip(*coord_dict.values())
133     order = np.argsort(y)
134     x_n = np.array(x)[order]
135     y_n = np.array(y)[order]
136
137     return x_n, y_n
138
139 #given the data and fitted data calculate the residual squared sum and error

```

```

140 def calc_residual_stats(x,fitted_x):
141     residuals = []
142     sqrd_residuals = []
143
144     for i in range(len(x)):
145         residuals.append(x[i]-fitted_x[i])
146         sqrd_residuals.append((x[i]-fitted_x[i])**2)
147     RSS = sum(sqrd_residuals)
148     RSE = np.sqrt(RSS/(len(x)-2))
149     print("RSS:", RSS, "RSE:", RSE)
150
151     return RSS, RSE
152
153 #Finds a polinome parameters that fits the data
154 def fit_to_poli(x,y):
155     popt, pcov = curve_fit(fit_func_poli, y, x)
156
157     fitted_x = []
158     for item in y:
159         fitted_x.append(fit_func_poli(item, *popt))
160
161     return fitted_x, popt, pcov
162
163 #Finds a sine parameters that fits the data
164 def fit_to_sine(x,y):
165     #initial guesses
166     initial_freq = 0.025
167     initial_amplitude = 3*np.std(x)/(2**0.5)
168     initial_phase = 0.025
169     initial_offset = np.mean(x)
170     p0=[initial_freq, initial_amplitude,initial_phase, initial_offset]
171     popt, pcov = curve_fit(fit_func_sin, y, x, p0=p0)
172
173     fitted_x = []
174     for item in y:
175         fitted_x.append(fit_func_poli(item, *popt))
176
177     return fitted_x, popt, pcov
178
179 #Calculate the closest shape of the apendix using a 3rd degree polinome
180 def graph_dataset(main_dir, vid_name, ds, file_name,x,fitted_x,y,popt,coord_td, coord_ti,
    ↪ coord_tmd, coord_tmi, coord_emd, coord_emi, coord_ed, coord_ei):
181     file_path = main_dir + vid_name + file_name + str(ds) + ".png"
182     plt.rc('axes', titlesize=36) # fontsize of the axes title
183     plt.rc('axes', labelszize=32) # fontsize of the x and y labels
184
185     fig, ax1 = plt.subplots(1,1)
186     fig.set_size_inches(19.2,10.8)
187     ax1.set_title("Discretización Eje Neutro del Apéndice")
188     ax1.scatter(x,y,color="blue", alpha=0.3)
189     ax1.plot(x,y,color="blue")

```

```

190     ax1.plot((coord_ed[0],coord_emd[0]),(coord_ed[1],coord_emd[1]),color="blue", alpha
↪ =0.8)
191     ax1.plot((coord_ei[0],coord_emi[0]),(coord_ei[1],coord_emi[1]),color="blue", alpha
↪ =0.8, label = "Curva discreta")
192     ax1.plot((x[0],x[-1]),(y[0],y[-1]),color="c", label = "Línea media")
193     ax1.plot((coord_td[0],coord_tmd[0]),(coord_td[1],coord_tmd[1]),color="green", alpha
↪ =0.8)
194     ax1.plot((coord_ti[0],coord_tmi[0]),(coord_ti[1],coord_tmi[1]),color="green", alpha
↪ =0.8, label = "Curva teórica")
195     ax1.plot(fitted_x, y,'g--', label='fit:a= %5.3f, b= %5.3f, c= %5.3f, d= %5.3f' % tuple(
↪ popt))
196     ax1.set_xlim(0,1920)
197     ax1.set_ylim(0,1080)
198     ax1.set_ylabel("Píxeles eje y")
199     ax1.set_xlabel("Píxeles eje x")
200     ax1.legend(prop={'size': 22})
201     ax1.grid()
202     figManager = plt.get_current_fig_manager()
203     figManager.set_window_title("Análisis de curvatura " + vid_name + " " + file_name
↪ [1:] + str(ds))
204     figManager.window.showMaximized()
205     plt.tight_layout()
206     plt.savefig(file_path, dpi = 100)
207     #plt.show()
208     plt.close()
209
210 def graph_parameters(main_dir,vid_name,inclinations,vacuum,apparent_length,file_name=
↪ "_Grafico_parametros"):
211     file_path = main_dir + vid_name + file_name + ".png"
212     plt.rc('axes', titlesize=12)    # fontsize of the axes title
213     plt.rc('axes', labelsz=12)     # fontsize of the x and y labels
214     fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2,1)
215     ax1.set_title("Movimiento general del apéndice")
216     ax1.plot(vacuum,inclinations,color="blue",label="Inclinación respecto a la horizontal")
217     ax1.set_ylabel("Inclinación" + ' [' + u'\N{DEGREE SIGN}' + ']')
218     ax1.set_xlabel("Vacío [kPa]")
219     ax1.legend(prop={'size': 7})
220     ax1.grid()
221     ax2.set_title("Largo aparente del apéndice")
222     ax2.plot(vacuum,apparent_length,color="blue",label="Largo línea media")
223     ax2.set_ylabel("Largo aparente [px]")
224     ax2.set_xlabel("Vacío [kPa]")
225     ax2.legend(prop={'size': 7})
226     ax2.grid()
227     figManager = plt.get_current_fig_manager()
228     figManager.set_window_title(file_name + vid_name)
229     figManager.window.showMaximized()
230     plt.tight_layout()
231     plt.savefig(file_path, dpi = 100)
232     #plt.show()
233     plt.close()
234

```



```

235 def graph_deflections(main_dir,vid_name,vacuum,list_deflect_de,list_deflect_ie,
    ↪ list_deflect_dt,list_deflect_it,list_deflect_c_dt,list_deflect_c_it,file_name="
    ↪ _deflexiones"):
236     #Plot de los graficos
237     file_path = main_dir + vid_name + file_name + ".png"
238     fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1)
239     ylim = max([max(list_deflect_de),max(list_deflect_ie),max(list_deflect_dt),max(
    ↪ list_deflect_it)])
240     ax1.set_title("Deflexión aparente experimental")
241     ax1.set_ylabel("Deflexión aparente [px]")
242     ax1.set_xlabel("Vacío [kPa]")
243     ax1.set_ylim(0, ylim)
244     ax1.plot(vacuum, list_deflect_ie, color="orange", label="Deflexión izquierda")
245     ax1.plot(vacuum, list_deflect_de, color="blue", label="Deflexión derecha")
246     ax1.legend()
247     ax2.set_title("Deflexión polyfit")
248     ax2.set_ylabel("Deflexión [px]")
249     ax2.set_xlabel("Vacío [kPa]")
250     ax2.set_ylim(0, ylim)
251     ax2.plot(vacuum, list_deflect_it, color="green", label="Deflexión izquierda")
252     ax2.plot(vacuum, list_deflect_dt, color="magenta", label="Deflexión derecha")
253     ax2.legend()
254     ax1.fill_between(vacuum, 0, list_deflect_ie, alpha=0.1, color='orange')
255     ax1.fill_between(vacuum, 0, list_deflect_de, alpha=0.1, color='blue')
256     ax2.fill_between(vacuum, 0, list_deflect_it, alpha=0.1, color='green')
257     ax2.fill_between(vacuum, 0, list_deflect_dt, alpha=0.1, color='magenta')
258     ax1.grid()
259     ax2.grid()
260     figManager = plt.get_current_fig_manager()
261     figManager.set_window_title(file_name + " " + vid_name)
262     figManager.window.showMaximized()
263     plt.tight_layout()
264     plt.savefig(file_path, dpi = 100)
265     #plt.show()
266     plt.close()
267
268 def calc_vid_stats(list_RSE, list_deflect_de, list_deflect_dt, list_deflect_ie, list_deflect_it
    ↪ ):
269     residuals_d = []
270     residuals_i = []
271     video_RSE = np.mean(list_RSE)
272
273     for i in range(len(list_deflect_de)):
274         residuals_d.append(np.abs(list_deflect_de[i]-list_deflect_dt[i]))
275         residuals_i.append(np.abs(list_deflect_ie[i]-list_deflect_it[i]))
276     RSE_deflec_d = sum(residuals_d)/(len(list_deflect_de)-2)
277     RSE_deflec_i = sum(residuals_i)/(len(list_deflect_ie)-2)
278
279     return RSE_deflec_d, RSE_deflec_i, video_RSE
280
281

```



```

282 def save_report(RSE_deflec_d, RSE_deflec_i, video_RSE, main_dir, vid_name, file_name
    ↪ = "_Estadisticas_dataset_"):
283     #Create a dataframe to store the relevant information from the datasets
284     file_loc = main_dir + vid_name + file_name + ".csv"
285     print(file_loc,type(file_loc))
286     data = {"RSE deflexion derecha": RSE_deflec_d,"RSE deflexion izquierda":RSE_deflec_i,
    ↪ "RSE Video":video_RSE}
287     df = pd.DataFrame(data,index=[0])
288     df.to_csv(file_loc)
289
290 def dataset_analysis(main_dir, vid_name, ds, file_name="\Dataset "):
291
292     x, y = handle_dataset(main_dir, vid_name, ds, file_name)
293     app_len = calc_distance((x[0],y[0]),(x[-1],y[-1]))
294     fitted_x, popt, pcov = fit_to_poli(x,y)
295     a,b,c,d = zip(popt)
296     a = np.float64(a)[0]
297     b = np.float64(b)[0]
298     c = np.float64(c)[0]
299     d = np.float64(d)[0]
300     #Calculos de fitness
301     RSS, RSE = calc_residual_stats(x, fitted_x)
302     params_std = np.sqrt(np.diag(pcov))
303     deflect_e, coord_emd, coord_emi, coord_ed, coord_ei,theta_inclination =
    ↪ analyze_deflection_e(x,y)
304     curv_radius_t, deflect_t, coord_td, coord_ti, coord_tmd, coord_tmi =
    ↪ analyze_deflection_t(x,y,a,b,c,d)
305     curv_radius_dt = curv_radius_t[0]
306     curv_radius_it = curv_radius_t[1]
307     deflect_de = deflect_e[0]
308     deflect_ie = deflect_e[1]
309     deflect_dt = deflect_t[0]
310     deflect_it = deflect_t[1]
311     graph_dataset(main_dir, vid_name, ds, file_name,x,fitted_x,y,popt,coord_td, coord_ti,
    ↪ coord_tmd, coord_tmi, coord_emd, coord_emi, coord_ed, coord_ei)
312     return RSS, RSE, params_std, deflect_de, deflect_dt, deflect_ie, deflect_it,
    ↪ curv_radius_dt, curv_radius_it,theta_inclination, app_len
313
314
315 def process_datasets(main_dir, vid_name,n_datasets = 25):
316     list_RSS = []
317     list_RSE = []
318     list_params_std = []
319     list_deflect_de = []
320     list_deflect_dt = []
321     list_deflect_ie = []
322     list_deflect_it = []
323     list_deflect_c_dt = []
324     list_deflect_c_it = []
325     list_theta_inclination = []
326     list_app_len = []
327     for ds in range(n_datasets):

```

```

328     RSS, RSE, params_std, deflect_de, deflect_dt, deflect_ie, deflect_it, deflect_c_dt,
    ↪ deflect_c_it, theta_inclination, app_len = dataset_analisis(main_dir, vid_name, ds
    ↪ +1)
329     list_RSS.append(RSS), list_RSE.append(RSE), list_params_std.append(params_std),
    ↪ list_deflect_de.append(deflect_de)
330     list_deflect_dt.append(deflect_dt), list_deflect_ie.append(deflect_ie), list_deflect_it.
    ↪ append(deflect_it)
331     list_deflect_c_dt.append(deflect_c_dt), list_deflect_c_it.append(deflect_c_it),
    ↪ list_theta_inclination.append(theta_inclination), list_app_len.append(app_len)
332
333 RSE_deflec_d, RSE_deflec_i, video_RSE = calc_vid_stats(list_RSE, list_deflect_de,
    ↪ list_deflect_dt, list_deflect_ie, list_deflect_it)
334 save_report(RSE_deflec_d, RSE_deflec_i, video_RSE, main_dir, vid_name)
335 return list_deflect_de, list_deflect_ie, list_deflect_dt, list_deflect_it, list_deflect_c_dt,
    ↪ list_deflect_c_it, list_theta_inclination, list_app_len
336
337 def loop_videos(main_dir, vid_list, vacuum_csv, n_datasets = 25):
338     vid_vacuums = pd.read_csv(vacuum_csv)
339     for vid_name in vid_list:
340         list_deflect_de, list_deflect_ie, list_deflect_dt, list_deflect_it, list_deflect_c_dt,
    ↪ list_deflect_c_it, list_theta_inclinations, list_app_len = process_datasets(main_dir
    ↪ , vid_name, n_datasets)
341         vacuum = vid_vacuums[vid_name]
342         graph_parameters(main_dir, vid_name, list_theta_inclinations, vacuum, list_app_len)
343         graph_deflections(main_dir, vid_name, vacuum, list_deflect_de, list_deflect_ie,
    ↪ list_deflect_dt, list_deflect_it, list_deflect_c_dt, list_deflect_c_it)
344
345 ##### Function call
    ↪ #####
346
347 if __name__ == "__main__":
348     #parameters to assemble the directory of the videos
349     main_folder = 'D:\\Vida\\Trabajo de titulo\\Python_code\\'
350     vid_names = ["d4_perfil_S_liso", "d4_perfil_S_rugoso", "d3_perfil_S",
351     "d2_perfil_S", "cola_S_frontal", "cola_S_lateral", "d4_4f_2f",
352     "d4_S_ortogonal_frente", "d4_S_ortogonal_lateral", "d4_diagonal",
353     "d4_diagonal_n", "d4_4f_2f"]
354     #directory of a document with the vacuum measurement of each video. The headers
    ↪ of the document must have the same name as the folder
355     vacuum_file_name = "presiones_tesis.csv"
356
357     vacuum_dir = main_folder + vacuum_file_name
358     loop_videos(main_folder, vid_names, vacuum_dir)

```

# Anexo F

## Links relacionados

Tabla F.1: Links a recursos adicionales.

<b>Recopilación de las pruebas</b>	<a href="https://www.youtube.com/watch?v=VvrgewuT50s">https://www.youtube.com/watch?v=VvrgewuT50s</a>
<b>Código en github</b>	<a href="https://github.com/Continumm2021/TT_Hipocampo">https://github.com/Continumm2021/TT_Hipocampo</a>