



**Caracterización mecánica de dos tipos de tubos construidos por gusanos marinos  
(Annelida: Polychaeta)**

Juan Fernando Cucuyame Morales

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesores

Pablo Zavattieri, Doctor (PhD)

Mario Hernán Londoño Mesa, Doctor (PhD)

Carlos Alberto Mejía Blandon, Magíster (MSc)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

---

Cita	Cucuyame Morales, Juan [1]
<b>Referencia</b> Estilo IEEE (2020)	[1] J. Cucuyame Morales, “Caracterización mecánica de dos tipos de tubos construidos por gusanos marinos (Annelida: Polychaeta)”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.

---



Grupo de Investigación Diseño Mecánico.

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).

Reserva Natural Sangaré.

Grupo de Limnología Básica y Experimental y Biología y Taxonomía Marina. Instituto de Biología.



Centro Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** Jhon Jairo Arboleda.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas.

**Jefe departamento:** Pedro Leon Simanca.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

---

## **CONTENIDO:**

<b>1 RESUMEN:</b>	8
<b>2 INTRODUCCIÓN</b>	9
<b>3 OBJETIVOS</b>	11
3.1 General:	11
3.2 Específicos:	11
<b>4 MARCO TEÓRICO:</b>	11
<b>5 ESTADO DEL ARTE:</b>	16
<b>6 METODOLOGÍA:</b>	18
6.1 Diseño y Construcción máquina para ensayos de tracción:	19
6.2 Parametrización:	20
6.2.1 Parametrización Guías soporte:	20
6.2.2 Parametrización soporte móvil:	22
6.2.3 Parametrización soporte fijo:	23
6.3 Partes comerciales:	25
6.4 Control:	26
6.4.1 Código calibración de la celda de carga:	29
6.4.2 Código para manejo de la máquina:	29
6.5 Calibración:	31
6.6 Identificación Taxonómica	32
6.7 Recolección muestras:	33
6.8 Medición:	34
<b>7 RESULTADOS</b>	34
7.1 Calibración máquina de ensayos de tracción:	35
7.2 Resultados por familia de poliquetos y zona del tubo	36

---

7.2.1	Sabellidae:	36
7.2.2	Onuphidae:	39
7.3	Comparaciones:	43
7.3.1	Sabellidae Zona superior con inferior	43
7.3.2	Onuphidae zona superior con inferior	45
7.3.3	Onuphidae zona superior con Sabellidae zona superior	46
7.3.4	Onuphidae zona inferior con Sabellidae zona inferior	47
7.3.5	Onuphidae zona superior con Sabellidae zona inferior	48
7.3.6	Onuphidae zona inferior con Sabellidae zona superior	50
7.4	Estudio superficial:	51
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES:</b>	<b>54</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>55</b>

---

## LISTA DE FIGURAS:

Figura 1	Figura 1. a) Poliqueto de la familia Sabellidae (Izq), Tubo de Sabellidae, zonas y medidas promedio. b) Poliqueto de la familia Onuphidae (Izq), Tubo de Onuphidae, zonas y medidas promedio (Fotografías: Mario H. Londoño)	12
Figura 2.	Grafica esfuerzo deformación. Zona 1 (Gris): zona elástica, Zona 2 (Azul): zona plástica, E: Modulo de Young.	15
Figura 3 .	Comparación de tenacidad y elasticidad de materiales de ingeniería con respecto a los materiales biológicos	17
Figura 4.	Esquema del diseño máquina para realizar los ensayos de tracción.	19
Figura 5.	Condiciones de frontera parametrización.	20
Figura 6.	Soporte móvil, dimensiones y condiciones de frontera. e: espesor, h: altura.	21
Figura 7.	Parámetros en función de variables guía móvil	22
Figura 8.	Deformación elástica vs Parámetro altura	22
Figura 9.	Soporte Fijo, dimensiones y condiciones de frontera. e: espesor, h: altura.	23
Figura 10.	Parámetros en función de variables Soporte superior.	23
Figura 11.	Deformación elástica vs Parámetro altura	24
Figura 12.	Máquina construida.	25
Figura 13.	Caja de control Maquina.	26
Figura 14.	Conexión a Arduino del motor usando controlador a4988.	26
Figura 15.	Conexión de la celda de carga a Arduino usando controlador HX711.	27
Figura 17.	Mordazas para calibración.	31
Figura 18.	Mapa de zona de recolección de muestras.	32
Figura 19.	Dimensiones generales.	33
Figura 20.	Calibración máquina portátil.	34
Figura 21.	Sabellidae Inferior en sitio y fijo en alcohol.	36
Figura 22.	Sabellidae Superior en sitio y fijo en alcohol.	36
Figura 23.	Falla muestra Sabellidae.	37
Figura 24.	Patron construccion Onuphidae.	38
Figura 25.	Onuphidae Inferior en sitio y alcohol.	38
Figura 26.	Onuphidae Superior en sitio y alcohol.	39
Figura 27.	Falla muestra de Onuphidae.	40

---

Figura 28. Comparación de elasticidad y tenacidad de Sabellidae Superior con Inferior.	41
Figura 29. Comparacion de elasticidad y tenacidad de Onuphidae Superior con Inferior.	42
Figura 33. Comparacion de elasticidad y tenacidad de Onuphidae inferior con Sabellidae Inferior.	44
Figura 30. Comparación de elasticidad y tenacidad de Onuphidae Superior con Sabellidae Inferior.	45
Figura 31. Comparacion de elasticidad y tenacidad de Onuphidae Inferior con Sabellidae Superior.	46
Figura 34. Vista del corte del tubo de Sabellidae	47
Figura 35. Composición química arrojada por el SEM	48
Figura 36. Vista interna del tubo de Sabellidae	48
Figura 37. Vista interna del tubo de Onuphidae	49

---

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por ser un apoyo incondicional y por enseñarme que todo se puede lograr con esfuerzo y dedicación, por estar ahí en todos los momentos de mi vida y por las enseñanzas que me brindaron. A mi hermano por ser un ejemplo a seguir y haberme apoyado en este proceso. Le agradezco a mis amigos los cuales me han ayudado a crecer y a ser feliz.

Le agradezco al grupo GDM por haberme abierto las puertas desde primer semestre, enseñándome el valor de la investigación e inspirándome a cuestionar y descubrir lo que me rodea, le agradezco al director del grupo Junes Abdul Villarraga por haber estado en mi formación de ingeniero y haberme guiado en mi formación como ingeniero.

Le agradezco a mis asesores, el profesor Carlos Alberto Mejía por brindarme de sus conocimientos en el tema de la ingeniería, al profesor Mario Hernan Londoño por brindarme sus conocimientos en el campo de la biología y por enseñarme que hay mundo entero por descubrir y que debemos soñar en alto para lograr todo lo que nos proponemos y al profesor Pablo Zavattieri de la universidad de Purdue, que a pesar de la distancia ha estado muy pendiente de mi proceso inspirándome y siendo un referente para seguir teniendo esa chispa de la curiosidad.

Le agradezco al departamento de ingeniería mecánica y a todos sus profesores, por haber puesto su grano de arena en todo este proceso académico y personal.

A la Universidad de Antioquia, por acogerme durante estos años y haberme brindado experiencias únicas. Finalmente le agradezco a la reserva natural Sanguaré por enseñarme de sostenibilidad y por el apoyo brindado en el desarrollo de este trabajo.

## 1 RESUMEN:

En este trabajo se presenta la caracterización mecánica de tubos construidos por dos familias de Poliquetos denominados Sabellidae y Onuphidae. Los poliquetos son gusanos marinos de la clase Polychaeta (Annelida) ampliamente distribuidos en el planeta; se pueden encontrar estas especies a diferentes profundidades y a diferentes condiciones climáticas. Para el desarrollo del estudio se diseñó, construyó y se calibró una máquina de ensayos de tensión portátil, esta máquina se empleó para realizar ensayos en sitio y para comprobar cómo afecta el método de conservación (fijación) usado en la resistencia mecánica del material. La capa exterior de los tubos la cual es la encargada de dar resistencia mecánica es diferente para cada una de las especies, sin embargo, para ambas se pueden identificar dos zonas diferentes, por este motivo, se comparó la resistencia para cada una de estas zonas. Los resultados indican que la resistencia depende de la zona del tubo y de la configuración del mismo, también mediante microscopía SEM se pudo encontrar un patrón laminar en su estructura lo que indica la forma de construcción. La principal contribución de esta investigación es establecer la estructura y el desempeño del material compuesto creado por estos poliquetos cuando se someten a esfuerzos de tensión.

**Palabras clave:** Polychaeta, Sabellidae, Onuphidae, tensión, microscopía SEM.

## 2 INTRODUCCIÓN

La biomimética es el estudio de sistemas biológicos para la inspiración, creación de nuevas estructuras y funciones, buscando resolver problemas que se han presentado en la humanidad para luego aplicarlos en la ciencia e ingeniería.

Durante millones de años las especies han evolucionado, logrando supervivir a las diferentes condiciones que el ambiente les ofrece. Algunas de las estrategias evolutivas que se han adquirido a través del uso de diferentes estructuras jerárquicas son armaduras de protección, aerodinamicidad, impermeabilidad, mimetismo y capacidad de construcción de estructuras [1]–[3]. Estas estructuras brindan distribuciones, dimensiones y propiedades específicas para que el sistema responda de la mejor manera a la necesidad presentada. Siendo los poliquetos un grupo de animales marinos muy diverso, algunos se destacan por la construcción de estructuras y tubos dentro de los cuales viven. Se han encontrado registros de poliquetos desde el Cámbrico, con lo cual podemos entender sus diversas estrategias de supervivencia a través de la construcción de estructuras de protección y refugio [4].

Algunas especies construyen sus tubos usando partículas de arena, piedras y material vegetal que tienen disponible en el fondo del mar, en la costa, en raíces de manglares, los cuales pegan mediante un adhesivo secretado por una serie de glándulas. Estos tubos, por lo general, se encuentran enterrados en la arena y son usados como refugio para protegerse de las condiciones ambientales cambiantes, así como de los depredadores. Algunas familias de poliquetos que construyen tubos son Sabellidae, Pectinariidae y Onuphidae.[5]

Se ha encontrado que la composición y construcción de los tubos cambia dependiendo de la especie y el material que tengan a su disposición, lo que genera tubos con propiedades mecánicas diferentes. Mediante ensayos de tensión se puede cuantificar la resistencia que tiene un material y con estos valores podemos clasificarlos conociendo su comportamiento a este tipo de cargas.[6] Conocer las propiedades mecánicas, la estructura y el comportamiento de este tipo de material, permite intentar copiarlo, para crear materiales compuestos en laboratorio que brinden propiedades

similares, e incluso permite variar los materiales y/o la organización estructural para influir sobre las propiedades mecánicas obtenidas.

El alcance principal de esta investigación es realizar la caracterización mecánica a tracción del adhesivo de los tubos de organismos de dos familias diferentes de poliquetos, Sabellidae y Onuphidae. Para ello, se fabricó una máquina portátil que permitiera realizar ensayos de tracción para cuantificar sus propiedades mecánicas y realizó una caracterización superficial con el fin de conocer las estructuras que los componen.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 General:

Determinar la estructura y propiedades mecánicas de los tubos producidos por poliquetos con el fin de entender su funcionamiento para futuros estudios y posibles aplicaciones en la ingeniería.

#### 3.2 Específicos:

- Identificar taxonómicamente las especies de las familias Onuphidae y Sabellidae (Polychaeta), recolectadas para el análisis de sus tubos, de la Reserva Sanguaré, Golfo de Morrosquillo.
- Cuantificar la resistencia mecánica de los tubos de los poliquetos estudiados, mediante ensayos de tensión.
- Identificar la microestructura de los tubos producidos por las especies de las familias Onuphidae y Sabellidae (Polychaeta), mediante microscopía SEM.

### 4 MARCO TEÓRICO:

#### **Poliquetos:**

Los poliquetos son gusanos marinos del phylum Annelida que se encuentran a lo largo de las costas de todos los océanos. Los poliquetos se pueden clasificar en dos grupos, los errantes, los cuales son depredadores, algunos de los cuales construyen tubos muy resistentes aglomerando diferentes materiales, y los sedentarios, algunos de los cuales filtran el agua y construyen el tubo con sedimento suspendido en la columna de agua [7]

Las familias de los poliquetos estudiados, Onuphidae (Errantes) y Sabellidae (Sedentarios), construyen tubos con un adhesivo que ellos mismos producen; [5]

Los poliquetos Onuphidae construyen los tubos en la zona de playa cerca del pasto marino, utilizan diferentes elementos como hojas, raíces, arena, madera para la construcción de sus tubos. Estos tubos se caracterizan por tener mayor diámetro que los Sabellidae. Los Sabellidae se encuentran en zonas de agua tranquila, fácilmente se encuentran en las raíces del mangle. Los tubos están compuestos de adhesivo producido por ellos y sedimento fino. En promedio el diámetro de los tubos de Sabellidae es de 15 milímetros y 200 milímetros de largo. Los tubos de los Onuphidae en promedio miden 250 milímetros, las medidas varían dependiendo de la edad, la especie y el medio en donde se encuentre el poliqueto, cómo se puede evidenciar en la Figura 1.

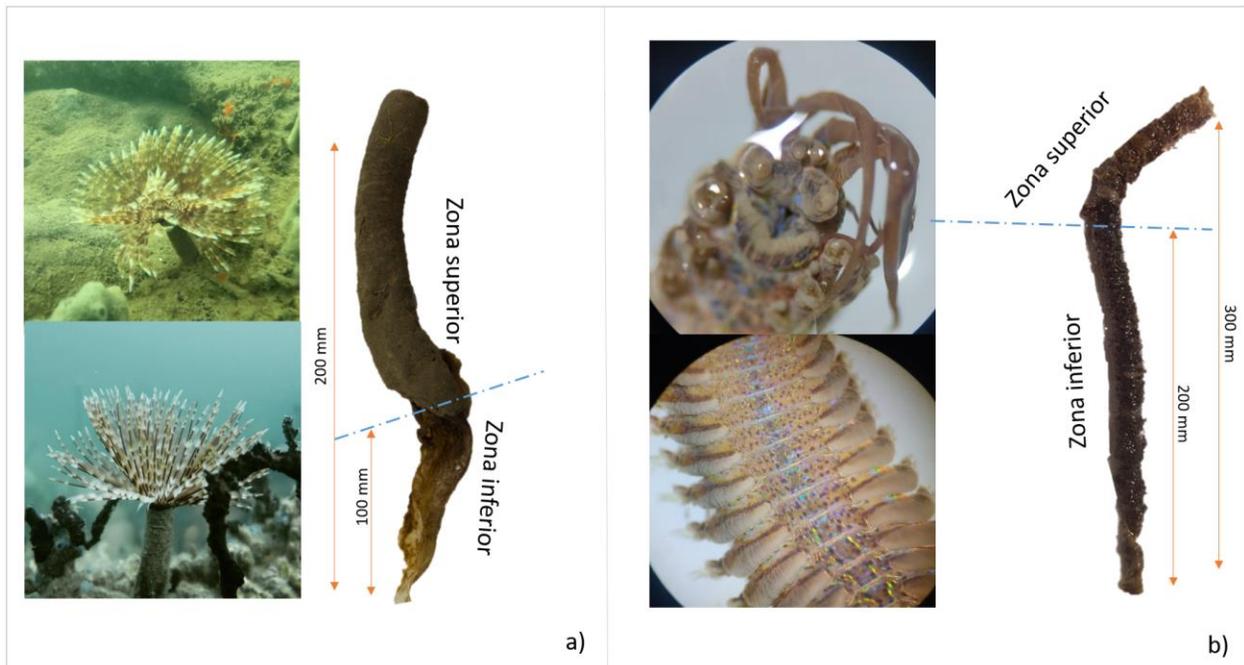


Figura 1. a) Poliqueto de la familia Sabellidae (Izq), Tubo de Sabellidae, zonas y medidas promedio. b) Poliqueto de la familia Onuphidae (Izq), Tubo de Onuphidae, zonas y medidas promedio (Fotografías: Mario H. Londoño)

Las muestras recolectadas se dividirán en dos zonas, para los Onuphidae la zona 1 también llamada como zona superior es la que se encuentra fuera de la arena y la zona 2 o zona inferior es la que se encuentra enterrada en la arena, el tubo de esta familia. Para los Sabellidae la zona superior es la que tiene sedimento fino y la zona inferior es la que está compuesta solo de adhesivo. Los tubos de las familias de poliquetos están compuestos por diferentes materiales, mediante observación se encontró que los tubos de Onuphidae están compuestos por matriz proteica, hojas de pastos

marinos, madera, raíces y arena mientras que los de Sabellidae se componen de sedimento y matriz proteica generada por el gusano.

### **Propiedades mecánicas:**

Las propiedades mecánicas de un material están ligadas a los esfuerzos mecánicos que actúan sobre él y también a las condiciones y características del entorno, estas propiedades permiten clasificar el comportamiento de cada material para conocer en qué se puede aplicar. Hay diferentes propiedades mecánicas como lo es la ductilidad, elasticidad, plasticidad, tenacidad etc. y diferentes tipos de cargas que se pueden aplicar como lo son continuas, estáticas, dinámicas o cíclicas etc.

Las propiedades mecánicas permiten denominar los comportamientos de los materiales a los diferentes esfuerzos que se pueden presentar como los de tensión, compresión, cizalla, pandeo, fatiga y torsión, todos los materiales reaccionan de manera diferente a cada uno de los esfuerzos. Dependiendo de la naturaleza del material, tratamientos térmicos, microestructura las propiedades mecánicas cambiarán. [8]

La elasticidad es una propiedad que se evidencia cuando un material es sometido a cargas las cuales generan cambios en sus dimensiones, pero al retirar estas cargas el material vuelve a sus dimensiones originales. La plasticidad aparece cuando las cargas aplicadas al material son superiores al límite elástico generando cambios en las dimensiones irreversibles generando deformaciones plásticas. La tenacidad es la capacidad de un material de absorber energía antes de llegar a la fractura. La tenacidad se puede separar tanto en la parte plástica como en la elástica.

Uno de los métodos para el cálculo de las propiedades anteriormente mencionadas son los ensayos de tensión. Este tipo de ensayos constan de estirar la pieza hasta la ruptura, estos ensayos son realizados por una máquina que mide el desplazamiento en milímetros y la fuerza en Newtons que ejerce este material a la tracción. Una vez se obtienen estos valores se procesan para calcular el esfuerzo, la deformación, el módulo de Young y la tenacidad. Para calcular el esfuerzo se usa la *Ecuación 1* y para calcular la deformación unitaria se usa la *Ecuación 2*, estas ecuaciones son válidas para calcular la curva de esfuerzo deformación ingenieril.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

Donde:

- $\sigma$ : Esfuerzo o resistencia a la tensión (MPa).
- $F$ : Fuerza aplicada al material. (N)
- $A$ : Área transversal del material ensayado. ( $mm^2$ )
- $\varepsilon$ : Deformación unitaria.
- $L$ : Longitud normal. (mm)
- $L_0$ : Longitud inicial. (mm)

Para aplicar este método el material debe de ser medido previamente al ensayo para calcular el área transversal.

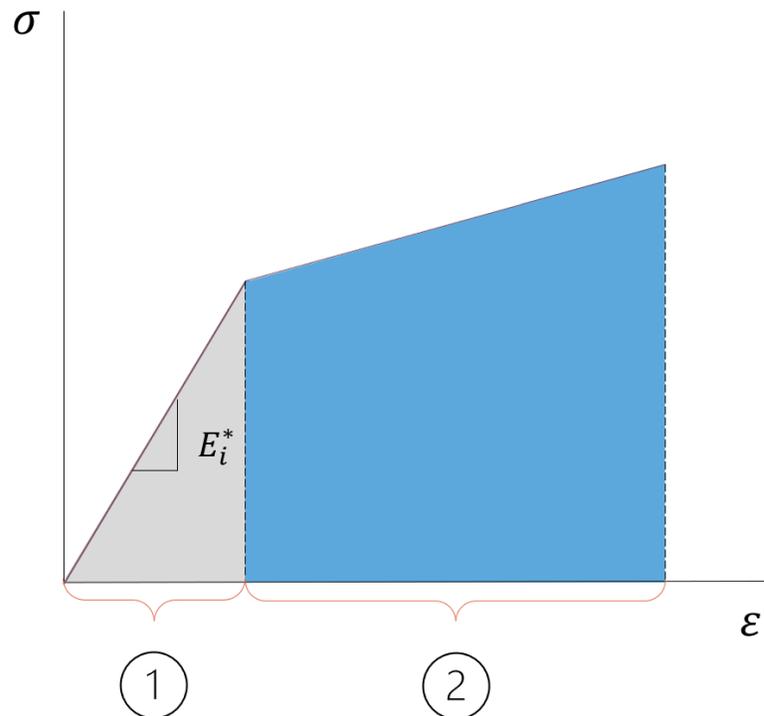


Figura 2. Grafica esquemática de esfuerzo deformación. Zona 1 (Gris): zona elástica, Zona 2 (Azul): zona plástica,  $E$ : Modulo de Young.

El módulo de Young (E) es la tangente de cada punto en la curva de esfuerzo deformación, pero en los materiales que tienen elasticidad se calcula como la pendiente. El módulo de Young es el que cuantifica el valor de la elasticidad y ayuda a comparar que tan elástico es un material con respecto a otros. Para calcularlo se usa la ecuación 3.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Donde:

- $E$ : Módulo de Young.
- $\sigma$ : Esfuerzo (MPa).
- $\varepsilon$ : Deformación unitaria.

La tenacidad se calcula como el área bajo la curva, en la *Figura 1* se pueden evidenciar dos zonas, la elástica y plástica, el área bajo la curva de cada una de estas zonas representan la tenacidad elástica y la tenacidad plástica, la suma de las dos representan la tenacidad total, la energía absorbida antes de que se genere la fractura. Para el cálculo del área bajo la curva se usa la ecuación 4.

$$T = \int \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

Donde:

- $T$ : Tenacidad (Joules)
- $\sigma$ : Esfuerzo (MPa).
- $\varepsilon$ : Deformación unitaria.

Las máquinas de tracción que se usan en laboratorios para la caracterización mecánica de materiales constan de una celda de carga y un motor, el motor mueve una de las mordazas para tensionar la muestra, y se puede medir el desplazamiento, la celda de carga arroja el valor de la fuerza que el material ensayado presenta a la hora de ser tensionado. Estos valores se pueden graficar mostrando la fuerza en función del desplazamiento y mediante el uso de las fórmulas anteriores se puede obtener la deformación y el esfuerzo. Las máquinas para este tipo de ensayo varían desde la capacidad de la celda de carga, el tamaño y la marca.

## 5 ESTADO DEL ARTE:

Los estudios de los poliquetos abarcan desde su biología y clasificación, hasta su papel en el ambiente como indicadores biológicos, dadas sus estrategias de supervivencia [5]. El estudio de los poliquetos ha sido crucial para entender la biodiversidad marina y abrir la posibilidad a nuevos estudios basados en genética, regeneración de tejidos, cambio climático etc.

La biomimética es un estudio el cual usa la naturaleza de modelo, imitando sus diseños y procesos para la resolución de problemas. La naturaleza mediante la evolución sabe que es lo más óptimo y funciona de la mejor manera. De esta manera se pueden encontrar muchos estudios basados en la biomimética que han servido para el avance del hombre en la ciencia y la tecnología. Los aviones son basados en la Aero dinamicidad de las aves, el velcro fue inspirado en una especie de cardos (una planta) que se pegaba en la ropa de las personas, el famoso tren bala inspirado en el pico del ave Martín pescador y así como estos hay muchos más ejemplos.

Actualmente la biomimética se está mezclando con muchas áreas de la ciencia, siendo clave en el desarrollo industrial, de arquitectura, medicina, aeroespacial y artística, entre otros. Muchos de los avances que se han obtenido en la ingeniería son el resultado de unir biología con diferentes áreas del conocimiento. [9]

En el área de los materiales la biomimética es ampliamente estudiada, muchos materiales en la naturaleza tienen propiedades mecánicas interesantes para la ingeniería. Muchos de estos materiales son compuestos, los cuales se destacan por su diseño para afrontar condiciones naturales. La protección ha sido uno de los temas más estudiados, donde los investigadores buscan un material que combine la ligereza y la dureza por este motivo se han inspirado en escamas de peces, caparazones de artrópodos para entender cómo la naturaleza resolvió el problema de armaduras pesadas. El estudio de la escama del pez amazónico arapaima gigas [3] brindó un acercamiento a un material compuesto con alta resistencia pero que permite la movilidad, esto se debe gracias a su microestructura compuesta por láminas a diferentes ángulos.

La motivación de este tipo de estudios es encontrar materiales que combinen propiedades mecánicas para así ser usados en diferentes aplicaciones. Los materiales de ingeniería tienen una

curva de comportamiento en donde las propiedades son inversamente proporcional con otras. Si se desea aumentar una de las propiedades mecánicas se debe perder otras mientras que los materiales biológicos presentan un comportamiento diferente. Por lo tanto, los estudios de materiales biomiméticos se encargan de copiar los parámetros y condiciones que tienen los materiales biológicos para así crear nuevos materiales compuestos con materiales de ingeniería y encontrar propiedades similares. La Figura 3. también conocida como figura de la banana inversa muestra la comparación de las propiedades de tenacidad y elasticidad para materiales biológicos y de ingeniería.

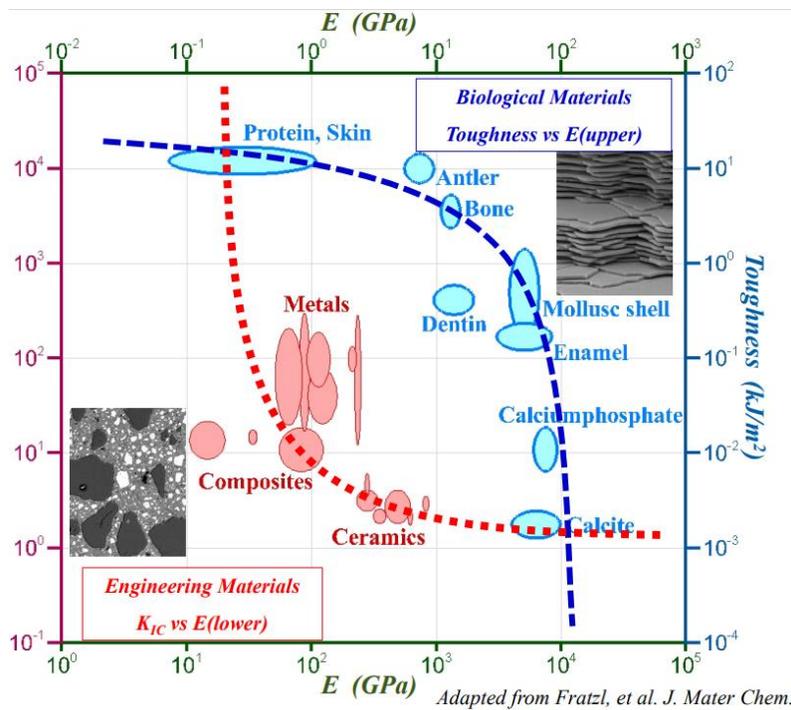


Figura 3. Comparación de tenacidad y elasticidad de materiales de ingeniería con respecto a los materiales biológicos [12]

Debido a la diversidad que se encuentra en los océanos muchos de estos estudios se basan en sistemas que se encuentran en el mar, como estudios de resistencia a corales, caparzones de moluscos y bivalvos, estructura de estrellas de mar.

Pero la biomimética no se queda en lo que el humano puede ver a simple vista, si no que va más allá a mirar la parte micro, con diferentes métodos como la microscopía SEM, a estudiar la microestructura y entender cómo la naturaleza a través de esta ha optimizado sus respuestas a diferentes condiciones de su medio ambiente. Cuando se estudia microscópicamente se pueden encontrar diferentes estructuras jerárquicas, las cuales pueden estar compuestas por fibras, láminas, intersticios organizados con patrones diferentes, cada organización responde a diferentes sollicitaciones recibidas por el material, lo cual genera propiedades mecánicas diferentes en cada caso.

## **6 METODOLOGÍA:**

Para la medición de la resistencia de materiales se deben emplear diferentes métodos dependiendo de lo que se espera medir u obtener. Para este caso se usarán ensayos de tensión para así obtener la resistencia a la tensión de los tubos en unidades de MegaPascales. Basados en algunos resultados previamente obtenidos, los valores de las fuerzas para estas muestras no superan los dos kilogramos. Debido a que se quiere realizar una caracterización mecánica del material se ha buscado realizar las pruebas con las muestras frescas de la manera que no se afecten las propiedades fisicoquímicas del material que compone los tubos. Para transportar los tubos se emplean diferentes métodos de fijación, uno de ellos es alcohol al 70%, los cuales pueden afectar las propiedades mecánicas a nivel molecular, por esta razón se diseñó y construyó una máquina de ensayos portátil para realizar las pruebas una vez se extrae el tubo del poliqueto y así obtener el menor cambio en las propiedades del material por deshidratación o descomposición. Se seleccionó este tipo de alcohol debido a su disponibilidad y costo.

La máquina se construyó primero realizando un diseño preliminar en el programa Inventor, luego se parametrizaron para así definir las medidas y luego construir las piezas. Una vez se tenía la máquina construida se realizó el código de funcionamiento, se recolectaron las muestras y se realizaron las pruebas necesarias para definir las propiedades mecánicas. Ya por último se realizó una microscopía electrónica de barrido para identificar las posibles microestructuras.

### **6.1 Diseño y Construcción máquina para ensayos de tracción:**

El equipo que se ha diseñado está programado para medir la fuerza y el desplazamiento a una velocidad definida por el usuario, la velocidad está definida desde 0,5 mm/min hasta 100 mm/min, Esta máquina es portátil y su aplicación es para materiales que soportan bajas cargas.

La celda de carga utilizada es de 2 kg construida en aluminio con una precisión de 0,1 gramos. La celda de carga va atornillada a la base y una de las mordazas está pegada a la celda de carga. Se debe asegurar que la máquina es completamente rígida para no obtener datos erróneos a la hora de la realización de las pruebas. Por este motivo mediante elementos finitos se ha podido realizar una parametrización y optimización de cada una de las partes para así definir el material y las dimensiones óptimas para las cargas a las que estará operando y que así cumpla los requerimientos planteados para el diseño.

Se realizó la parametrización para cada uno de los elementos individualmente sometiéndolos a las condiciones de frontera que más se asemejen a la realidad, se calcularon los valores de esfuerzo, deformación y el factor de seguridad para corroborar la rigidez de cada uno de los elementos, al final se realizó la simulación del conjunto completo y mirar las zonas más críticas. Se ha definido que lo ideal es que las deformaciones generadas a las partes de la máquina no superen un diezmilésimo de milímetro.

Para la construcción de la máquina primero se hizo un estudio de las maquinas que se encuentran en el mercado, una vez se entendió el funcionamiento se dibujó un CAD en el programa inventor y mediante parametrización se calcularon las medidas para construcción de las partes. La parametrización permite variar las dimensiones de las partes diseñadas y calcular los diferentes esfuerzos y deformaciones para cada uno de estos valores, lo que nos ayuda a escoger medidas en donde la deformación de las partes de la máquina será despreciable, las deformaciones de las piezas se definieron menores a un diezmilésimo de milímetro para definir la rigidez del sistema. La máquina diseñada consta de una base donde estará todo el sistema montado, dos guías por donde se moverá un soporte móvil el cual sostiene una de las mordazas y estas sostenidas por un soporte fijo superior, un tornillo sin

fin el cual transmite la potencia del motor, una base para el motor con sus respectivas guías y la celda de carga. Figura 4

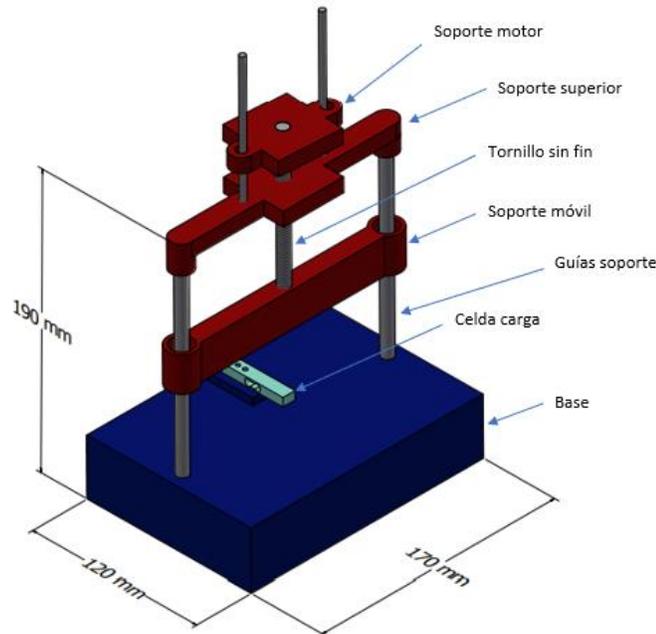


Figura 4. Esquema del diseño máquina para realizar los ensayos de tracción.

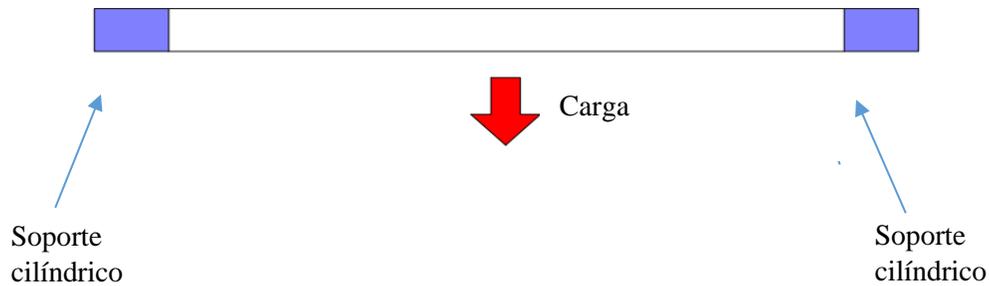
La máquina se diseñó para cargas de aproximadamente dos kilogramos, este valor fue definido mediante pruebas realizadas a tubos de poliquetos en laboratorio, se usó un factor de seguridad de dos y se aseguró que los valores de deformación de cada una de las piezas a la máxima carga no superaran un diezmilésimo de milímetro. El material seleccionado para la construcción fue el aluminio debido a su bajo peso y buena resistencia. Se seleccionó un aluminio 6061 el cual es comercial; este aluminio tiene una resistencia a la tensión de 310 MPa con un esfuerzo de fluencia de 276 MPa según el fabricante.

## 6.2 Parametrización:

### 6.2.1 Parametrización Guías soporte:

Para la parametrización de las guías que sostienen el soporte el parámetro definido fue el diámetro de las guías, las otras dimensiones están restringidas por montaje, estas guías comercialmente se encuentran por lo general de acero al carbono y de

diferentes diámetros, los cuales se parametrizaran para definir el diámetro que mejor se acople a la necesidad. El acero al carbono utilizado en la construcción de estas guías tiene un esfuerzo de fluencia de 250 MPa aproximadamente, la idea es que este valor no se supere y las deformaciones se mantengan por debajo de un diezmilésimo de milímetro.



*Figura 5. Condiciones de frontera parametrización.*

Para realizar la simulación se obtiene un mallado con elementos hexaédricos, para esta pieza se obtuvo 17500 elementos, las condiciones de frontera definidas fueron los soportes cilíndricos en los extremos donde estas guías se sujetaron y una carga de 20 N en la mitad donde se considera es el punto más crítico, se definió este valor de carga debido a que la carga se distribuye en los dos ejes y la carga total es de 40 N. El parámetro como se definió anteriormente es el diámetro, se buscaron las guías que podrían funcionar de manera comercial, su material y las dimensiones generales, se encontraron guías de acero las cuales son muy usadas en la construcción de impresoras 3D y los diámetros encontrados van desde los 3 mm hasta los 12 mm, se realizó una parametrización de como varían las deformaciones y los esfuerzos variando el diámetro. Los parámetros de salida definidos fueron el valor máximo de esfuerzo, deformación y se calculó el factor de seguridad, luego de tener los resultados se grafican y se obtiene cual es el mejor diámetro que cumple con la necesidad planteada.

### 6.2.2 Parametrización soporte móvil:

Para la parametrización el soporte móvil se definió como parámetros el espesor, la altura y el material, para así definir el material óptimo que no nos afecte en los resultados y sus dimensiones. Para el material se realizaron tres parametrizaciones con acero, aluminio y nylon. Se ha descartado el acero debido a su peso y el nylon tuvo deformaciones superiores al diezmilésimo de milímetro por lo tanto se optó por el aluminio.

Esta pieza es donde estarán las mordazas que tomarán la muestra y estirarán hasta la ruptura. Esta pieza no puede tener deformaciones superiores al diezmilésimo de milímetro como se ha mencionado debido a que nos daría información falsa en cuanto a la deformación por ende debe ser rígida y no se debe afectar a las cargas a las que se estará sometido.

Las condiciones de frontera para esta pieza se definen dónde van los rodamientos que van sobre los ejes principales (sombreado rojo) y donde estarán las mordazas se puso la carga para simular un ensayo real (sombreado azul). La carga simulada es de 40 N, la cual es el doble del máximo que se espera en los ensayos considerando el factor de seguridad.

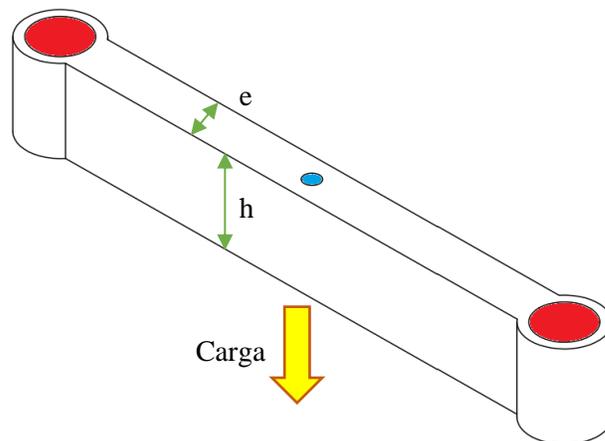


Figura 6. Soporte móvil, dimensiones y condiciones de frontera. *e*: espesor, *h*: altura.

Para definir cuál era la dimensión más influyente en el diseño se ha comparado el espesor y la altura a tres parámetros diferentes los cuales son la deformación máxima y los valores de esfuerzo deformación equivalentes. Figura 7



Figura 7. Parámetros en función de variables guía móvil

Lo que nos indica la *Figura 7* es que la variable más importante en el estudio es la altura.

Por lo tanto, se han analizado diferentes valores de la altura para ver cómo varía con respecto a los tres parámetros diferentes, se ha encontrado que la altura óptima para la construcción de esta pieza son valores mayores a 10 milímetros. *Figura 8*.

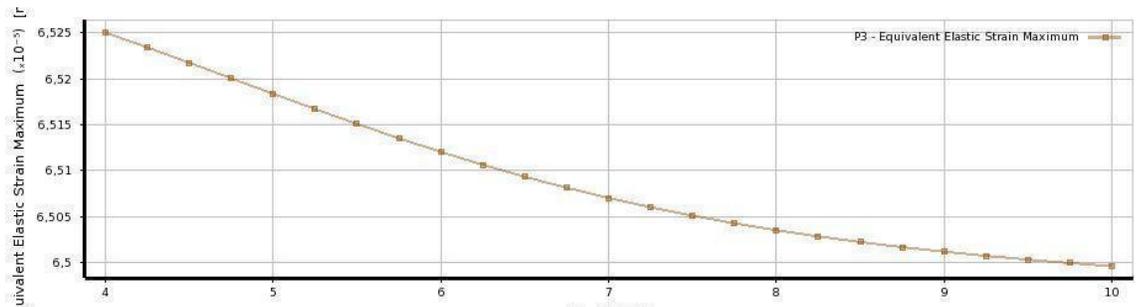


Figura 8. Deformación elástica vs Parámetro altura

### 6.2.3 Parametrización soporte fijo:

Para la parametrización el soporte fijo se definió como parámetros el espesor, la altura y el material. Para el material se realizaron tres parametrizaciones con acero, aluminio y nylon. Se ha descartado el acero debido a su peso y dureza y el nylon

tuvo deformaciones superiores al diezmilésimo de milímetro por lo tanto se optó por el aluminio.

Por esta pieza es donde pasará el tornillo sin fin y sostendrá las guías por donde se mueve el soporte móvil. Las condiciones de frontera se han colocado en los agujeros donde van los ejes guías y la carga en el centro por donde pasa el tornillo sin fin.

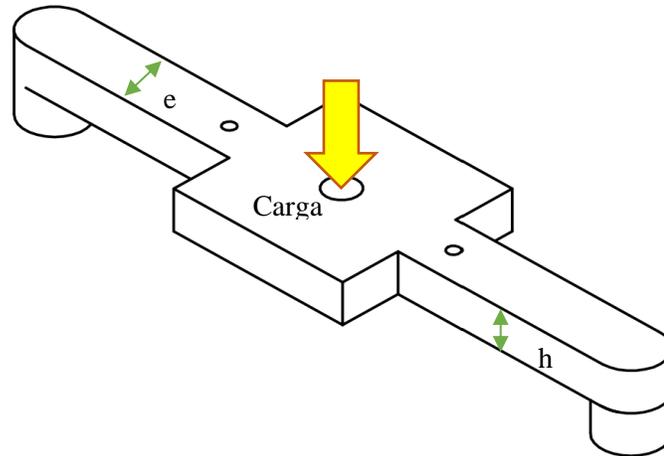


Figura 9. Soporte Fijo, dimensiones y condiciones de frontera. e: espesor, h: altura.

Para definir cuál era la dimensión más influyente en el diseño se ha comparado el espesor y la altura a tres parámetros diferentes los cuales son la deformación máxima y los valores de esfuerzo deformación equivalentes. Pero en este caso se tomará en cuenta la deformación máxima escogiendo la altura como variable principal.

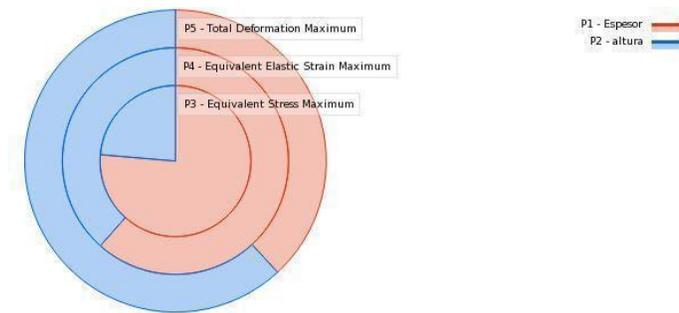
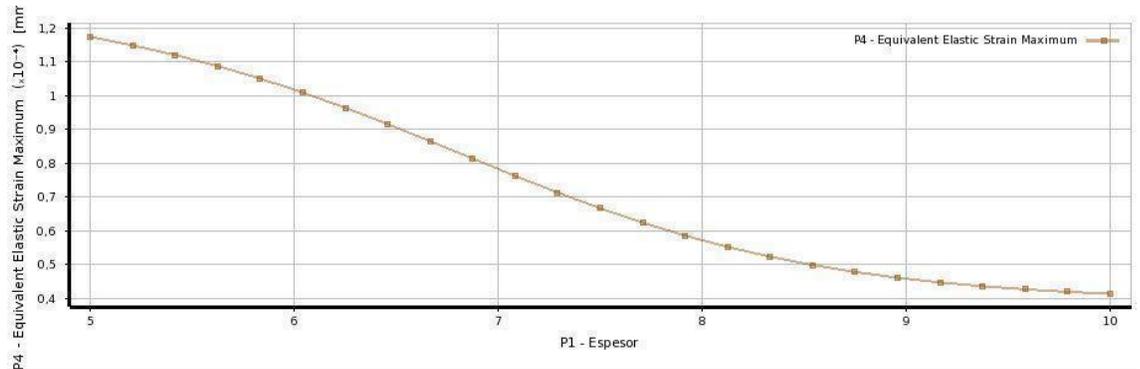


Figura 10. Parámetros en función de variables Soporte superior.

Por lo tanto, se han tomado diferentes valores de la altura para ver cómo varía con respecto a los tres parámetros diferentes, se ha encontrado que la altura óptima para la construcción de esta pieza son valores mayores a 10 milímetros. *Figura 11.*



*Figura 11. Deformación elástica vs Parámetro altura*

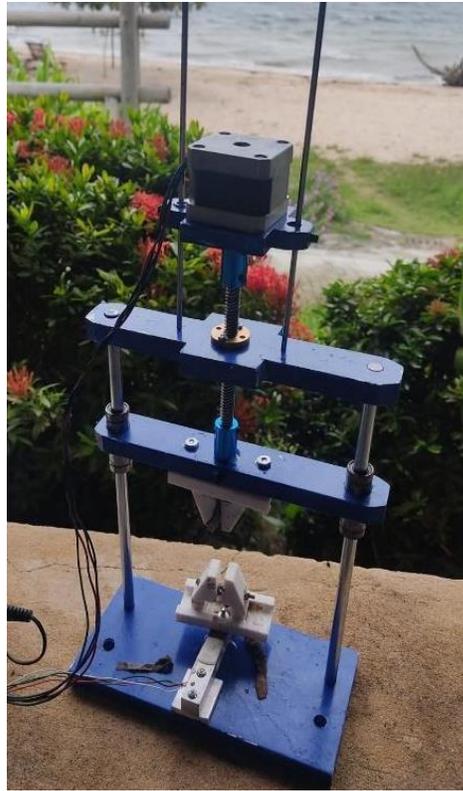
Una vez parametrizadas las piezas se construyen mediante mecanizado convencional.

### 6.3 Partes comerciales:

En la construcción de la máquina se usaron diferentes partes comerciales como la tornillería, el motor, los ejes, la celda de carga y los rodamientos. El motor seleccionado debía tener un torque superior a 20 N, las dimensiones de los ejes se definieron mediante parametrización por lo tanto se buscó el eje comercial igual o superior.

*Tabla 1. Partes Comerciales.*

No	Item	Referencia
1	Motor	42HS3404A4 Two-Phase Stepper Motor 0.4A 28N.cm
1	varilla soporte	Varilla lisa de 8mm
1	espiga trapezoidal	Varilla trapezoidal roscada M8, con paso de 2mm
1	Tuerca T8	Tuerca T8 2x8mm para Varilla trapezoidal 4 hilos
2	Rodamiento lineal 3 mm	Comercial
2	Rodamiento lineal 8mm	Comercial
1	Arduino	Arduino Uno
1	celda carga	Celda de carga de 2 kg
1	acople	Acople eje de 8 mm a 3 mm
1	Driver celda carga	Hx711
1	Driver motor	a4988



*Figura 12. Máquina construida.*

Las mordazas diseñadas para la máquina fueron manufacturadas mediante impresión 3D, se usó PLA como material con un relleno del 100%. Las mordazas se ajustan usando tornillos en cada extremo. Para el diseño y construcción de las mordazas se realizaron las simulaciones y parametrizaciones respectivas, las deformaciones obtenidas en las mordazas son menores al diezmilésimo de milímetro cumpliendo con la rigidez del sistema.

#### **6.4 Control:**

Para el manejo de la máquina se tiene una caja de control con dos botones de dos posiciones y uno de tres; uno de los botones energiza el sistema, otro da la señal para empezar el ensayo y el de tres posiciones dependiendo la posición hace girar el motor para subir o bajar la mordaza. El sistema está energizado mediante 12 voltios para el motor y 5 voltios para el Arduino. En la parte posterior se encuentran unos conectores

impermeables que transmiten la señal del motor y de la celda de carga al Arduino. Las señales emitidas por la celda de carga son análogas y las del motor son digitales.

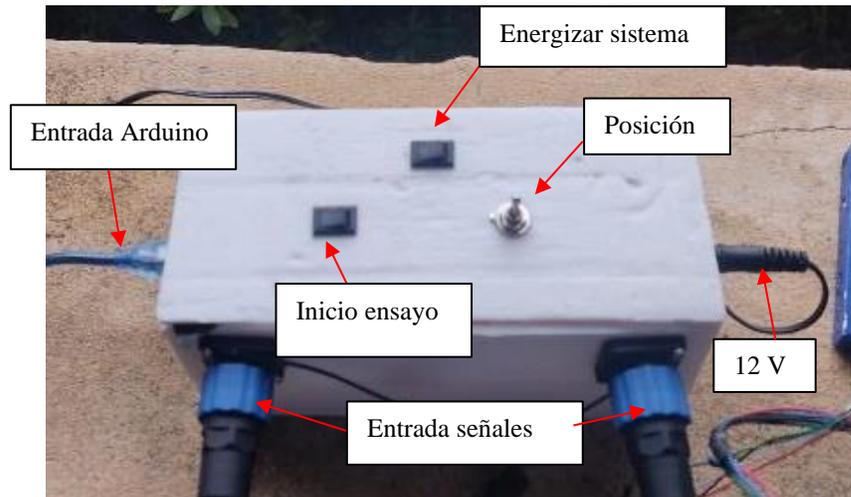


Figura 13. Caja de control Maquina.

Para la parte de control de la máquina se usó un Arduino uno con un controlador para el motor de referencia a4988 y un controlador para la celda de carga de referencia HX711, se realizaron las conexiones como se muestran en la Figura 14 y Figura 15.

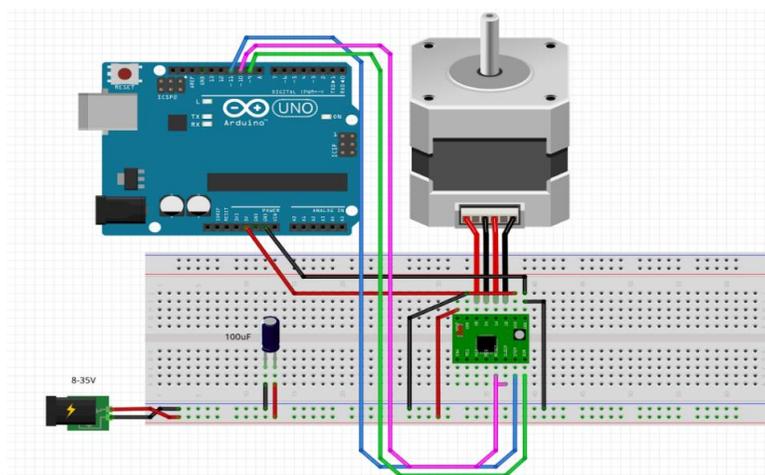


Figura 14. Conexión a Arduino del motor usando controlador a4988.

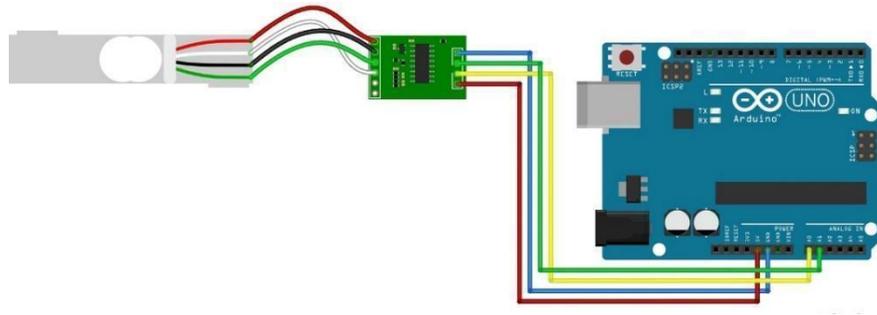


Figura 15. Conexión de la celda de carga a Arduino usando controlador HX711.

Para el manejo y control de la maquina se dispone de dos códigos, el primero para calibrar la celda de carga y el segundo para la realización del ensayo y la toma de datos. Para la calibración de la celda de carga se debe tener un peso conocido el cual se usó un peso de 1 kilogramo, 530 gramos y 50 gramos, los cuales eran los pesos calibrados disponibles, este peso se pone sobre la celda lo cual arroja un valor constante y usando la Formula 5 se puede hallar la constante de calibración de la celda de carga. Esta escala se adiciona al código 2 y así ya se puede obtener el valor real en gramos de la celda de carga.

$$Escala = \frac{Valor\ lectura}{Peso\ real} \quad (5)$$

#### 6.4.1 Código calibración de la celda de carga:

Primero se debe tarar la celda de carga con los pesos conocidos y así obtener la constante de calibración.

```
#include "HX711.h"
const int DOUT=A1;
const int CLK=A0;

HX711 balanza(A1, A0);
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Lectura del valor del ADC:\t");
  Serial.println(balanza.read());
  Serial.println("No ponga ningún objeto sobre la balanza");
  Serial.println("Destarando...");
  balanza.set_scale(); //La escala por defecto es 1
  balanza.tare(10); //El peso actual es considerado Tara.
  Serial.println("Coloque un peso conocido:");
}

void loop() {

  Serial.print("Valor de lectura: t");
  Serial.println(balanza.get_value(1),3);
  delay(100);
}
```

#### 6.4.2 Código para manejo de la máquina:

Primero se nombran las variables, se configura el motor, la celda de carga, la velocidad del ensayo y se hace un tarado de la celda de carga. Ya por último se establece la escala con los valores obtenidos del código anterior. Para el cálculo de la velocidad del ensayo se usó la Fórmula 6.

$$Delay = \frac{a * b}{V * 2} * 1000 \quad (6)$$

Siendo:

- a : Un paso en milímetros (0,04 mm)
- b : Conversión de minutos a segundos (60)
- V : Velocidad a la que se desea el ensayo (mm/min)

- El valor de 2 es debido a que el motor necesita dos delay para realizar un paso y el de 1000 para convertir el resultado en milisegundos.

```
#include "HX711.h"
const int dirPin = 8;
const int stepPin = 10;
int ContSteps = 0;
const int steps = 200;
int stepDelay = 58.96;
int stepDelayP = 1;
const int Start = 7;
const int Up = 6;
const int Down = 5;
const int DOUT=A1;
const int CLK=A0;
double grams;
HX711 Celda(DOUT,CLK);

void setup() {
  // Config Motor
  pinMode(dirPin, OUTPUT);
  pinMode(stepPin, OUTPUT);
  digitalWrite(dirPin, HIGH);
  pinMode(Start, INPUT);
  Serial.begin(9600); // open the serial port at 9600 bps:
  pinMode(Up, INPUT);
  pinMode(Down, INPUT);

  // Config Celda carga
  //Celda.begin(DOUT, CLK);
  Serial.print("Lectura del valor del ADC: ");
  Serial.println(Celda.read());
  Serial.println("No ponga ningun objeto sobre la Celda");
  Serial.println("Destarando...");
  Serial.println("...");
  Celda.set_scale(437400); // Establecemos la escala
  Celda.tare(10); //El peso actual es considerado Tara.

  Serial.println("Listo para pesar");
}
```

Una vez se tienen listas las variables y la celda de carga está lista para medir se tiene la parte de control del motor con los botones y de toma de datos. En esta parte del código se definen los sentidos de giro del motor en función a cada botón.

```
void loop() {
if ((digitalRead(Up)==LOW|| digitalRead(Down)==LOW) && digitalRead(Start)==HIGH ){
  if (digitalRead(Up)== LOW){
    digitalWrite(dirPin, HIGH);
  }
  else {
    digitalWrite(dirPin, LOW);
  }
  digitalWrite(stepPin, HIGH);
  delay(stepDelayP);
  digitalWrite(stepPin, LOW);
  delay(stepDelayP);
}

if (digitalRead (Start)== LOW && (digitalRead(Up)==HIGH|| digitalRead(Down)==HIGH) ){
  digitalWrite (dirPin, HIGH);
  digitalWrite (stepPin, HIGH);
  delay(stepDelay);
  digitalWrite (stepPin, LOW);
  delay(stepDelay);

  if (Celda.is_ready()){
    grams=1000*Celda.get_units_direct();
  }
  Serial.print(ContSteps);
  Serial.print(',');
  Serial.println(grams);
  ContSteps++;
  // delay(stepDelay);
}
else ContSteps=0;
```

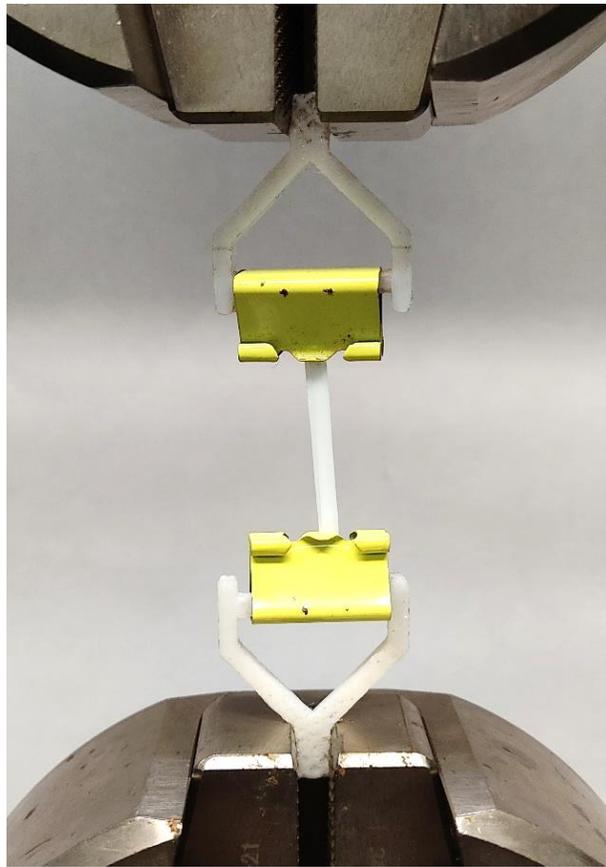
Para la toma de los datos en tiempo real se hace uso de la última versión de Excel la cual tiene un complemento para transmitir datos en tiempo real desde el Arduino. Con la última parte del código anterior se puede llamar las variables a Excel de la fuerza medida por la celda de carga y los pasos dados por el motor para obtener el desplazamiento al mismo tiempo se realiza el ensayo, graficando en tiempo real el ensayo.

### 6.5 Calibración:

Para la calibración de la máquina diseñada se ha usado de referencia una máquina de ensayos universal modelo Shimadzu AGX Series. Las probetas usadas para la calibración son de poliuretano con unas dimensiones de 0,7 milímetros de ancho por 2

milímetros de espesor. Se buscó que el material fuera lo más homogéneo y que sus valores no variaran. Para así tener una calibración constante.

Para la calibración se construyeron dos sistemas de agarre que van acoplados a las mordazas los cuales permiten estirar mejor la muestra. Fueron construidos con impresión 3D asegurando la rigidez y se usaron clips de papel comerciales.



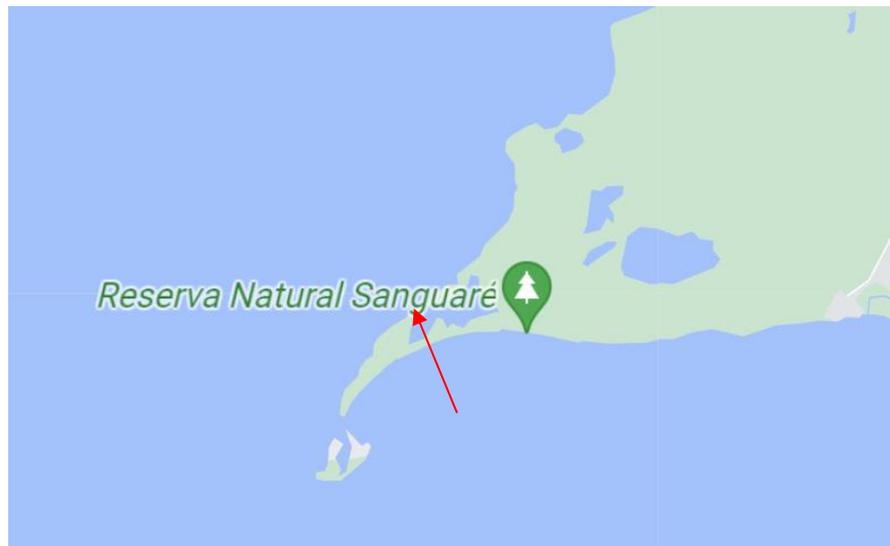
*Figura 17. Mordazas para calibración.*

## **6.6 Identificación Taxonómica**

Los organismos recolectados se identificaron utilizando la guía De Leon Gonzalez *et al.* (2021). [11]

### 6.7 Recolección muestras:

Se realizó una salida de campo a la reserva natural Sanguaré en el golfo de Morrosquillo, en el departamento de Sucre corregimiento de berrugas, para recolectar muestras de las dos especies de poliquetos. Los Sabellidae se recolectan en la raíz del mangle, estos se recolectan en la laguna que se muestra en el *Figura 18* para extraerlos se usan guantes y se retira el tubo de manera manual, la profundidad a la que se encuentran va desde los 30 cm hasta los 2 m. Los Onuphidae se recolectan en la zona de playa en el borde donde inician los pastos marinos, se pueden encontrar desde los 50 cm hasta los 2 m. Para la extracción de las muestras se usa un nucleador de sedimentos el cual mediante un vacío extrae la columna de arena que contiene el tubo del poliqueto.

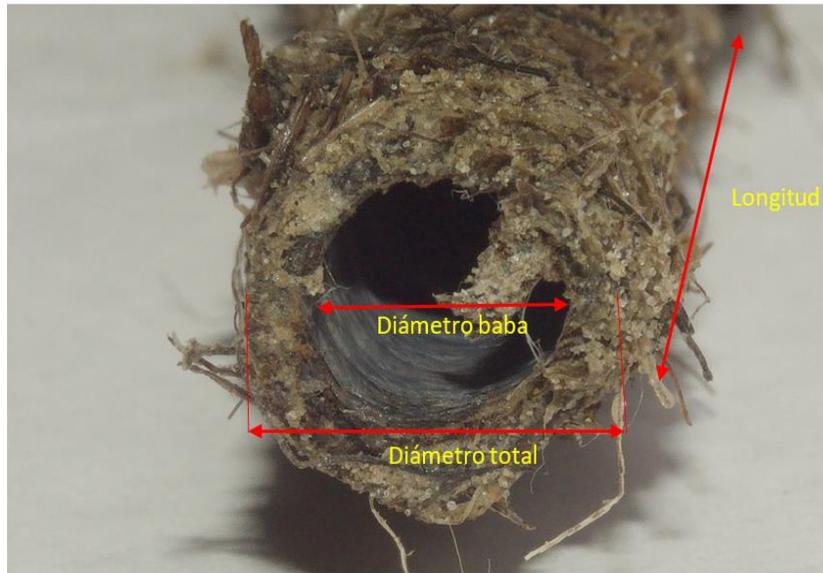


*Figura 18. Mapa de zona de recolección de muestras.*

Se recolectaron aproximadamente 20 tubos de Onuphidae y 20 de Sabellidae, los cuales se les realizaron las pruebas en sitio y algunas se fijaron en alcohol al 70% para realizar ensayos y poder comparar la afectación en las propiedades mecánicas por el método de fijación.

### 6.8 Medición:

Para la medición de los tubos, se ha usado un calibrador, se toman en cuenta las medidas del largo, el diámetro externo y diámetro interno *Figura 19*. Para los ensayos se usó una longitud calibrada de 15 mm, por lo tanto, las muestras se cortaron a 55 mm para tener 20 mm de agarre a cada lado.



*Figura 19. Dimensiones generales.*

Para la medición del área transversal, se ha medido el área total del tubo y se le restó el área interna. Las muestras que se llevaron a la universidad se transportaron en alcohol al 70%, para evitar que se degradaran.

## 7 RESULTADOS

Una vez realizados los ensayos en sitio como en el laboratorio, se ha calculado el valor del esfuerzo, la deformación y la tenacidad para así poder comparar los datos y las curvas obtenidas y así entender las propiedades mecánicas de los tubos de los poliquetos.

Para la cuantificación de las variables planteadas se usaron las ecuaciones anteriormente planteadas. Como se ha mencionado los tubos se han dividido en dos secciones, la parte superior e

inferior, esto se ha realizado debido a que se encontró una variación en la estructura en cada una de estas zonas, lo que podría suponer una variación en las propiedades.

Los resultados se organizan por especie comparando las zonas del tubo y la variación de las propiedades mecánicas al emplear un método de fijación. Además, se muestran las diferentes combinaciones para comparar las propiedades mecánicas de cada uno de los tubos y sus respectivas secciones.

Primero se analizarán los resultados de calibración de la máquina portátil para realizar ensayos en campo.

### **7.1 Calibración máquina de ensayos de tracción:**

Como se explicó anteriormente, se buscó un material homogéneo para realizar la calibración, se realizaron alrededor de 10 ensayos a una velocidad de 3 mm/min por cada máquina. La longitud calibrada empleada para todos los ensayos fue de 15 milímetros. Para estos ensayos se usaron las mordazas especificadas anteriormente *Figura 17*. La medida del área transversal de las probetas usadas fue de  $1,4 \text{ mm}^2$ . Los ensayos de la máquina portátil como los de la máquina base se promediaron y compararon. Los ensayos fueron realizados de las dos máquinas fueron realizados a la par para así evitar factores ambientales como la temperatura y la humedad relativa, luego de cada ensayo la celda de carga era calibrada con los pesos conocidos para así evitar errores.

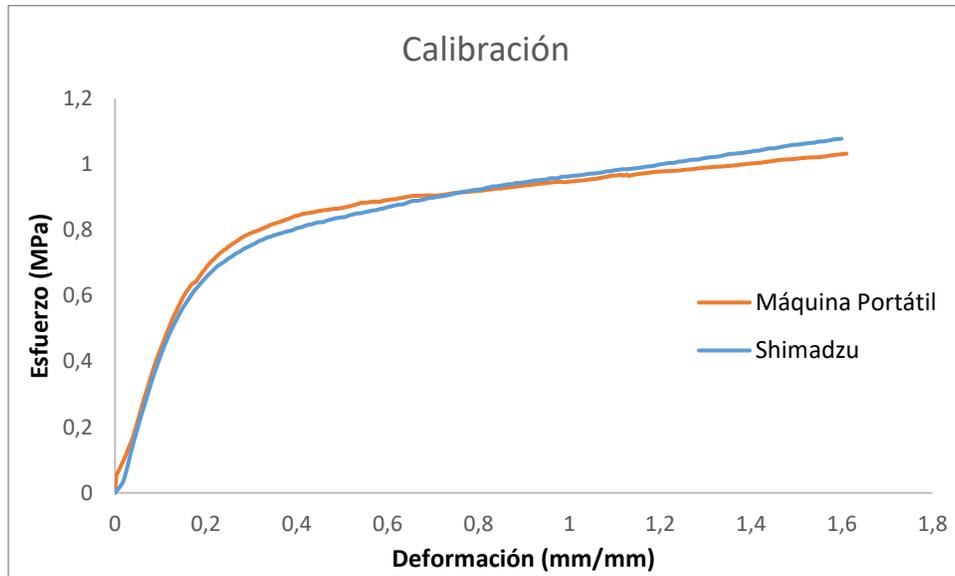


Figura 20. Calibración máquina portátil.

La precisión obtenida en los ensayos realizados con la máquina Shimadzu ADX con respecto a la portátil es del 96% en la zona elástica y del 79% para la parte plástica.

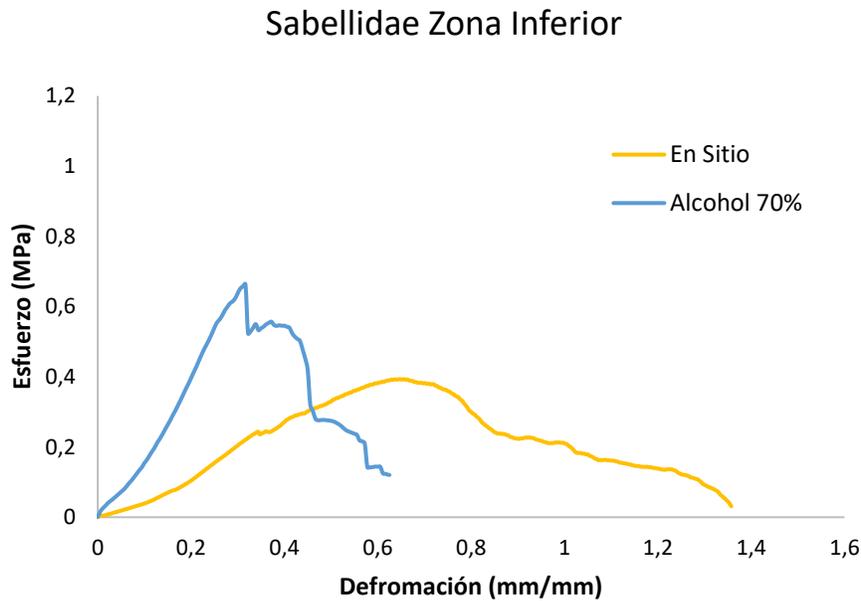
## 7.2 Resultados por familia de poliquetos y zona del tubo

Primero se realizará el análisis para cada una de las especies y de cada una de las zonas de los tubos. Se comparó cómo varían los valores de las propiedades mecánicas de las muestras secas y fijadas en alcohol al 70%. Para cada una de las zonas del tubo se realizaron 6 ensayos de muestras en sitio y otras 6 fijadas. Las gráficas mostradas a continuación son de ensayos realizados para así mostrar el comportamiento de cada una de las muestras.

### 7.2.1 Sabellidae:

Cómo se mencionó anteriormente los tubos de los Sabellidae están compuestos por una zona inferior y una zona superior, la superior está compuesta por adhesivo y sedimento, la zona inferior solo está compuesta por adhesivo. Las medidas generales de los tubos son muy variables, se pueden encontrar tubos que van desde milímetros hasta más de 30 centímetros. Los ensayos realizados fueron a una velocidad de 3 mm/min con una longitud calibrada de 15 milímetros.

Todos los ensayos fueron llevados hasta la fractura para así conocer su comportamiento elástico, plástico y a la ruptura. Se calculó la pendiente elástica y el área de la parte plástica para así conocer los valores del módulo de Young y la tenacidad. En la Figura 21 se puede evidenciar el comportamiento para una muestra de la zona inferior del tubo fijada en alcohol y fresca.



*Figura 21. Sabellidae Inferior en sitio y fijo en alcohol.*

Como se puede evidenciar en la Figura 21 aunque son muestras de la misma zona del tubo se tienen comportamientos diferentes, estas diferencias se pueden atribuir al método de fijación empleado. Cuando las muestras son frescas tienen mayores deformaciones, mayor tenacidad, aunque un menor módulo de Young en comparación con las muestras que se han fijado. La fijación genera un aumento en la resistencia elástica del material, pero una disminución en la deformación.

El módulo de Young que se obtuvo en promedio con los ensayos realizados en sitio fue de 0,59 MPa con una tenacidad de 0,15 Joules y de las muestras fijas en alcohol fue de 1,51 MPa con una tenacidad de 0,09 Joules.

Para la zona superior se obtuvo un comportamiento similar al de la zona inferior, el método de fijación afecto el comportamiento mecánico de las muestras. Las muestras estudiadas en campo tienen mayor deformación, la diferencia entre las deformaciones unitarias es de 0,6, aunque menor módulo de elasticidad, la diferencia en los valores de elasticidad es de 0,44.

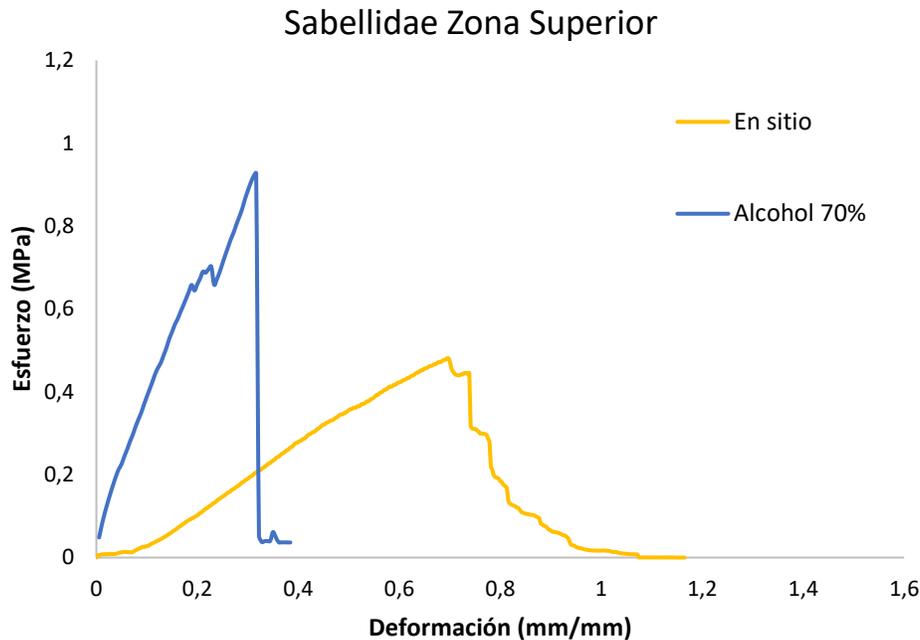


Figura 22. Sabellidae Superior en sitio y fijo en alcohol.

Los ensayos realizados en la zona superior de los Sabellidae arrojaron un valor promedio de módulo de elasticidad de 0,68 MPa con una tenacidad de 0,09 Joules para las muestras en sitio y las muestras fijadas en alcohol se obtuvo un valor de 2,09 MPa y una tenacidad de 0,05 Joules. En la Figura 23 se evidencia como es la fractura del tubo de la familia Sabellidae.



*Figura 23. Falla muestra Sabellidae.*

### **7.2.2 Onuphidae:**

Los tubos de los Onuphidae son los que se encuentran en la zona de pastos marinos y están compuestos por material que los poliquetos organizan alrededor del tubo, usando madera, hojas, raíces etc. Así como con los Sabellidae se pueden encontrar de diferentes tamaños. La velocidad de los ensayos fue de 3 mm/min con una longitud calibrada de 15 milímetros.

Todos los ensayos fueron llevados hasta la fractura para así conocer su comportamiento elástico, plástico y comportamiento a la ruptura. Se calculó la pendiente elástica y el área de la parte plástica para así conocer los valores del módulo de Young y la tenacidad. En la Figura 25 se puede evidenciar el comportamiento para una muestra de la zona inferior del tubo fijada en alcohol y fresca. Y así comprender si el método de fijación afecta en las propiedades mecánicas.

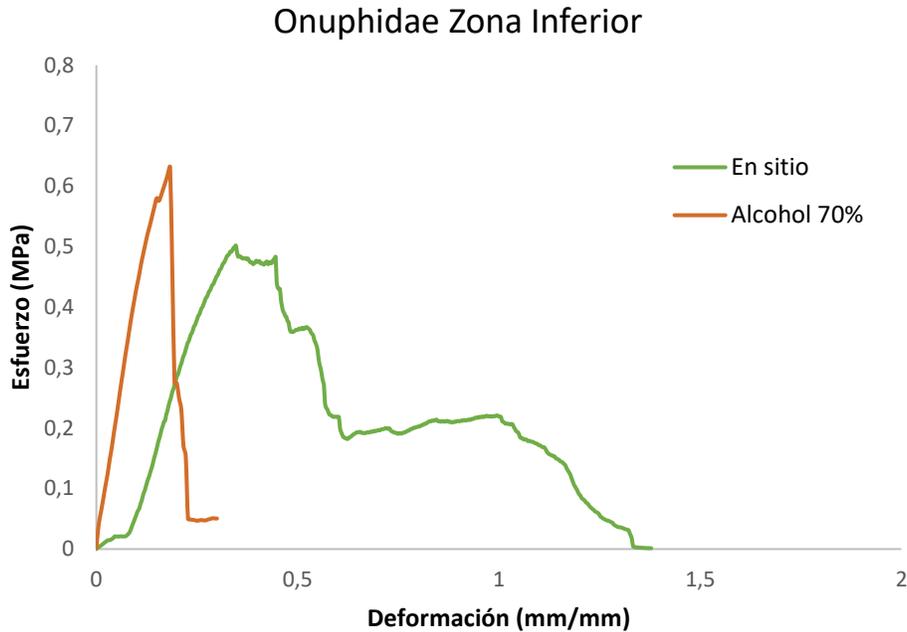
La parte superior e inferior del tubo de los Onuphidae tiene algunas diferencias, la parte inferior está compuesta en su mayoría por arena y raíces. Esta parte que está enterrada es mucho más compacta que la parte superior. La parte que sobre sale del suelo marino contiene elementos más grandes como hojas de pasto marino,

partículas de madera, algas etc. Pero un detalle que tienen en común estas dos zonas es el patrón de construcción que posee el Onuphidae, este tipo de poliqueto construye el tubo a un ángulo en promedio de 50 grados con respecto al eje del tubo *Figura 24.*

Mediante observación se definió que este ángulo permite aumentar la resistencia a la tensión sin afectar mucho en la ductilidad, los elementos añadidos como hojas, raíces y algas funcionan como fibras para aumentar la resistencia del material. Otro aspecto importante en la construcción del tubo es que las hojas y elementos parecidos a laminas se pegan de manera perpendicular al tubo lo que le brinda resistencia a la compresión. La mezcla de el ángulo de construcción y laminas perpendiculares brindan un equilibrio en resistencia a la tensión y compresión sin sacrificar la ductilidad.



*Figura 24. Patrón construcción Onuphidae.*



*Figura 25. Onuphidae Inferior en sitio y alcohol.*

La muestra la cual fue fijada en alcohol tiene un mayor modulo elástico que la prueba realizada en sitio, el ensayo realizado en sitio obtuvo una mayor deformación y tenacidad. Los valores del módulo de elasticidad obtenido para la muestra en sitio fueron de 1,73 MPa y una tenacidad de 0,09 Joules. Para la muestra en alcohol se obtuvo un módulo de elasticidad de 2,39 MPa con una tenacidad de 0,05 Joules. Los que nos brinda una variación del 57% en la resistencia de los ensayos.

Para la parte superior del tubo de los Onuphidae se obtuvo un comportamiento similar al de la zona inferior, los ensayos realizados en sitio obtuvieron una deformación mayor que los fijados en alcohol.

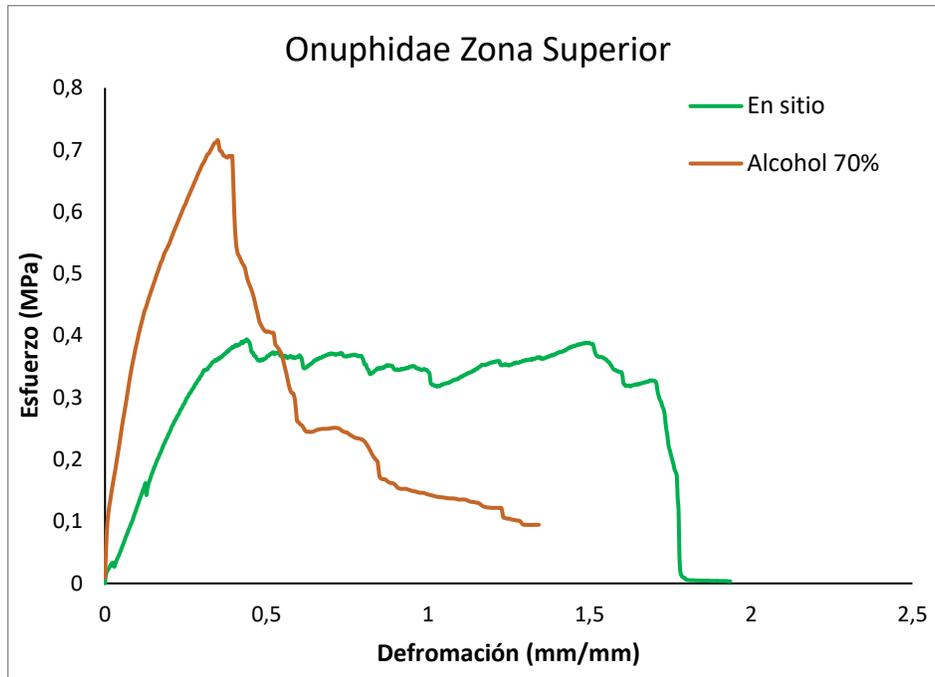


Figura 26. *Onuphidae Superior en sitio y alcohol.*

Para los ensayos realizados en la zona superior de los *Onuphidae* en sitio se obtuvo un valor promedio de 0,84 MPa y una tenacidad de 0,12 Joules y para las muestras fijadas en alcohol se obtuvo un valor de 1,64 MPa y una tenacidad de 0,11 Joules. Lo que nos muestra la variación de las propiedades debido al método de fijación.

Para el ensayo realizado en sitio se puede evidenciar como falla la muestra, primero se empiezan a soltar y reventar las fibras o elementos que tiene adicionado el tubo y de último se rompe el tubo interno construido de adhesivo, *Figura 27*, para las muestras fijadas sucede lo mismo, aunque con valores diferentes. Adicionalmente se puede observar que la fractura de la muestra se da al mismo ángulo con el que se construyó el tubo.



*Figura 27. Falla muestra de Onuphidae.*

### **7.3 Comparaciones:**

Se comparan los tubos construidos por Sabellidae y Onuphidae, para así entender el comportamiento mecánico de los tubos y de cada una de sus zonas. Al realizar estas comparaciones podemos encontrar similitudes o diferencias que nos podrían dar una idea de la razón de ser de los tubos. Se compara la parte elástica promedio de cada una de las zonas y además su tenacidad. Las gráficas de barras están normalizadas al valor más alto.

#### **7.3.1 Sabellidae Zona superior con inferior**

Primero se realiza una comparación entre la parte superior e inferior del tubo construido por Sabellidae. Se puede observar que la parte superior tiene una forma parecida a la parte inferior, pero la parte inferior tiene mayor módulo elástico en las muestras realizadas in situ debido a lo compacto de la muestra, en las muestras fijadas la parte superior tiene mayor módulo elástico.

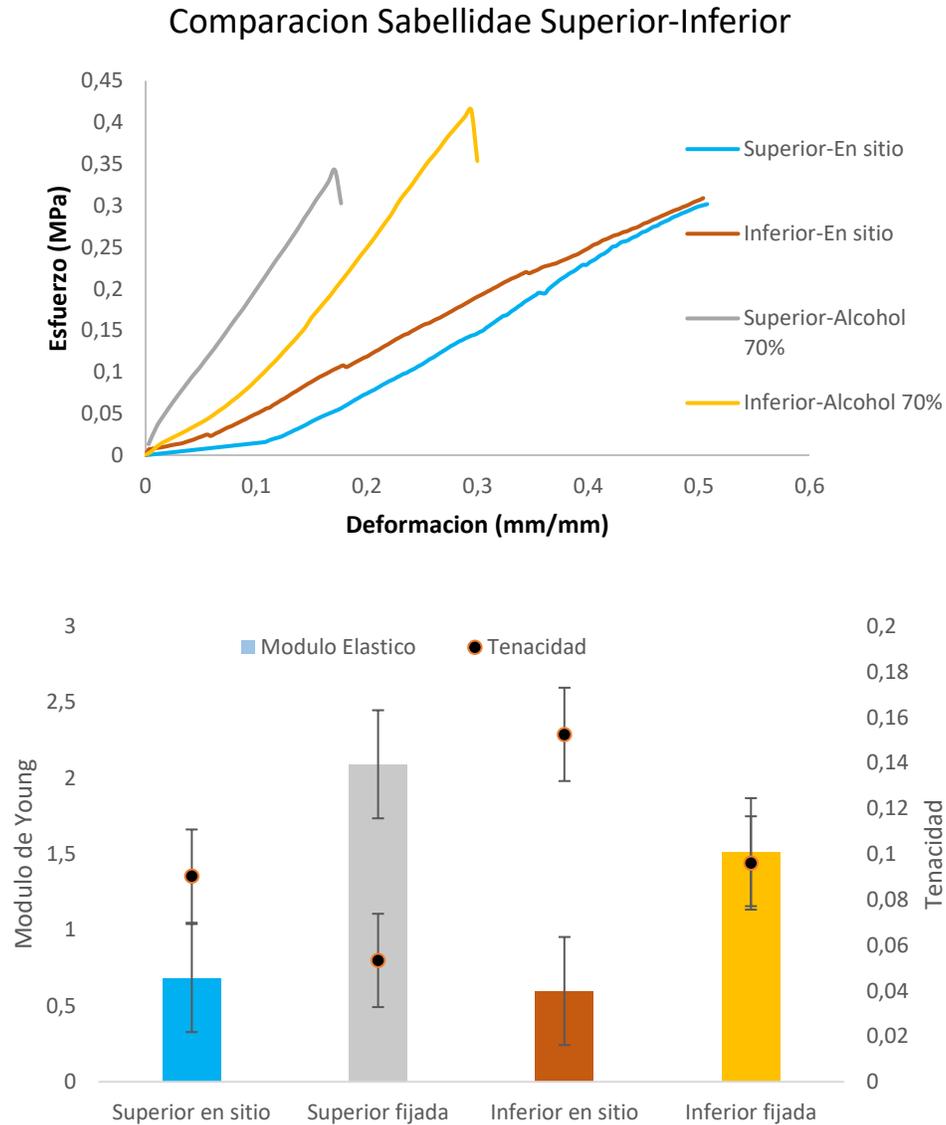
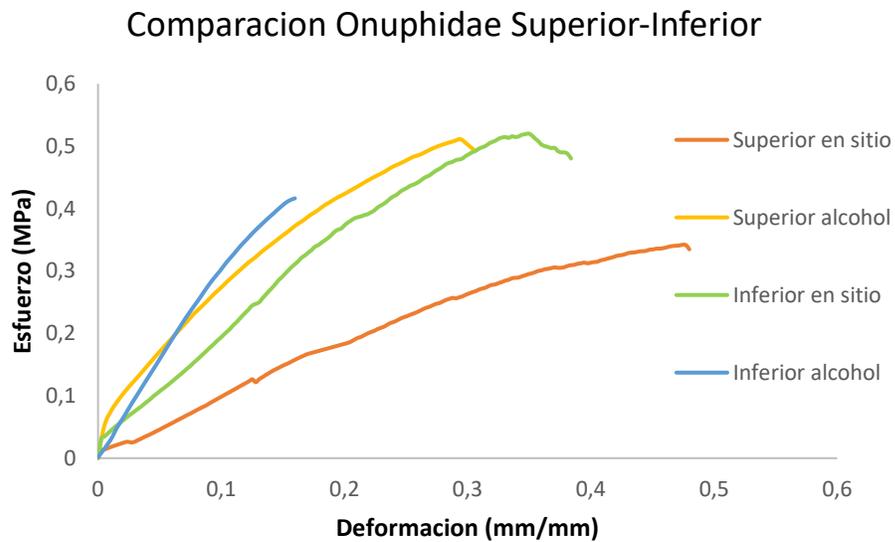


Figura 28. Comparación de elasticidad y tenacidad de Sabellidae Superior con Inferior.

En la Figura 28 la comparación de las gráficas de esfuerzo deformación y un gráfico de barras el cual muestra la comparación del valor del módulo de Young y la tenacidad con sus respectivas barras de error. Se puede evidenciar que la elasticidad presentada en los ensayos realizados en sitio es menor que el de las muestras en alcohol, pero la tenacidad es mayor en sitio. Esto se debe a que las muestras en sitio se deforman más.

### 7.3.2 Onuphidae zona superior con inferior

Ahora se compara el comportamiento de las propiedades mecánicas elásticas para las zonas superior e inferior del tubo construido por Onuphidae. En la Figura 29 se puede observar que las muestras en sitio dieron por debajo de las muestras fijadas. Pero las muestras en sitio tuvieron mayor deformación. Que los valores den mayores en las muestras fijadas se puede atribuir a un endurecimiento debido al método de fijación en todo el tubo.



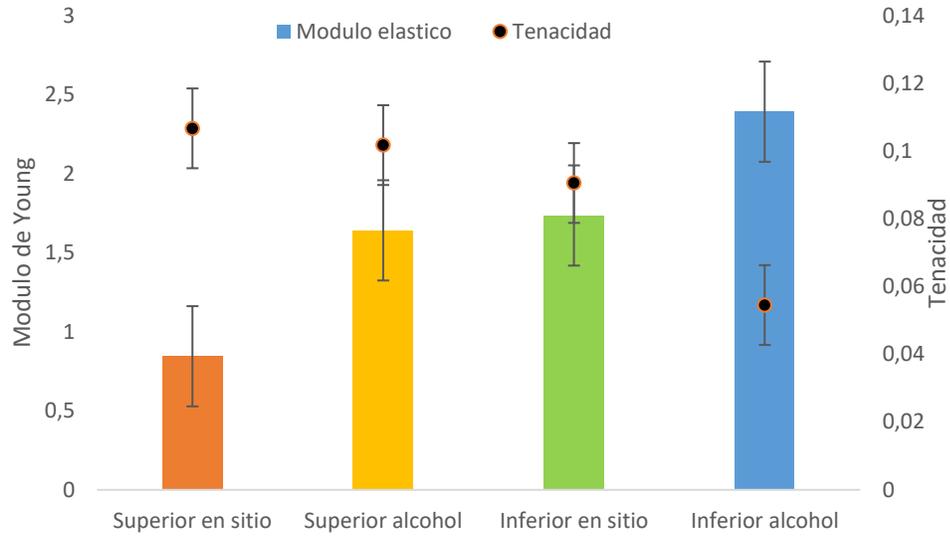


Figura 29. Comparación de elasticidad y tenacidad de *Onuphidae Superior* con *Inferior*.

En la Figura 29 se puede evidenciar que el módulo de Young en las muestras fijadas siempre da mayor, en un 72% aproximadamente y la tenacidad de las muestras ensayadas en sitio dan mayor que las fijadas en un 60% aproximadamente.

### 7.3.3 *Onuphidae* zona superior con *Sabellidae* zona superior

Se comparan la zona superior del tubo de los *Onuphidae* y los *Sabellidae*, las muestras que están fijas en alcohol tienen mayor propiedad elástica que las realizadas en sitio, pero las muestras estudiadas en sitio tienen mayor deformación.

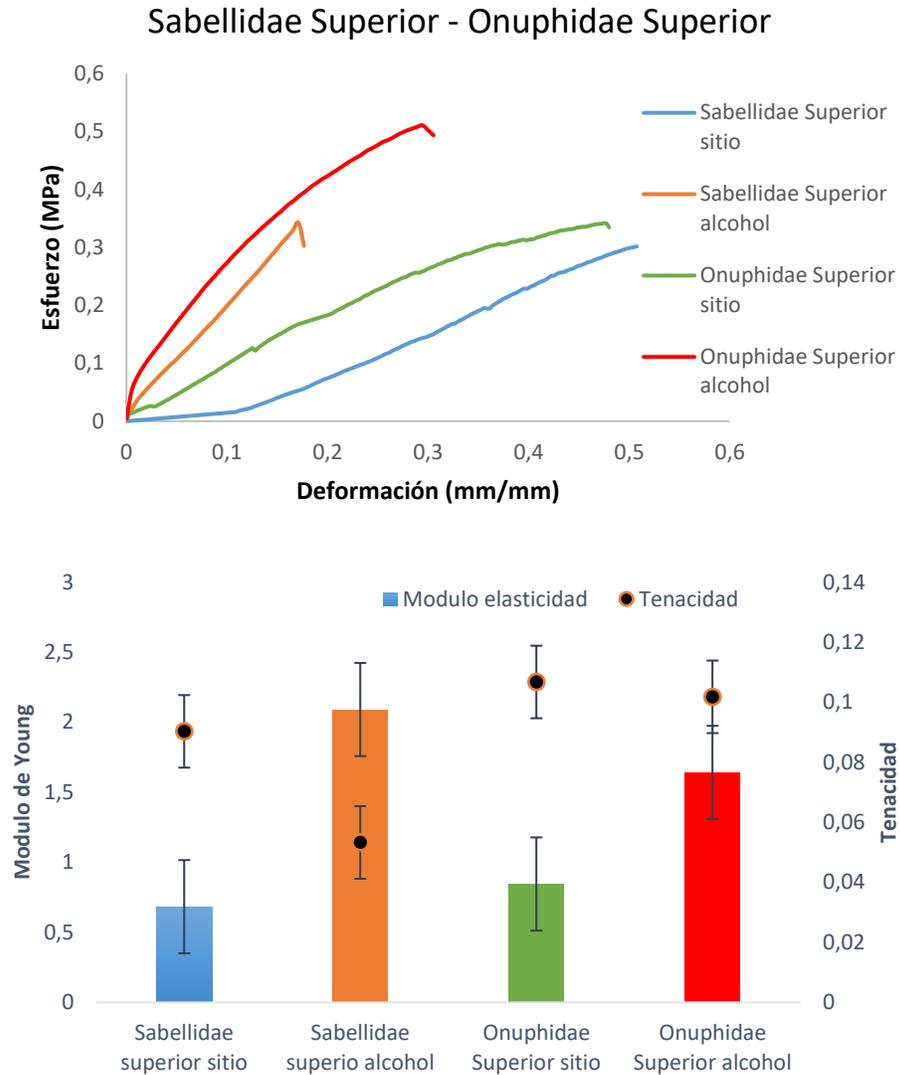


Figura 30. Comparación de elasticidad y tenacidad de Onuphidae Superior con Sabellidae Superior.

La tenacidad de las muestras en sitio es mayor que las fijadas por 60% aproximadamente para los tubos de Sabellidae y un 5% para los tubos de Onuphidae. El módulo de Young es menor para las muestras ensayadas en sitio.

### 7.3.4 Onuphidae zona inferior con Sabellidae zona inferior

Se hizo la comparación de la parte inferior del tubo de las dos especies, la parte inferior de los Onuphidae tanto en alcohol como en sitio, dieron mayores de manera

elástica, las deformaciones en sitio siguen dando mayores que las que son en alcohol.

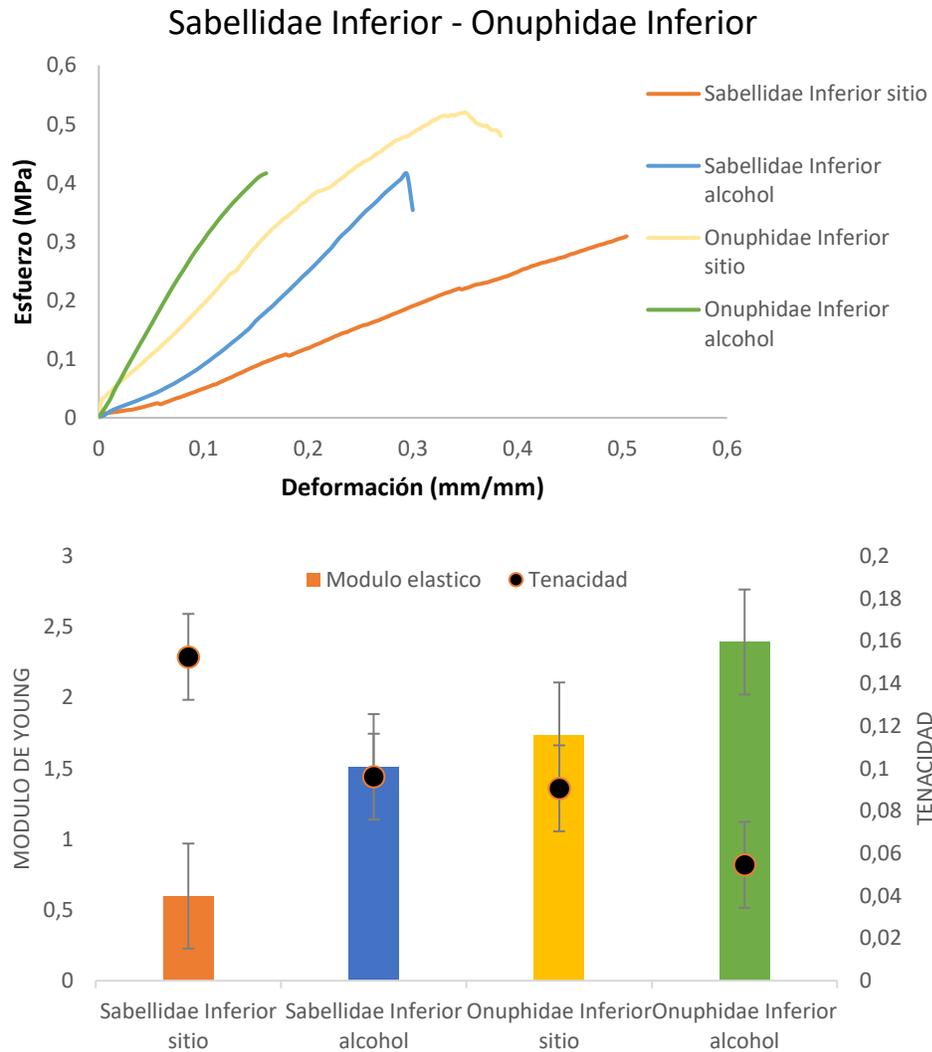


Figura 31. comparación de elasticidad y tenacidad de Onuphidae inferior con Sabellidae Inferior.

La tenacidad de las muestras en sitio es mayor que las fijadas por 66% aproximadamente para los tubos de Sabellidae y un 52% para los tubos de Onuphidae. El módulo de Young es menor para las muestras realizadas en sitio.

### 7.3.5 Onuphidae zona superior con Sabellidae zona inferior

Ahora se realizará la comparación de la parte superior del tubo Onuphidae con la parte inferior de los Sabellidae. Las muestras fijadas en alcohol tienen propiedades elásticas mayores que las estudiadas en sitio. La grafica muestra que el tubo de Onuphidae tiene mejor resistencia mecánica que las de los Sabellidae, esto se puede atribuir a la composición de los tubos.

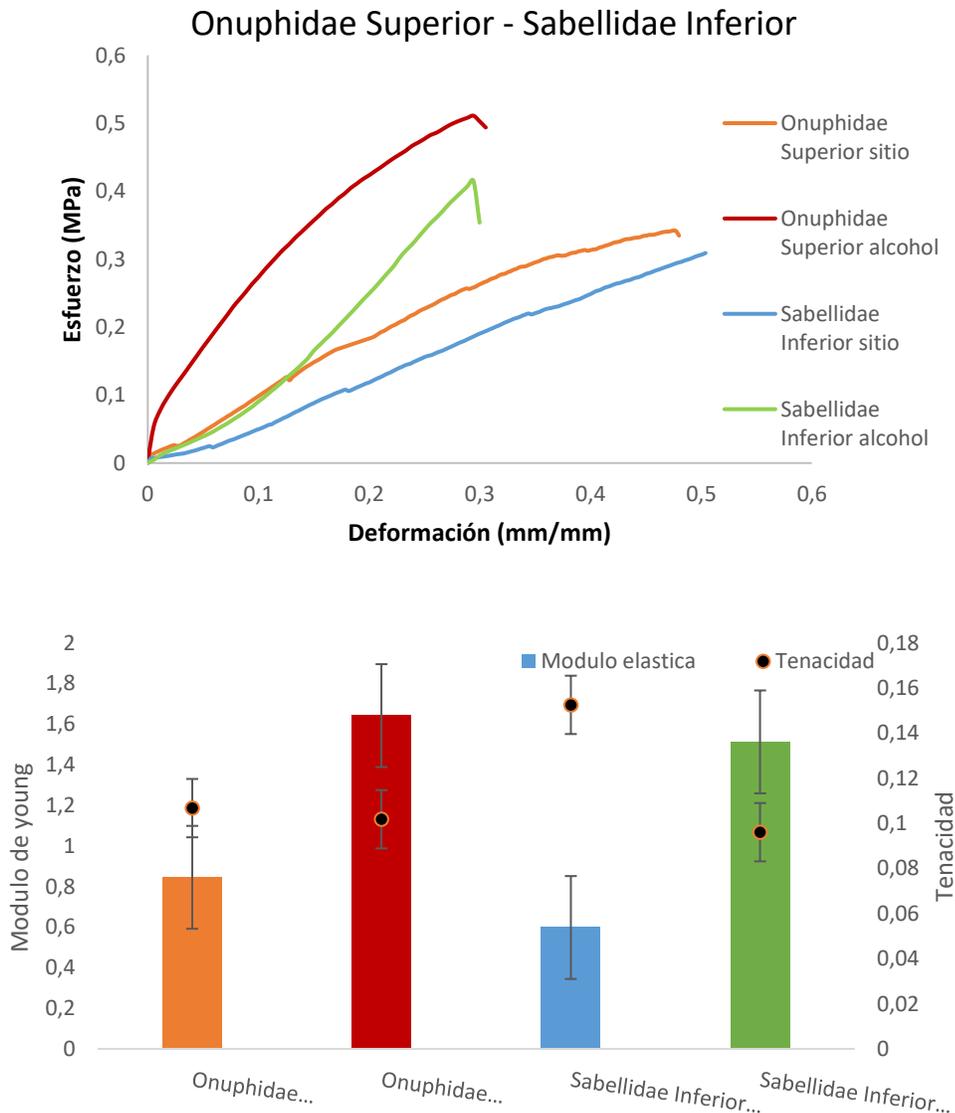


Figura 32. Comparación de elasticidad y tenacidad de Onuphidae Superior con Sabellidae Inferior.

La tenacidad de las muestras en sitio es mayor que las fijadas por 50% aproximadamente para los tubos de Sabellidae y un 5% para los tubos de Onuphidae. El módulo de young es menor para los ensayos realizados en sitio.

### 7.3.6 Onuphidae zona inferior con Sabellidae zona superior

Se comparo la parte inferior Onuphidae con la zona superior de los Sabellidae, donde se pudo encontrar que las zonas del Onuphidae tienen mejores características mecánicas que la de los Sabellidae. Las muestras estudiadas en sitio tienen mayor deformación que las fijadas en alcohol.

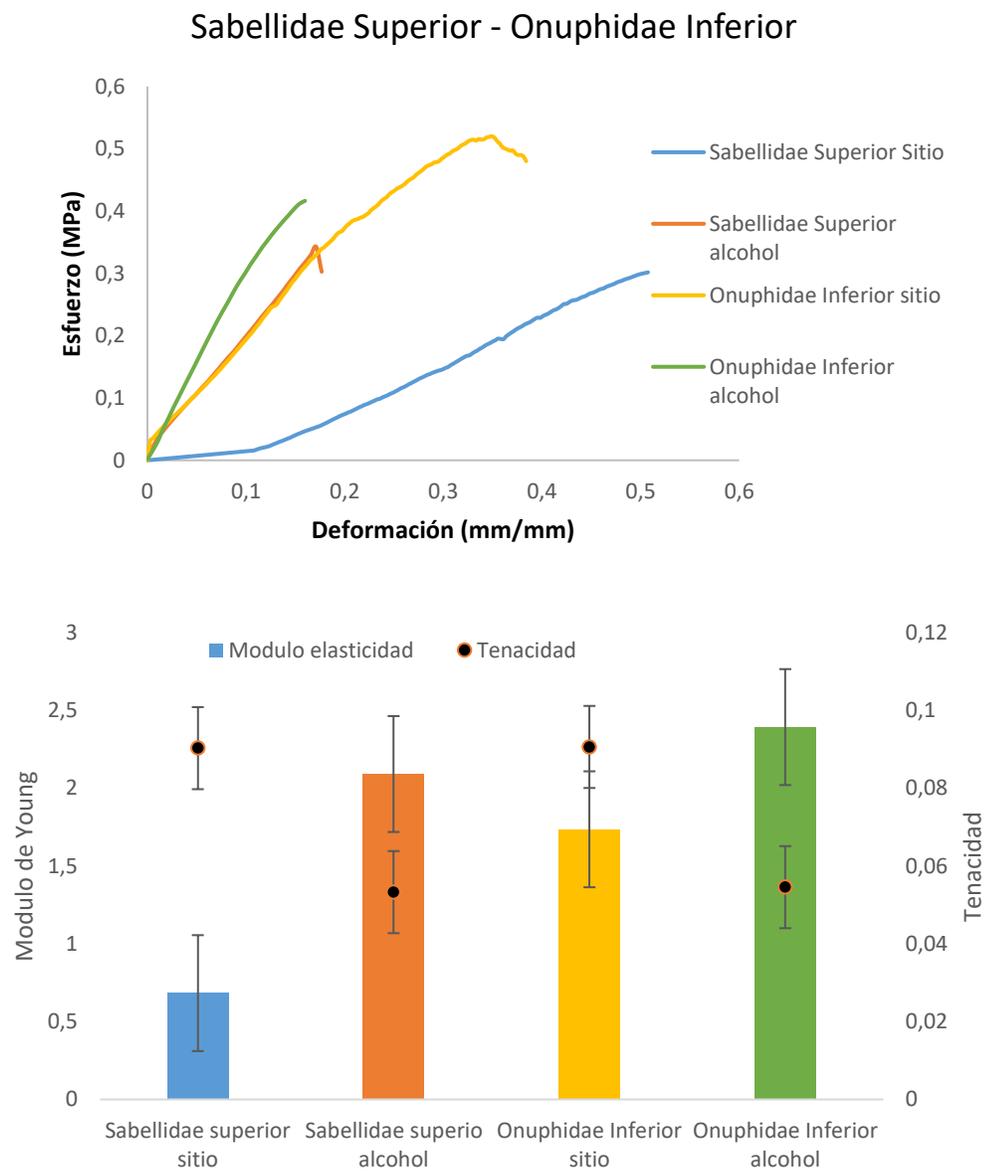
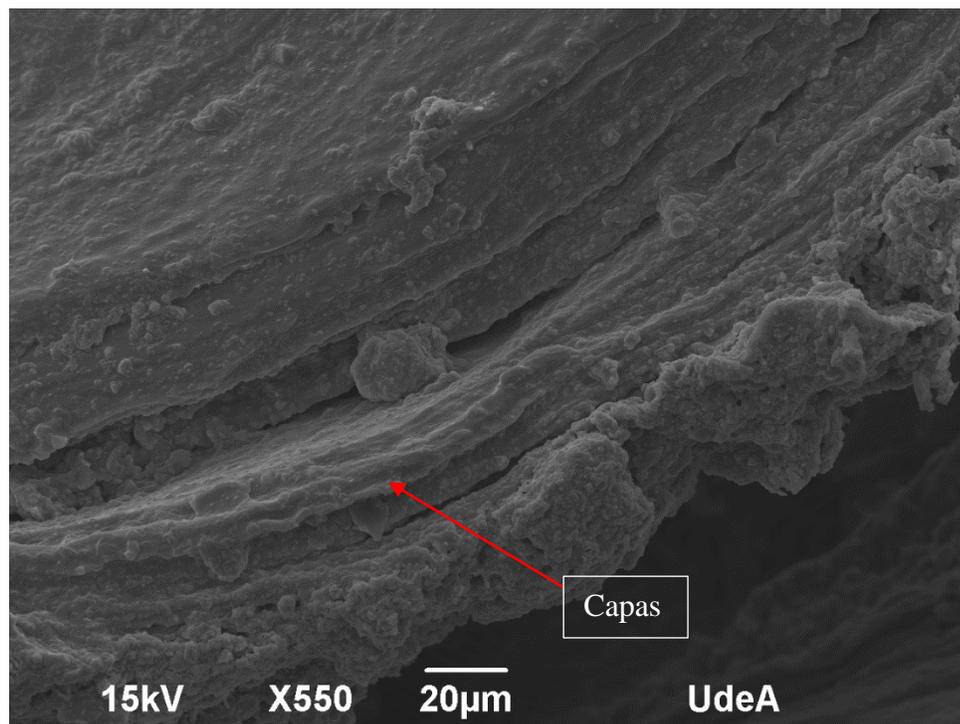


Figura 33. Comparación de elasticidad y tenacidad de Onuphidae Inferior con Sabellidae Superior.

La tenacidad de las muestras en sitio es mayor que las fijadas por 53% aproximadamente para los tubos de las dos familias. El módulo de Young es menor para los ensayos realizados en sitio, estos valores cambian dependiendo de la zona del tubo y la familia de poliquetos

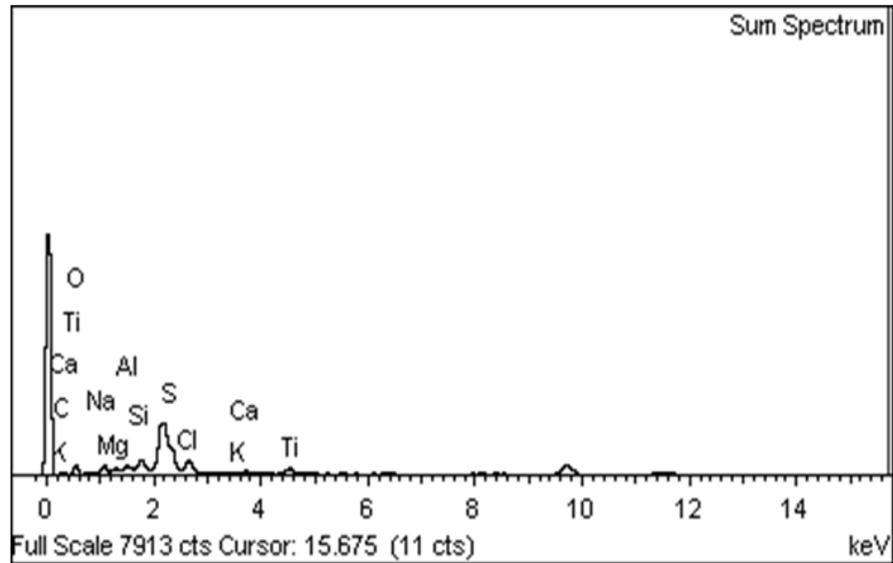
#### 7.4 Estudio superficial:

Se realizó una microscopia electrónica de barrido para identificar las microestructuras que se presentan en los tubos.[10] El punto de interés ha sido el adhesivo que es secretado por los poliquetos. Se encontró un patrón de capas de espesores similares, de aproximadamente  $5\ \mu\text{m}$ , los cuales son los que conforman la parte interna del tubo para los Sabellidae. *Figura 34.*

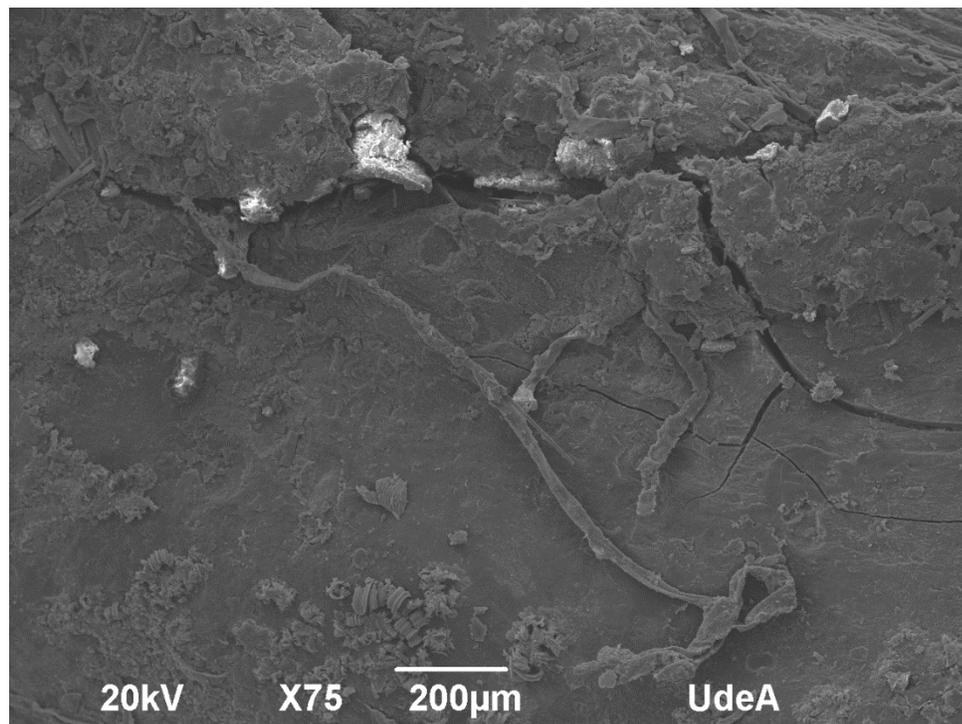


*Figura 34. Vista del corte del tubo de Sabellidae*

Se realizó un acercamiento en los materiales que son contenidos por el adhesivo, esta composición fue dada por el microscopio de barrido *Figura 35*. Se ha implementado este tipo de microscopia para realizar un acercamiento en las microestructuras y para conocer los posibles materiales que se pueden encontrar en la muestra.

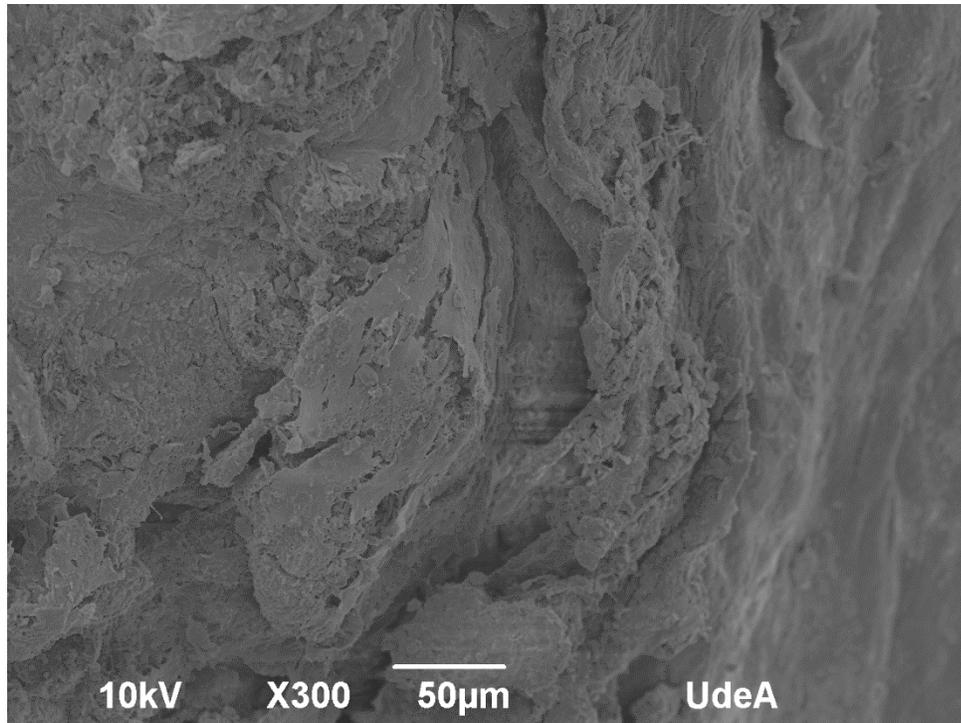


*Figura 35. Composición química arrojada por el SEM*



*Figura 36. Vista interna del tubo de Sabellidae*

Para las muestras de Onuphidae también se encontró el patrón de láminas, lo que nos da una idea de la forma de construcción del tubo. El adhesivo secretado por esta especie es más delgado y tiene menor cantidad de capas que las que se pueden hallar en la de los Sabellidae.



*Figura 37. Vista interna del tubo de Onuphidae.*

## 8 CONCLUSIONES:

- El alcohol al 70% deshidrata las muestras, cambiando las propiedades mecánicas. Se recomienda realizar los ensayos en campo, para obtener los valores reales de la respuesta a esfuerzos de tensión.
- Los tubos de la familia Onuphidae presentaron diferencias significativas en los valores del módulo de elasticidad entre la zona superior y la zona inferior, estas diferencias son aproximadamente del 60%. Estas zonas de los tubos de la familia Sabellidae presentaron una diferencia aproximadamente del 6 %. es decir, la composición de los tubos de los Sabellidae para la zona superior e inferior son similares mientras que la de los Onuphidae varía.
- La zona superior de los tubos de las dos familias presentó valores del módulo de elasticidad similares, cercanos al 5%, mientras que la zona inferior de los tubos de la familia Onuphidae presentan más resistencia que los de la familia Sabellidae en aproximadamente un 70%.
- El estudio empleando SEM de la pared interna de los tubos de las familias Sabellidae y Onuphidae, evidenció una construcción en capas con un espesor aproximado de 5  $\mu\text{m}$ , similar para ambas zonas de los tubos de las dos familias, con un espesor mayor en la familia Sabellidae.
- Las propiedades mecánicas de los tubos que los poliquetos construyen dependen de las condiciones ambientales y del material disponible.
- Las macroalgas y las algas filamentosas que crecen en el exterior del tubo de la familia Sabellidae brindan un refuerzo adicional, mejorando sus propiedades mecánicas.
- Los futuros estudios para este tema en la ingeniería, es la creación de materiales compuestos usando la misma arquitectura que utilizan los poliquetos, también un futuro estudio es la sinterización del adhesivo secretado por los gusanos. Las posibles aplicaciones de este estudio son en el diseño de tuberías de alta presión para el transporte de fluidos o también basándose en como el poliqueto construye un nuevo método de manufactura aditiva.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Ikoma, H. Kobayashi, J. Tanaka, D. Walsh, and S. Mann, “Microstructure, mechanical, and biomimetic properties of fish scales from *Pagrus major*,” *Journal of Structural Biology*, vol. 142, no. 3, pp. 327–333, 2003, doi: 10.1016/S1047-8477(03)00053-4.
- [2] A. Zaheri *et al.*, “Revealing the Mechanics of Helicoidal Composites through Additive Manufacturing and Beetle Developmental Stage Analysis,” *Advanced Functional Materials*, vol. 28, no. 33, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1002/adfm.201803073.
- [3] D. Wang, A. Zaheri, B. Russell, H. Espinosa, and P. Zavattieri, “Fiber reorientation in hybrid helicoidal composites,” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 110, no. June, p. 103914, 2020, doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.103914.
- [4] I. Lazăr and M. Grădinaru, “Paleoenvironmental context and paleoecological significance of unique agglutinated polychaete worm tube-ferruginous microstromatolite assemblages from the Middle Jurassic of the Southern Carpathians (Romania),” *Facies*, vol. 60, no. 2, pp. 515–540, 2014, doi: 10.1007/s10347-013-0390-0.
- [5] S. I. Salazar-Vallejo and M. H. Londoño-Mesa, “Lista de especies y bibliografía de poliquetos (Polychaeta) del Pacífico Oriental Tropical.”
- [6] O. Vinn, “Occurrence, Formation and Function of Organic Sheets in the Mineral Tube Structures of Serpulidae (Polychaeta, Annelida),” *PLoS ONE*, vol. 8, no. 10, pp. 1–5, 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0075330.
- [7] D. B. LEWIS, “Feeding and tube-building in the Fabriciinae (Annelida, Polychaeta),” *Proceedings of the Linnean Society of London*, vol. 179, no. 1, pp. 37–49, 1968, doi: 10.1111/j.1095-8312.1968.tb01099.x.
- [8] Russel C. Hibbeler, “Ingeniería Mecánica - Estática”, 12a edición, Mexico: Pearson educación, 2010
- [9] N. Du, Z. Yang, X. Y. Liu, Y. Li, and H. Y. Xu, “Structural origin of the strain-hardening of spider silk,” *Advanced Functional Materials*, vol. 21, no. 4, pp. 772–778, 2011, doi: 10.1002/adfm.201001397.
- [10] S. Aliani, C. N. Bianchi, C. de Asmundis, and R. Meloni, “Scanning electron microscope observations on the tube of the reef-forming serpulid *Ficopomatus enigmaticus* (Fauvel) (annelida,

polychaeta),” *Bolletino di zoologia*, vol. 62, no. 4, pp. 363–367, 1995, doi: 10.1080/11250009509356090.

- [11] de León-González Bastida-Zavala LF Carrera-Parra ME García-Garza SI Salazar-Vallejo V Solís-Weiss MA Tovar-Hernández ANÉLIDOS MARINOS DE, A. J. (n.d.). EDITORES J MÉXICO Y AMÉRICA TROPICAL. [www.uanl.mx/publicaciones](http://www.uanl.mx/publicaciones)
- [12] Chinmay Belthangady (2014), "Quantum-Assisted Magnetometry with NV Centers in Diamond," <https://nanohub.or>
- [13] Graficas de Circuitos, “Thinkercad”, 2022, [En Linea]. Disponible en: <https://www.tinkercad.com/>