



Universidad de Málaga

Escuela de Ingenierías Industriales

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Trabajo de Fin de Grado

Análisis experimental de eslabones de rigidez variable basados en jamming para manipuladores robóticos

Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Autor: Estrella Isla Sulimma

Tutor: Juan Manuel Gandarias Palacios

30 de noviembre de 2024

Declaración de Originalidad del Trabajo de Fin de Grado

Dña. Estrella Isla Sulimma

DNI: 75941964 N. Correo electrónico: eisulimma@gmail.com

Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Título del Proyecto/Trabajo: Análisis experimental de eslabones de rigidez variable basados en jamming para manipuladores robóticos

DECLARA BAJO SU RESPONSABILIDAD

Ser autor/a del texto entregado y que no ha sido presentado con anterioridad, ni total ni parcialmente, para superar materias previamente cursadas en esta u otras titulaciones de la Universidad de Málaga o cualquier otra institución de educación superior u otro tipo de fin.

Asimismo, declara no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual, así como que las fuentes utilizadas han sido citadas adecuadamente.

En Málaga, a 30 de noviembre de 2024

Fdo.: Estrella Isla Sulimma

Resumen

Análisis experimental de eslabones de rigidez variable basados en jamming para manipuladores robóticos

Autor: Estrella Isla Sulimma

Tutor: Juan Manuel Gandarias Palacios

Departamento: Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Palabras clave Jamming, “Soft Robotics”, vacío.

En este proyecto me centro en la investigación en el campo de “Soft Robotics”, en la robótica de rigidez variable que usa la técnica de jamming. El objetivo, por un lado, es el estudio e implementación de los tres tipos de jamming en eslabones. Por otro lado, es el diseño, desarrollo y puesta en marcha de un circuito neumático y electrónico para producir jamming y poder obtener los datos de interés. Posteriormente se realiza un análisis y comprensión de los resultados. El funcionamiento de la técnica jamming se basa en disminuir el espacio en el que se encuentra el material, lo cual aumenta la fricción y genera una mayor rigidez. Para el desarrollo de los eslabones he usado la herramienta de diseño Onshape y para la fabricación silicona Ecoflex. Los componentes hardware y software se han implementado usando ROS. Los resultados obtenidos indican que el jamming laminar es el que presenta una mayor rigidez. Por otro lado, se puede destacar que en el jamming tubular es donde se observa un claro efecto del jamming. Finalmente, como conclusiones se puede destacar que la cantidad de relleno afecta a la hora de realizar jamming. Además de determinar que el eslabón mayormente afectado por el jamming es el eslabón de jamming tubular.

Abstract

Análisis experimental de eslabones de rigidez variable basados en jamming para manipuladores robóticos

Author: Estrella Isla Sulimma

Supervisor: Juan Manuel Gandarias Palacios

Departament: Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Degree: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Keywords: Jamming, “Soft Robotics”, vacío.

In this project, I focus on research in the field of Soft Robotics, specifically on variable stiffness robotics using the jamming technique. The objective on one hand, is the study and implementation of the three types of jamming in links. On the other hand, is the design, development and commissioning of a pneumatic and electronic circuit to produce jamming and to be able to obtain the data of interest. Later this leads to the analysis and understanding of the results. The operation of the jamming technique is based on decreasing the space in which the material is, the friction will increase and a greater rigidity is generated. For the development of the links I used the design tool Onshape, for the manufacture of the links I used Ecoflex silicone. The hardware and software components have been implemented using ROS. The results obtained indicate that the laminar jamming is the one with the highest stiffness. On the other hand, it can be highlighted that in the tubular jamming is where I can observe a clear effect of jamming. As conclusions, it can be highlighted that the amount of filling affects the jamming. As well as determining that the link mostly affected by jamming is the tubular jamming link.

A todas las personas que me han apoyado y creído en mí durante estos últimos años. Sin vosotros nada de esto habría sido posible.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento en primer lugar a mi tutor Juan Manuel Gandarias, por ofrecerme la posibilidad de realizar este trabajo con él. También por su ayuda y guía a lo largo del proyecto. Su paciencia, experiencia y consejos han sido cruciales en la elaboración de este proyecto. En segundo lugar me gustaría agradecer a la Universidad de Málaga y al departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática por facilitarme los recursos para la realización de este trabajo, además de la ayuda y apoyo de los profesores. Agradezco también a mis compañeros/as y amigos/as por todo su apoyo a lo largo de los años, son un pilar fundamental en mi vida. Por ultimo, muchísimas gracias a mi familia por siempre creer en mi y hacerme creer que todo lo que me proponga es posible.

Índice

	Página
Índice de Figuras	xv
Índice de Tablas	xvii
1 Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Contribución del proyecto	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Estructura de la memoria	3
2 Estado del arte	5
2.1. Soft Robotics	5
2.2. Robótica usando Jamming	8
2.2.1. Jamming Granular	8
2.2.2. Jamming Tubular	9
2.2.3. Jamming Laminar	10
3 Metodología	11
3.1. Aspectos teóricos	11
3.1.1. Jamming granular	12
3.1.2. Jamming tubular	13
3.1.3. Jamming laminar	13
3.2. Desarrollo 3D y del eslabón	14
3.2.1. Descripción de la generación del eslabón	14
3.2.2. Fabricación del eslabón	16
3.2.3. Piezas de acople al motor	18
3.2.4. Circuito neumático/electrónico	23
4 Experimentos y resultados	27
4.1. Entorno experimental	27

4.2. Experimento 1	28
4.3. Experimento 2	29
4.4. Experimento 3	30
4.5. Experimento 4	32
5 Discusión de resultados	37
6 Conclusión	39
6.1. Conclusión	39
6.2. Líneas futuras	40
Bibliografía	43
Apéndices y planos	49

Índice de Figuras

Figura	Página
2.1. Esquema de la terminología “Soft Robotics”.	6
2.2. Conjunto de grippers: A. Oruga [21]; B. Tentáculo [22]; C. Estrella de mar [23]; D. OctArm [24]; E. Manipulación iónica [25]; F. Air-Octor [26]; G. Soporte para el corazón [27]; H. Exoesqueleto para una mano [28]; I. Dispositivo ponible [29]; J. Gripper [30]; K. Gripper de Soft Robotics [31]; L. Gripper de electro-adhesión [32]	7
2.3. Representación de los tres tipos de Jamming.	8
3.1. Transición Jamming granular.	12
3.2. Modelo diseñado.	15
3.3. Base del molde de silicona.	15
3.4. Tapa del molde de silicona.	16
3.5. Todos los materiales de fabricación del eslabón.	16
3.6. Dosificación de las partes A y B.	17
3.7. Proceso de eliminación de burbujas.	18
3.8. Vertido de las mezcla en el molde.	18
3.9. Puente FR12-H101K.	19
3.10. Acople de motor para jamming granular.	19
3.11. Cilindro de acoplo.	20
3.12. Ensamblaje completo del sistema: A. sistema final unido; B. sistema final explosionado.	20
3.13. Acople de motor para jamming tubular.	21
3.14. Ensamblaje completo del sistema: A. sistema final unido; B. sistema final explosionado.	21
3.15. Acople de motor para jamming laminar.	22
3.16. Ensamblaje completo del sistema: A. sistema final unido; B. sistema final explosionado.	22
3.17. Diseño del circuito completo.	23
3.18. Circuito eléctrico: ESP32, relé, electroválvula, sensor de presión.	24
3.19. Circuito completo montado en el laboratorio.	25
4.1. Resultado del experimento 1: Tiempo tardado en realizar vacío en cada tipo de Jamming.	29

4.2. Tres distintos cilindros de jamming: A. Jamming Granular; B. Jamming Tubular; C. Jamming Laminar.	30
4.3. Gráfica Posición vs Tiempo en Jamming sin vacío	31
4.4. Gráfica Fuerza vs Tiempo en Jamming sin vacío	31
4.5. Gráfica Fuerza vs Posición en Jamming sin vacío	32
4.6. Gráfica Posición vs Tiempo en Jamming con vacío	33
4.7. Gráfica Fuerza vs Tiempo en Jamming con vacío	34
4.8. Gráfica Fuerza vs Posición en Jamming con vacío	34

Índice de Tablas

Tabla	Página
4.1. Tabla de resultados de realizar vacío.	28

Introducción

Contenido

1.1. Motivación	1
1.2. Contribución del proyecto	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Estructura de la memoria	3

En este capítulo se expone la motivación detrás de este TFG, además de presentar la contribución del proyecto y sus objetivos. En este capítulo también se describe la estructura de la memoria.

1.1. Motivación

El área de la robótica es un área, en cambio, constante. Uno de los grandes avances que han surgido es la Robótica blanda o “Soft Robotics” [1]. Este campo se basa en imitar comportamientos de la naturaleza, como puede ser el tentáculo de un pulpo o los movimientos de una estrella de mar.

La razón por la que el desarrollo de este área es importante, es la interacción maquina-humano. Para asegurar seguridad a los trabajadores que interactúan con máquinas. La principal característica de interés de la robótica blanda es que adapta su forma al entorno y permite contacto físico blando. Ésto es posible debido a que se fabrican con materiales flexibles. Se les atribuye una tipología continua con infinitos grados de libertad.

Este proyecto se enfoca en uno de los desafíos clave de la robótica blanda: el diseño y control de sistemas de rigidez variable basadas en jamming. A día de hoy existen proyectos que aplican rigidez variable, donde aumentan la rigidez aumentando la presión de un fluido, en una cámara deformable [2,3]. El jamming aumenta la rigidez disminuyendo la presión. Este es el componente clave para hacer esta investigación tan innovadora, ya que no es un área muy estudiada y sienta las bases para posibles futuras líneas de investigación.

El jamming es un método de transición ya estudiado [4–6,6–14], pero su aplicación en sistemas robóticos es un campo prácticamente inexplorado. En este proyecto lo que busco es analizar las características mecánicas de un eslabón usando jamming. Busco estudiar los distintos métodos de Jamming y analizar la robustez de cada uno en función a sus rellenos. En concreto, existen tres métodos de jamming: granular, tubular y laminar.

Esta investigación se puede usar como base a la hora de generar otras estructuras. Dado que teniendo en cuenta los resultados obtenidos, y la aplicación que se desee que desarrolle, se puede tomar un tipo de jamming u otro.

En resumen, la motivación detrás de este trabajo de fin de estudios ratifica en mi propio interés por el campo de la robótica blanda. A su vez que por la necesidad académica y profesional de indagar en formas de mejorar los actuales métodos de aplicar la rigidez variable y la búsqueda de mayor rigidez.

1.2. Contribución del proyecto

El proyecto busca analizar la rigidez de un eslabón usando los tres métodos de jamming. Para ello lo que he hecho ha sido fabricar un eslabón de silicona por cada tipo de jamming. Estos eslabones se van a rellenar con distintos materiales en función al tipo de jamming que se use en cada uno de los experimentos. Para realizar el vacío he implementado un circuito neumático usando una campana de vacío y una bomba de vacío. Para analizar el sistema, he implementado un circuito electrónico en paralelo. Uso un sensor de fuerza desarrollado por otro TFG, cuya información esta en un repositorio de Github ¹, además de un sensor de vacío y una electroválvula para un mejor control.

El análisis se realiza a través de 4 experimentos independientes. En cada experimento se rellena el eslabón de distintos materiales en función al tipo de jamming que se vaya a estudiar. Una vez realizados los experimentos, analizo y comparo los datos.

1.3. Objetivos

En primera instancia busco entender y estudiar el actual estado del arte del mundo de “Soft Robotics”. Concentrándome en los proyectos de robots de rigidez variable, así como los que usan la

¹Repositorio de: https://github.com/Robotics-Mechatronics-UMA/force_sensor_3D

técnica *jamming*.

Mi objetivo con la técnica jamming es entender este fenómeno, además de estudiar sus tres tipos. Busco obtener el conocimiento suficiente para poder implementar los tres tipos de jamming en eslabones de rigidez variable. Para el desarrollo de los eslabones hago el diseño 3D de los eslabones y rellenos, y fabrico los eslabones con silicona.

Por otro lado, he diseñado, desarrollado y puesto en marcha un circuito neumático y electrónico para poder realizar jamming en los eslabones y obtener los datos necesarios. Posteriormente, para la implementación a nivel hardware y software del circuito he utilizado ROS. Además, en la experimentación he usado un sensor de fuerza de 3 ejes, el cual ha sido desarrollado en otro proyecto.

Finalmente, tras realizar los distintos experimentos, realizaré un análisis y discusión de los resultados. Esto dará una idea nítida y clara de los conocimientos adquiridos y de las posibles mejoras de cara al futuro.

1.4. Estructura de la memoria

La memoria se divide en 6 secciones. En la primera sección de la memoria hablo acerca de la motivación detrás del proyecto, la contribución del mismo y los objetivos. En la segunda sección me centro en el estudio del estado del arte de “Soft Robotics” y jamming. En la tercera sección describo la metodología del proyecto, incluyendo los aspectos teóricos, el desarrollo de las piezas usadas y los sistemas que manejo. En la cuarta sección explico cada uno de los experimentos y los resultados obtenidos. En la quinta sección hago una discusión detallada de los resultados obtenidos. Finalmente, en la sexta sección reflejo la conclusión final según los resultados obtenidos. Además de las posibles mejoras y futuros proyectos que puedan surgir a partir de este trabajo.

Estado del arte

Contenido

2.1. Soft Robotics	5
2.2. Robótica usando Jamming	8
2.2.1. Jamming Granular	8
2.2.2. Jamming Tubular	9
2.2.3. Jamming Laminar	10

Este capítulo describe el estado del arte del campo de “Soft Robotics” y los proyectos que usan jamming. Se trata de un campo muy nuevo con multitud proyectos, por lo que he escogido los proyectos más interesantes y relevantes.

2.1. Soft Robotics

El uso de robots con rigidez variable proporciona las ventajas y propiedades de los robots rígidos además de las ventajas de la robótica blanda. No solo con la estabilidad, fuerza y rendimiento de manipulación de un sistema rígido, sino también con la maleabilidad y beneficios de acceso de un sistema blando.

El termino “soft robot”, es complicado de definir ya que a lo largo de distintos artículos escritos en los últimos años, se usan distintas definiciones. La figura 2.1 muestra un esquema orientativo de las

distintas definiciones que expongo a continuación.

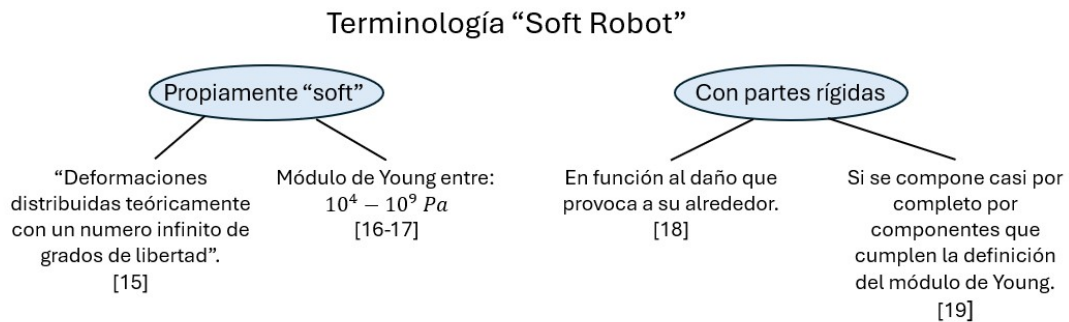


Figura 2.1: Esquema de la terminología “Soft Robotics”.

En el artículo [15], se define que un elemento con “deformaciones distribuidas teóricamente con un número infinito de grados de libertad” se puede considerar “soft”. Por otra parte, tras la generación de los primeros prototipos bio-inspirados se genera una nueva definición dada por los artículos [16, 17]. Aquí, el término “soft” se refiere al cuerpo del robot, y por tanto, se divide entre materiales blandos o no blandos en función del módulo de Young. Serán blandos todos aquellos materiales que tengan un módulo de Young entorno a los $10^4 - 10^9 Pa$.

Sin embargo, estas definiciones son excluyentes de otros tipos de robots que pueden ser considerados en “Soft Robotics”. Como aquellos que contengan ciertas partes rígidas, como sensores y actuadores. Por tanto, en otros artículos, como en el [18], se genera una nueva definición que si considera estos casos. En el artículo [18], se considera que un robot es suave en función al daño que puede provocar en su entorno. En este artículo se considera que un objeto puede ser blando en términos de deformación, pero duro en términos de contacto.

Finalmente, en la tesis [19], que analiza todas estas definiciones, se llega a una definición que engloba estas especificaciones y otras más, llegando a la siguiente conclusión: “Un robot se puede definir como “blando” si está compuesto casi por completo por materiales con el módulo de Young entre $10^4 - 10^9 Pa$. Así se asegura que sea deformable y no cause daños”. También genera nuevas definiciones como cuerpos “mixto blando”, que se refiere a “cuerpos que presentan una estructura rígida, pero cuerpo blando”. Y el concepto de robot “adaptable” que se define como “robots semi-rígidos, que pueden adaptarse muy bien al medio gracias a su configuración y grados de libertad”.



Figura 2.2: Conjunto de grippers: A. Oruga [21]; B. Tentáculo [22]; C. Estrella de mar [23]; D. OctArm [24]; E. Manipulación iónica [25]; F. Air-Octor [26]; G. Soporte para el corazón [27]; H. Exoesqueleto para una mano [28]; I. Dispositivo ponible [29]; J. Gripper [30]; K. Gripper de Soft Robotics [31]; L. Gripper de electro-adhesión [32]

Los robots blandos se pueden dividir en varias categorías en función a su aplicación. En la figura 2.2, muestro varias imágenes sacadas de los artículos que referencio para que se haga una mejor idea de las estructuras sobre las que hablo.

- **Robots y locomoción Bio-inspirados:** Estudian la naturaleza y pretenden imitar comportamientos y animales como gusanos [20], orugas [21], tentáculos [22], estrellas de mar [23] y medusas [33]. Algunas locomociones han sido estudiadas. Como la locomoción rotatoria con el GoQBot [34], la locomoción peristáltica con Meshworm [35], la locomoción bajo agua con piernas con el PoseiDRONE [36] o la natación con chorro motorizado [37].
- **Robots manipuladores:** Estos tienen una aplicación específica como coger objetos, explorar o interactuar con humanos. Entre los numerosos prototipos, los más conocidos son: el Octarm [24], compuesto de músculos artificiales neumáticos; el Air-Octor [26], caracterizado por su doble neumática y actuación de tendón; y el asistente de manipulación iónica [25].
- **Robots médicos y punibles:** Se diferencia de las anteriores categorías porque están pensados para actuar en contacto con humanos. Se trata sólo del comienzo de este campo de investigación, pero algunos prototipos ya están siendo usados en hospitales. Como, por ejemplo, en cirugías mínimamente invasivas (MIS) [38]. La robótica blanda permite el desarrollo de endoscopios mejores, ya que son más seguros y reducen la posibilidad de dañar los tejidos y órganos del paciente. Además, permiten una mayor maleabilidad. En el artículo [39] se discute un estado relativamente actualizado de este campo. Otro tipo de uso que está empezando a en-

trar en auge es en el reparto de medicación a partes específicas del cuerpo de un paciente [40]. Pero la aplicación más interesante es en el desarrollo de órganos artificiales [27] y partes del cuerpo para simulaciones e investigaciones [41]. Dispositivos punibles como exoesqueletos o prótesis [28, 42, 43], pero también incluye dispositivos hepáticos integrados con realidad virtual [29, 44–47].

- **Soft Grippers:** Es el grupo más avanzado y algunos de estos prototipos se encuentran en la industria. Hay una gran variedad de tecnologías que permiten a estos grippers adaptarse a los objetos que deben manejar. La solución más simple es crear dedos con numerosas articulaciones que le permitan adaptarse a la forma del elemento. Esta no es la solución óptima, ya que el material del que está compuesto no tiene por qué ser suave. Otra solución sería usar materiales cuyos actuadores sean externos y que esté compuesto de materiales blandos que se deforman al interactuar con el objeto. Tal como presenta Festo con su MultiChoice Gripper [30]. Podemos encontrar otras soluciones como el uso de grippers neumáticos [31]. Y otras tecnologías como electro-adhesión [32], la cual se puede combinar con actuadores neumáticos [48]. Finalmente, podemos encontrar la solución en la que esta basada este trabajo, que es el Jamming [49–54].

2.2. Robótica usando Jamming

El jamming es una de las soluciones propuestas para el desarrollo de robótica blanda. “El jamming es una transición atermica entre un estado fluido y sólido en sistemas amorfos como la materia granular, suspensiones coloidales, fluidos complejos y células” [4].

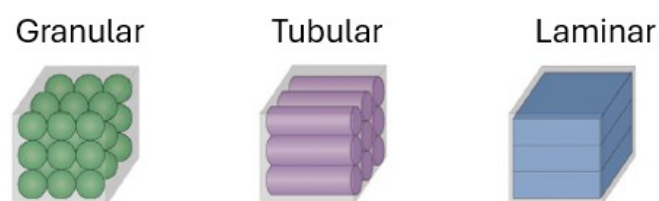


Figura 2.3: Representación de los tres tipos de Jamming.

2.2.1. Jamming Granular

Hace 30 años se comenzó esta metodología usando un "gripper granular" que se basaba en una bolsa flexible e impermeable que estaba parcialmente llena de material granular y conectada a una bomba de vacío [49–51]. Este tipo de gripper se conoce a día de hoy como gripper universal. Este gripper se puede amoldar fácilmente a la forma del objeto a coger. Únicamente se debe generar presión del objeto contra el gripper, y con la misma facilidad se vuelve al estado original. Cuando

se activa la bomba de vacío, se contrae la membrana y se amontonan los gránulos en el interior, en función de la forma dada, haciéndolo rígido. Lo cual permite la manipulación del objeto. Se encuentran dos ventajas en este tipo de jamming:

- Se consigue bastante rigidez con una baja variación del volumen.
- La fácil transición entre fluidez y rigidez lo hace fácilmente adaptable a distintas aplicaciones.

A lo largo de los años se han generado experimentos y grippers basados en esta tecnología. En el estudio [52], se analizan los distintos materiales granulares que se pueden usar en granular jamming y cuales son mas ventajosos.

Existen varios proyectos en los que ese usa granular jamming:

- **Granular Grippers:** Hay muchos proyectos generados al rededor de la idea de generar grippers granulares. Un ejemplo es el artículo [53], que se basa en una prótesis que incorpora un gripper granular diseñado para ayudar en las tareas diarias a personas con una amputación. Por otro lado, también se han diseñado grippers universales como el anteriormente explicado [54].
- **Cuerpos locomotores granulares:** Por ejemplo, como se muestra en el artículo [55], un humanode que utiliza garras granulares para ascender paredes verticales.
- **Gripper granular de enjambre:** Inspirado en hormigas, es un robot formado por mini-robots independientes capaz de rodear un objetivo [56].
- **Dedos robóticos:** Existen varios dedos robóticos creados usando jamming combinado con actuadores. Por ejemplo los que se presentan en los artículos [2, 57].

2.2.2. Jamming Tubular

Una ventaja sobre el jamming granular, es que en el jamming tubular es más resistente al estrés tensorial debido a que la dirección de las fuerzas friccionales aplicadas es paralela al estrés provocado. Lo cual otorga una mayor estabilidad. Estos sistemas permiten flexibilidad para doblar en cualquier dirección longitudinal en estado blando. Además, aumenta la resistencia transversal que se aplique debido a la unión de las fibras.

El artículo [58], presenta una aproximación al diseño de módulos esbeltos, altamente flexibles basados en el uso de jamming tubular. Este artículo genera un diseño empírico basado en los siguientes ejemplos. Primero, el estudio preliminar experimental acerca de la rigidez variable usando jamming tubular [59]. Por otro lado, estudio para generar un manipulador de rigidez variable para cirugías mínimamente invasivas, basado en jamming tubular [60]. Finalmente, el uso de jamming tubular para dar mayor rigidez a robots blandos [61]. En base a este proyecto se desarrolló un guante háptico capaz de doblarse en dos ejes y acomodarse a todas las tallas.

2.2.3. Jamming Laminar

Al igual que en el jamming tubular, en el jamming laminar tenemos la ventaja de que es más resistente al estrés tensorial debido a la dirección a las fuerzas friccionales aplicadas que son paralelas al estrés provocado. Esto se demuestra en el artículo [62], donde se ve que en laminar jamming se soporta hasta el doble de la carga que en granular jamming [63].

Algunos estudios y artículos destacables serían. Por un lado, el artículo [64], habla de las variedades del uso del laminar jamming, desde muebles de rigidez variable a la creación de suelas de esponjosidad variable en zapatos. Por otra parte, el artículo [65], habla del uso de tendones de rigidez variable usando laminar jamming para aumentar el esfuerzo de fuerza que se puede aplicar a la hora del agarre. Asimismo, en el artículo [66], el autor propone una estructura laminar para mejorar la rigidez en más de 20 veces cuando se aspira al vacío. Por último, en el artículo [67], el objetivo es generar articulaciones que se usen para desarrollar grippers de robot adaptativos con rigidez variable.

Metodología

Contenido

3.1. Aspectos teóricos	11
3.1.1. Jamming granular	12
3.1.2. Jamming tubular	13
3.1.3. Jamming laminar	13
3.2. Desarrollo 3D y del eslabón	14
3.2.1. Descripción de la generación del eslabón	14
3.2.2. Fabricación del eslabón	16
3.2.3. Piezas de acople al motor	18
3.2.4. Circuito neumático/electrónico	23

En este capítulo comento con detalle, los aspectos teóricos y prácticos que han llevado a la creación de los eslabones de silicona que me permitirán realizar el análisis de los aspectos del jamming. A su vez, explico en detalle el proceso de generación de las diversas piezas usadas de los experimentos y el diseño del circuito neumático y electrónico.

3.1. Aspectos teóricos

Como he comentado anteriormente, el jamming es un estado de transición entre sólido y líquido. Entender cómo funciona el jamming nos permite usar esta tecnología a nuestro favor para obtener

rigidez a partir de materiales fluidos o líquidos.

Cuando tenemos un número de partículas en un espacio amplio que permite el movimiento libre de estas, las partículas se podrán mover en todas direcciones sin estorbarse unas a las otras. En esta situación, el material actúa como un fluido. Si el espacio en el que se encuentran estas partículas comienza a encoger, las partículas tendrán cada vez menos espacio y empezarán a obstaculizarse unas a otras. En ese momento las partículas se encuentran atascadas (*jammed*), el material será más rígido y resistirá a fuerzas.

En resumen, el jamming se trata de un proceso en el que la viscosidad de un material mesoscópico (un material que se encuentra entre microscópico y macroscópico, p. ej. material granular o cristales). Aumenta al aumentar la densidad de las partículas, entendiéndose la densidad por número de partículas por volumen. Tal como se muestra en la figura 3.1.

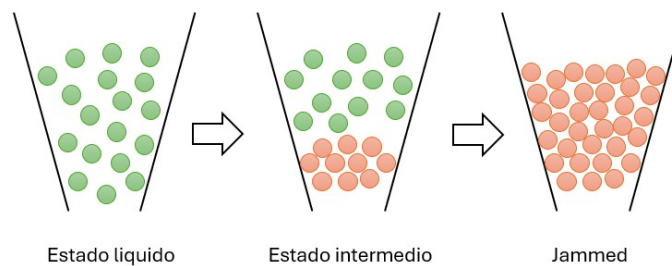


Figura 3.1: Transición Jamming granular.

La densidad para que el sistema se atasque (*jammed*), puede variar en función de muchos factores, como la forma, la deformabilidad de las partículas, las fuerzas friccionales entre partículas y el grado de dispersión del sistema. [13]

La teoría general para el jamming es la misma para los tres tipos. Pero la realidad es que existen diferencias entre las tres técnicas y en los materiales que se usan.

3.1.1. Jamming granular

El jamming granular es el más estudiado y usado de los tres tipos. El jamming granular, tal como indica el propio nombre, se realiza con materiales granulares como puede ser el café, cristales, arena, polímeros, etc. Las características de jamming cambian al usar un sistema macroscópico granular, ya que estos tienen una alta energía gravitacional, lo que hace que no se vean afectados por cambios de temperatura. Lo que significa, que variar la temperatura ante estos sistemas no desatasca el

sistema que ya se encuentra *jammed*. Sin embargo, un estrés de cizalladura si puede provocar dicho desatascamiento, si se encuentra a temperaturas lo suficientemente altas. [14]

Por otro lado, el artículo [54] habla acerca de una de las propiedades únicas que nos proporciona el jamming granular en un gripper. Se trata del punto crítico entre fluido y sólido en el que se encuentran las partículas sueltas en una bolsa. Lo cual permite al gripper deformarse y tomar la forma perfecta del objeto, en estado fluido. Y al aplicar succión, el gripper obtiene una considerable rigidez mientras retiene completamente el objeto.

Esto reitera lo que he explicado anteriormente en la introducción. Permite obtener una alta rigidez con una baja variación del volumen. Y, la fácil transición entre fluidez y rigidez lo hace fácilmente adaptable a distintas aplicaciones.

3.1.2. Jamming tubular

El jamming tubular utiliza el principio de jamming, pero en lugar de utilizar partículas o materiales granulados, utiliza tubos flexibles, o incluso gránulos en tubos flexibles. Al aplicar el vacío el sistema completo se compacta volviendo al eslabón completamente rígido.

Debido al uso de tubos flexibles, se permite un control de la rigidez direccional y predecible. Al tener todo el material en un tubo confinado y alargado facilita una distribución uniforme del material. Estas dos cosas llevan a un mayor control de la forma y la rigidez. Por su parte, al tener el material confinado, ocupa menos espacio lo que lo hace más ligero y compacto. Además posibilita un uso eficiente del espacio.

Debido a su forma esbelta y la naturaleza controlada de la compactación, permite cambios de direcciones específicos y por tanto una direccionalidad controlada. A la hora del diseño se puede hacer un diseño de los tubos en función de la aplicación y así dar una configuración especializada.

En resumidas cuentas, el jamming tubular permite un mayor control sobre la forma y la rigidez, haciéndolo más ligero y compacto, permitiendo aplicaciones precisas y específicas.

3.1.3. Jamming laminar

Esta forma de jamming utiliza capas o láminas de materiales flexibles unas sobre otras. Pueden usarse láminas de materiales como silicona, plástico o tejidos combinados, también se pueden encontrar combinaciones con membranas selladas para crear una cámara de vacío.

Las capas laminares se diseñan de forma que tengan una alta flexibilidad para adaptarse a las forma antes de aplicar vacío. Antes de aplicar vacío, las capas no están fuertemente unidas lo que

permite un movimiento relativo, admitiendo una alta flexibilidad y adaptabilidad.

Cuando se aplica vacío se puede controlar el nivel de compactación entre capas, debido a que la rigidez se genera por fricción entre capas y ,además, las capas pueden estar compuestas de distintos materiales con diferentes propiedades mecánicas, permitiendo un mayor control sobre la rigidez y la distribución de la rigidez.

Finalmente, el hecho de que las capas puedan ser diseñadas en diferentes formas y tamaños, las propiedades pueden ser seleccionadas y combinadas de acuerdo a las necesidades de aplicación. Y las estructuras de jamming laminar pueden ser reconfiguradas fácilmente tras liberar el vacío. Proporcionando una gran adaptabilidad a una amplia variedad de formas y aplicaciones.

En conclusión, a pesar de que el jamming tubular y laminar tengan ventajas parecidas el tubular es más adecuado para aplicaciones direccionales y alargadas, mientras que el jamming laminar ofrece mayor flexibilidad y adaptabilidad para estructuras y formas más complejas.

Dado que el jamming tubular y laminar están menos estudiados en la robótica, no se encuentran referencias de estos.

3.2. Desarrollo 3D y del eslabón

3.2.1. Descripción de la generación del eslabón

El diseño de este lo he hecho con Onshape, figura 3.2¹. A partir del cual, diseño el molde para fabricar posteriormente los eslabones usando silicona.

El modelo tiene un diámetro exterior de 19mm, un grosor de 5mm y una altura de 125mm. También se puede observar que a una altura de 10mm he introducido un orificio de 4mm de diámetro. Este orificio está para poder realizar jamming.

Una vez generado el modelo, diseño el molde para poder fabricarlo. El molde se divide en dos partes: una tapadera y una base.

En la figura 3.3² se representa la base del molde. Donde el diámetro de la base es es la del interior del modelo, 9mm, y permite que el modelo posteriormente este hueco. La altura de la propia base es de 1.6mm, ya que no soporta una alta carga. La altura del conjunto completo es de 126.6mm,

¹Repositorio de: <https://cad.onshape.com/documents/bd8032c44197abf0d30b43e2/w/882e2c65e0214befd2a016f2/e/cb59d3047419fadd0961fcc1>

²Repositorio de: <https://cad.onshape.com/documents/f0e8feb7081023722481b4b9/w/0e1191eb74974a363fac25b6/e/7b2c531a55219828b9f0d176>



Figura 3.2: Modelo diseñado.

proporcionando así al modelo un hueco de 120mm de altura. Además, presenta el hueco de 4mm de diámetro, a una altura de 11.6mm.



Figura 3.3: Base del molde de silicona.

Por otro lado, en la figura 3.4³, se muestra la tapa del molde. El diámetro interior de la tapa es el diámetro exterior que se desea obtener en el modelo final, 19mm. Le he dado un grosor de 0.8mm. Para el grosor de la parte superior del modelo quiero que sea de 5mm, por tanto le he dado una altura interior a la tapa de 125mm.

En el anexo 1 se encuentra el plano de las piezas del molde.

³Repositorio de: <https://cad.onshape.com/documents/f0e8feb7081023722481b4b9/w/0e1191eb74974a363fac25b6/e/8ef6fb3e701b5a78c2e95dec>



Figura 3.4: Tapa del molde de silicona.

3.2.2. Fabricación del eslabón

Para la fabricación del eslabón necesito: una bomba de vacío KQ-1K, una campana de vacío, spray Ease realise 200, líquidos A y B para la fabricación de silicona y las dos partes del molde. Estos materiales se ven en la figura 3.5.



Figura 3.5: Todos los materiales de fabricación del eslabón.

El primer paso es verter los líquidos A y B en vasos distintos, con la misma dosificación, tal como se ve en la figura 3.6. Posteriormente, introducir ambos en la campana de vacío para deshacerme de las burbujas que aparecen. Esta parte tarda aproximadamente 15 minutos.

El fabricante Ecoflex de los líquidos A y B, explica que se tratan de siliconas de platino catalizado. Las gomas Ecoflex se mezclan 1A:1B en peso o en volumen. En mi caso lo he mezclado en función al



Figura 3.6: Dosificación de las partes A y B.

volumen, por eso he vertido la misma cantidad de silicona en los vasos. El fabricante comenta que la goma curada es muy blanda, muy resistente y muy elástica. Es capaz de estirarse varias veces su propio tamaño sin romperse y volver a su forma original.

La parte A se compone de polímeros de Siloxano, que son los polímeros de silicona que constituyen la base de la silicona. Y catalizador de Platino, que es un catalizador basado en platino que facilita la reacción de curado con la parte B.

La parte B se compone de polímeros de Siloxano similares a los de la parte A. Y reticuladores (crosslinkers), compuestos que reaccionan con el catalizador de platino de la parte A para formar una red tridimensional, transformando el material de un estado líquido a un estado sólido.

Tras sacar los dos vasos con el líquido de silicona de la campana de vacío. Se vierte el contenido de ambos en un tercer vaso. Se remueve durante 3 minutos con un palillo para asegurar una mezcla correcta y se introduce este vaso en la campana de vacío. El proceso de eliminación de burbujas de la mezcla se ve en la figura 3.7, tarda otros 15-20 minutos.

Finalmente, antes de volcar el contenido de la mezcla en el molde, se usa el spray Ease Release 200, que es un agente de desmoldeo para poder sacar el modelo del molde fácilmente. Se vuelca poco a poco el contenido de la mezcla en la tapa del molde. Se tapa con la base del mismo y se deja curar completamente. El proceso de cura completo tarda 1 hora y 20 minutos. En la figura 3.8 muestro el molde real.



Figura 3.7: Proceso de eliminación de burbujas.



Figura 3.8: Vertido de la mezcla en el molde.

3.2.3. Piezas de acople al motor

Para realizar los experimentos, a parte de usar los eslabones de silicona rellenos de materiales para realizar jamming, se usa un motor Dynamixel XM430-W350 y un puente de acople de motor de la empresa Robotis, FR12-H101K.

Para acoplar el eslabón al puente FR12-H101K, figura 3.9, he diseñado las piezas en Onshape y luego pego cada eslabón a su respectiva pieza con silicona. Como analizo tres tipos de jamming, he diseñado tres piezas de acople distintas.

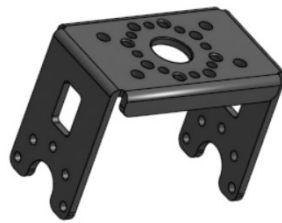


Figura 3.9: Puente FR12-H101K.

3.2.3.1. Jamming granular

Para este experimento he diseñado la pieza de la figura 3.10⁴. La idea es usar topes en forma de arcos, los suficientemente grandes y anchos para soportar las fuerzas externas que se generarán sobre el eslabón.

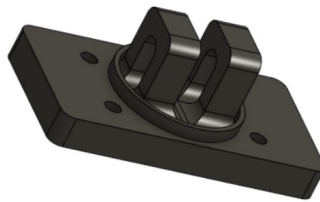


Figura 3.10: Acople de motor para jamming granular.

Esta base tiene una altura de 5mm. Esta pieza se ensambla con la pieza FR12-H101K usando 4 tornillos de metrica 3. He diseñado un anillo de 2mm de altura, y 0.8mm de ancho, para evitar el desborde de la silicona. Los arcos de soporte tienen un ancho de base de 5mm, un largo de base de 10mm y una altura final de 12mm.

Ninguna de estas medidas se ha tomado de forma aleatoria. La base del eslabón es de 19mm para que no colisione el anillo de rebose y el tornillo de ensamble. Estos 19mm ya delimitan el ancho y largo de la base del arco para evitar colisiones con el anillo de rebose. Los arcos tienen que soportar ciertas fuerzas y por tanto se les da un ancho considerable de 3mm en los pilares y 5mm en la zona superior.

En el anexo 2, se encuentra un boceto completo del diseño.

Por otro lado, utilizo una pieza externa, un cilindro, para conseguir el perfecto acople entre el

⁴Repositorio de: <https://cad.onshape.com/documents/3a792a80cfea153863157206/w/64e87cbd27abf2dabfc127be/e/18a12298fc552146d709731a>

eslabón y el acoplo. Este también está diseñado en Onshape, se muestra en la figura 3.11⁵.

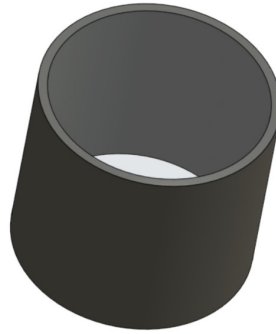


Figura 3.11: Cilindro de acoplo.

La idea de esta pieza es que sea una extensión del anillo de rebose de las bases de acoplo al motor. Se trata de una pieza con las mismas dimensiones que estos anillos, ancho de 0.8mm, diámetro 19mm y altura 18mm.

El resultado final se muestra en la figura 3.12. Donde se ve representado el sistema final, y el sistema final explosionado. Tras curarse la silicona me deshago del cilindro de acople para dejar al descubierto únicamente la silicona y comprobar el correcto funcionamiento a la hora de realizar los experimentos.

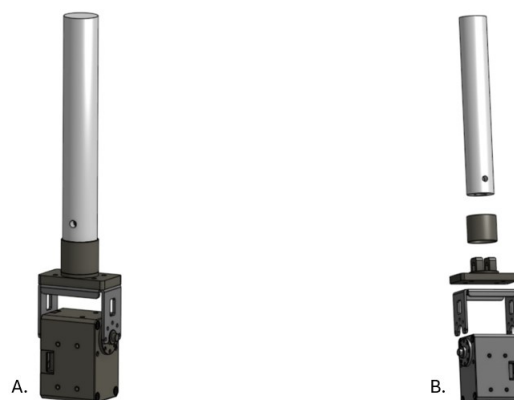


Figura 3.12: Ensamblaje completo del sistema: A. sistema final unido; B. sistema final explosionado.

⁵Repositorio de: <https://cad.onshape.com/documents/c8c2c0f4a223f8b73ace7336/w/0e5ba8632e43c3801ef5ad45/e/d0ba7d48a22eeb0c6f2fdd38>

3.2.3.2. Jamming tubular

Para este experimento se usan tubos de plástico cuadrados de 1.25 x 1.25 mm. Para hacer la pieza de acople he hecho un anillo con el diámetro del interior del eslabón donde pegaré con silicona los tubos. De la misma forma que mantengo el anillo de rebose del diámetro del eslabón con 2mm de alto y 1.8mm de ancho. Tal como se muestra en la figura 3.13⁶.

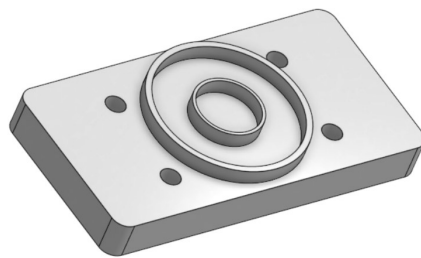


Figura 3.13: Acople de motor para jamming tubular.

En el anexo 3 se encuentra un boceto completo del diseño. El resultado final se muestra en la figura 3.14. Donde se ve representado el sistema final, y el sistema final explosionado.

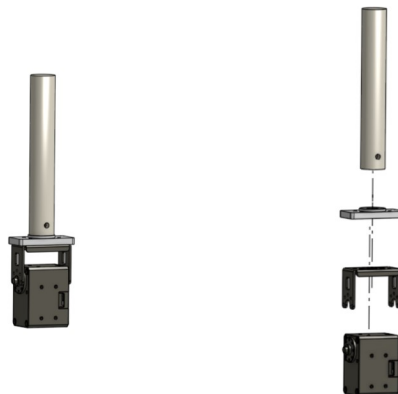


Figura 3.14: Ensamblaje completo del sistema: A. sistema final unido; B. sistema final explosionado.

3.2.3.3. Jamming laminar

A diferencia del acople anterior, donde el material para el jamming se introduce por un lado, y luego ya se acopla el eslabón. Para el experimento del jamming laminar he decidido imprimir las láminas en PLA. Esto supone, que a la hora de diseñar el acople del motor para el jamming laminar diseñe con él las láminas para realizar jamming.

⁶Repositorio de: <https://cad.onshape.com/documents/c06e3f17b7d7bd33bdce2711/w/7ef08258cc978447fb885495/e/ce92fd6184396009054f2830>

Sigo manteniendo el anillo para evitar el rebose de la silicona, de altura 2mm, ancho de 0.8mm y diámetro de 19mm. Las láminas diseñadas, se generan entorno al diámetro interior del eslabón. Con un ancho de 0.8mm, una distancia entre láminas de 0.4mm y altura de 120mm.

El resultado final se ve representado en la figura 3.15⁷. Donde se puede observar que han sido redondeados todos los bordes para obtener el mejor acabado posible con la impresora 3D.

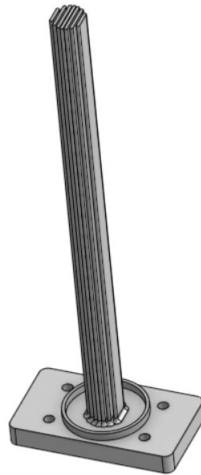


Figura 3.15: Acople de motor para jamming laminar.

En el anexo 4 se encuentra un boceto completo del diseño. El resultado final se muestra en la figura 3.16. Donde se ve representado el sistema final, y el sistema final explosionado.

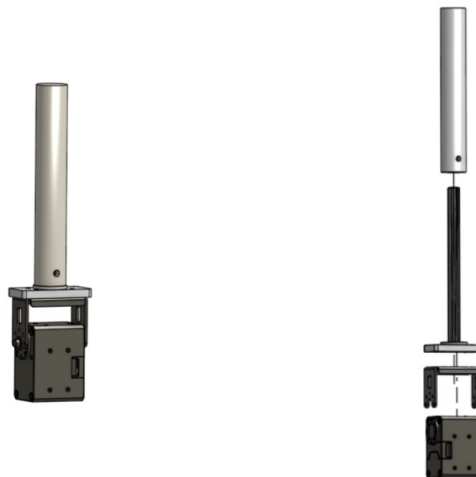


Figura 3.16: Ensamblaje completo del sistema: A. sistema final unido; B. sistema final explosionado.

⁷Repositorio de: <https://cad.onshape.com/documents/40fe70ee42877a8e290cde07/w/b28b60a8623aed1890ac99fc/e/90744182843ec004f8453a76>

3.2.4. Circuito neumático/electrónico

Para llevar acabo el experimento y poder realizar el vacío en el eslabón, diseño un circuito neumático. Este circuito se compone de una campana de vacío, una bomba de vacío KQ-1K, varios tubos de 6mm de diámetro, múltiples conectores de T, numerosas válvulas, un sensor de presión de vacío y finalmente el eslabón. Por otro lado, el circuito también tiene parte de circuitería electrónica para comunicarse con los sensores y el motor. La parte electrónica el circuito se compone por dos placas ESP32, un sensor de fuerza, un sensor de presión, una electroválvula, un relé, un motor Dynamixel y un ordenador que controla todo. El diseño del circuito completo se muestra en la figura 3.17.

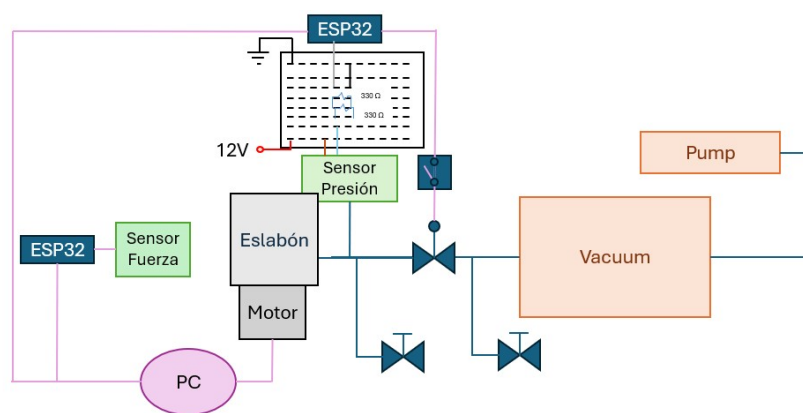


Figura 3.17: Diseño del circuito completo.

En la figura 3.17 se aprecia cómo dentro del circuito neumático se encuentran tres válvulas, dos válvulas manuales de desahogo para deshacer el vacío tanto en todo el circuito como solo en la zona del eslabón. Para comunicar la bomba de vacío con el eslabón he usado una electroválvula para un control más preciso. La electroválvula usa un voltaje de alimentación de 12V y una corriente de 0 a 330mA. La corriente de comienzo es del 50%.

El motor se alimenta con una fuente de alimentación de 12V. Para su control he usado librerías de ROS de un repositorio de Github⁸. Con el uso de estas librerías lanzo un nodo de publicación con el que controlo la velocidad de giro del motor en función a un duty-cycle (PWM).

Por otro lado, está el sensor de fuerza, realizado por otro proyecto. Se trata de un sensor que mide la fuerza en newtons (N), en los 3 ejes cartesianos. El control del sensor se realiza a través de ROS usando las librerías subidas en un repositorio de Github⁹. El sensor se puede tarar en cualquiera de los ejes en cualquier momento mediante el lanzamiento del nodo “Tare” del repositorio. A su vez encontramos los comandos para la lectura de las fuerzas que se aplican sobre el sensor usando un

⁸Repositorio de: https://github.com/TaISLab/dynamixel_ros_library

⁹Repositorios de: https://github.com/Robotics-Mechatronics-UMA/force_sensor_3D

“rostopic echo”.

Por último, está el sensor de presión, se trata de un sensor de presión de vacío. Con una alimentación de 8-30 V. Como el resto de componentes trabaja a 12V. Da una salida entre 4 a 20mA.

Para obtener los valores de lectura uso un ESP32. Los valores se leen en voltios (V). El rango de medida va de 1bar a -1bar, pero mi rango de trabajo va de 0bar a -0.8bar, por tanto, el voltaje de salida se encuentra entre 2V a 0.8V. El ESP traduce la lectura de los datos de voltaje a un valor asignado entre 0 y 4095. Donde 0V se corresponde a 0, y 3.3V se corresponde a 4095. Como la ESP32 no permite una entrada de voltaje superior a 3.3V, hago un circuito eléctrico con una resistencia de 165Ω (ley de Ohm: $3.3V/0.02A$). En mi caso en lugar de usar una resistencia de 165Ω , he usado dos resistencias en paralelo de 330Ω .

Para la conexión del sensor a el ESP uso un conector circular. Este conector tiene 4 pines distintos, los cuales según la hoja de especificaciones se conectan de la siguiente forma:

- Conector marrón: Alimentación
- Conector azul: Tierra
- Conector blanco y negro: No utilizados

En la figura 3.18 se muestra un esquema más en detalle de la conexión del ESP32, el relé para el control de la electroválvula y el sensor de presión.

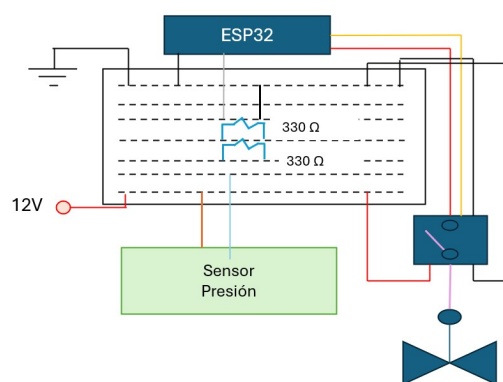


Figura 3.18: Circuito eléctrico: ESP32, relé, electroválvula, sensor de presión.

El ESP32 que controla la electroválvula y la que realiza la lectura del sensor de vacío es el mismo. Este ESP lo he programado usando Arduino, sin embargo su implementación final la he hecho en ROS. Lo he programado de forma que genere: un *publisher* para la lectura del sensor de vacío; y un

subscriber para realizar el control de apertura y cierre de la electroválvula.

El circuito final queda tal como se muestra en la figura 3.19.

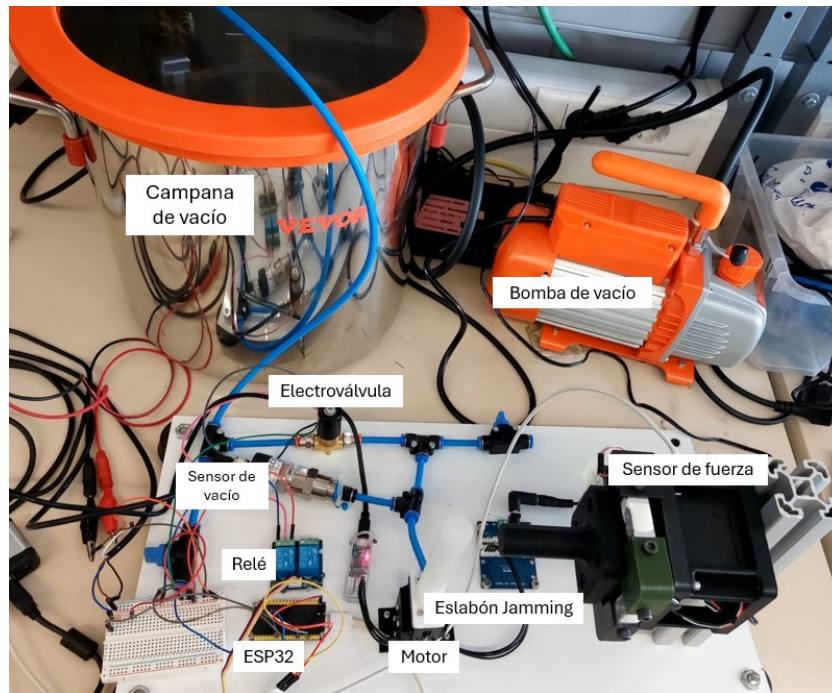


Figura 3.19: Circuito completo montado en el laboratorio.

Experimentos y resultados

Contenido

4.1. Entorno experimental	27
4.2. Experimento 1	28
4.3. Experimento 2	29
4.4. Experimento 3	30
4.5. Experimento 4	32

En este capítulo me adentro finalmente a explicar el entorno experimental con el que he trabajado. A la vez expongo los experimentos realizados con cada uno de los tipos de jamming. Además de apoyarlo con los resultados obtenidos.

4.1. Entorno experimental

El entorno experimental del proyecto se basa en el circuito neumático/electrónico explicado en el capítulo 3. Además, uso un ordenador para comunicarme con el sistema y obtener las lecturas de los sensores. El ordenador se encarga por un lado de mandar la orden de giro y velocidad de giro del motor, en mi caso he hecho que gire con un PWM del 10 %. Por otro lado, se encarga de mandar la señal de control de apertura o cierre de la electroválvula que conecta el eslabón con la campana de vacío. A la vez que se suscribe a los ‘rostopics’ para obtener la lectura en newtons de los 3 ejes cartesianos del sensor de fuerza, la lectura digital de la salida en voltios del sensor de vacío y también obtiene la lectura de posición del motor.

El control del sistema se realiza dentro de la infraestructura de ROS. ROS facilita la comunicación entre los distintos componentes del sistema. El control del motor lo realizo mediante una librería instalada desde Github ¹. Por otro lado, también obtengo por Github² el nodo de comunicación para el sensor de fuerza . El control de la electroválvula y del sensor de vacío se realiza a través de un paquete que contiene el código de Arduino que he escrito yo, y un fichero .launch. El roslaunch se utiliza para inicializar varios nodos ROS de forma local y remota, además sirve para configurar parámetros en el servidor de parámetros.

A continuación, procedo a explicar los cuatro experimentos que he realizado. Cada uno de los experimentos lo he realizado con cada uno de los distintos tipos de jamming (tubular, laminar y granular).

4.2. Experimento 1

Este primer experimento se basa en ver el tiempo que tarda en realizarse el vacío en cada uno de los tipos de jamming. Para ello, realizo vacío en la campana de vacío hasta -0.8bar. Usando ROS me conecto al nodo del ESP32 que se encarga de la lectura del sensor de vacío y la escritura de la electroválvula. Mando un comando para mantener cerrada la electroválvula que comunica el resto del circuito con la campana de vacío, mientras se este llegando a -0.8bar en la campana de vacío. A continuación, comienzo la lectura de los datos del sensor de vacío. Usando el comando 'rosbag' guardo los datos de lectura desde este punto hasta que se produce el vacío. Procedo a abrir la electroválvula.

En la figura 4.1 muestro una gráfica con los resultados de realizar el experimento de vacío en cada uno de los tipos de jamming. A primera vista no se puede observar una gran diferencia entre los tres tipos. Cada uno empieza con una presión alrededor de los 0bar y llegan a una presión cercana a los -0.8bar. Se pueden identificar los tres tipos de jamming: el jamming laminar en azul, el jamming tubular en amarillo, y jamming granular en rojo.

En base a la gráfica obtengo los resultados reflejados en la tabla 4.1.

Tipo de Jamming	Pendiente	Tiempo (s)
Laminar	-3.3432	0.19
Granular	-5.0452	0.126
Tubular	-5.4232	0.125

Tabla 4.1: Tabla de resultados de realizar vacío.

¹Repositorio de: https://github.com/TaISLab/dynamixel_ros_library

²Repositorio de: https://github.com/Robotics-Mechatronics-UMA/force_sensor_3D

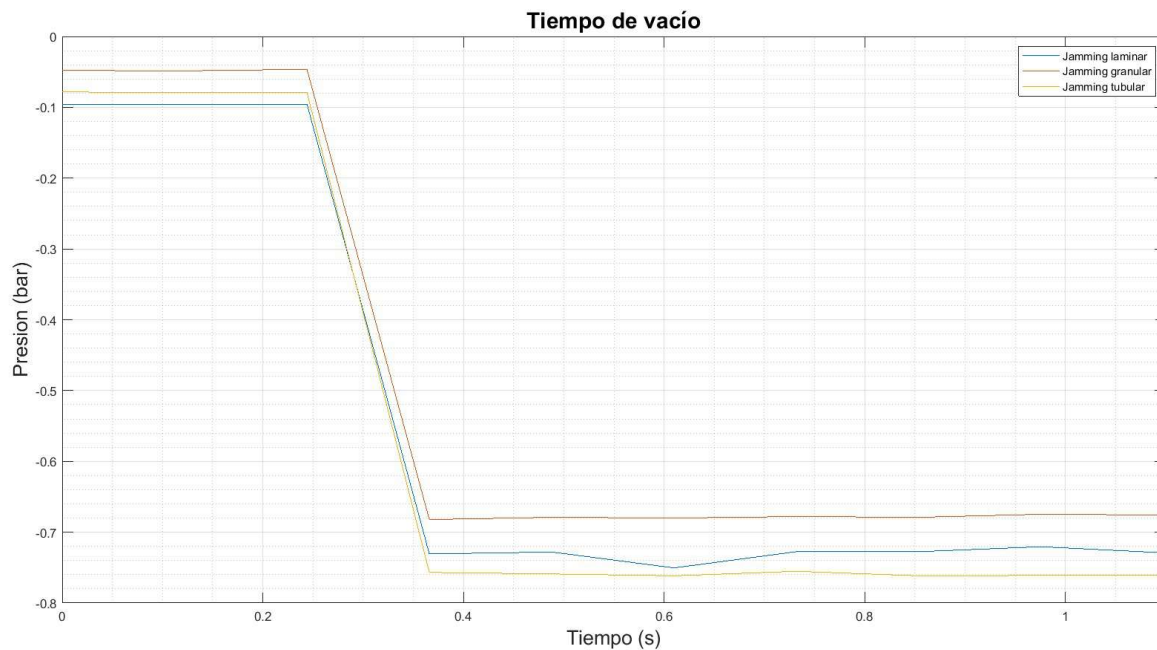


Figura 4.1: Resultado del experimento 1: Tiempo tardado en realizar vacío en cada tipo de Jamming.

Las pendientes son negativas porque al tomar dos puntos de la recta vamos desde un valor de 0 a -0.8. Lo que determino en este caso es que el jamming tubular es el más rápido en hacer vacío ya que tiene una mayor pendiente. Específicamente tarda 0.125 segundos. El más lento con diferencia es el jamming laminar al tener la menor pendiente. Específicamente, tarda 0.19 segundos en realizar vacío.

No he hecho un experimento que calcule el tiempo que se tarda en deshacer el vacío, porque para eso necesito como válvula de desahogo una electroválvula para así tener un mayor control en el cálculo.

4.3. Experimento 2

Este experimento es una simple comparativa de los tres tipos de cilindros de jamming. Donde tomo cada uno de los cilindros sin hacer vacío y observo la caída de cada uno ante una hoja milimetrada.

En la figura 4.2 muestro los tres distintos cilindros fabricados, rellenos delante de una hoja milimetrada. Se puede observar cómo el cilindro menos rígido es el de jamming granular. Esto se debe a que no tiene una estructura interna definida, los gránulos pueden posicionarse como quieran. En comparación, el cilindro de jamming laminar es prácticamente recto. Esto se debe a que las láminas actúan como columna vertebral. En el caso del jamming tubular, se aprecia una caída y, por tanto, una cierta falta de rigidez, pero los tubos internos sí le dan cierta estructura.

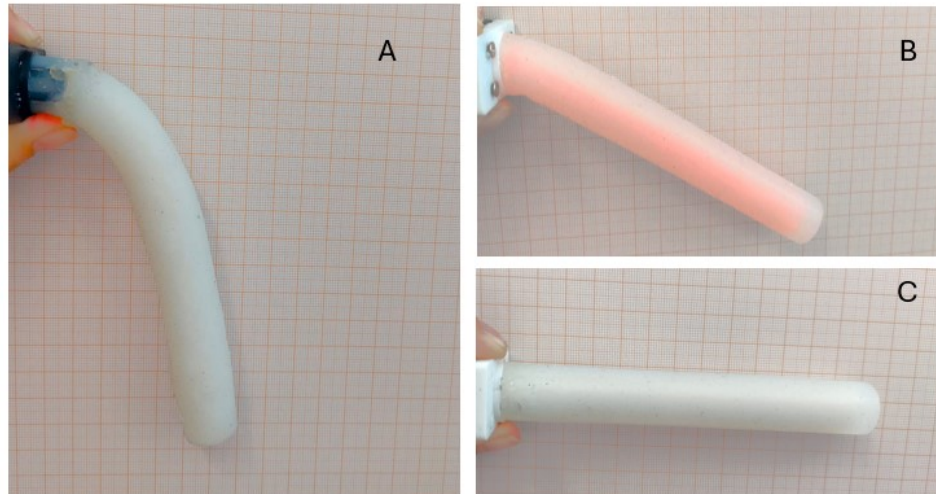


Figura 4.2: Tres distintos cilindros de jamming: A. Jamming Granular; B. Jamming Tubular; C. Jamming Laminar.

El comportamiento de los eslabones tras realizar jamming se muestra en el experimento 4.

4.4. Experimento 3

En este experimento el objetivo es obtener los datos necesarios para analizar la rigidez del eslabón antes de realizar el vacío. Los datos indican los grados de movimiento. En la figura 4.3, se puede observar la gráfica de posición frente a tiempo de cada tipo de jamming.

Se puede observar claramente cómo hay una diferencia abismal entre el jamming laminar y los otros dos tipos. En la prueba con jamming laminar, el motor solo se mueve 20 grados porque cuando llega a tocar con el sensor de fuerza no se mueve más allá de ese punto. Mientras en las pruebas con jamming granular y tubular, los cilindros no son tan rígidos y, por tanto, cuando tocan con el sensor de fuerza, no se frena el motor y sigue girando hasta tocar la mesa. He subido un vídeo en el que se muestran los experimentos 3 y 4 con todos los eslabones antes y después del jamming³

Por otro lado hago la lectura de los datos del sensor de fuerza. En la figura 4.4 se muestra una gráfica de fuerza frente a tiempo de cada tipo de jamming.

³Vídeo: https://www.youtube.com/watch?v=R_U-xz0WvjY

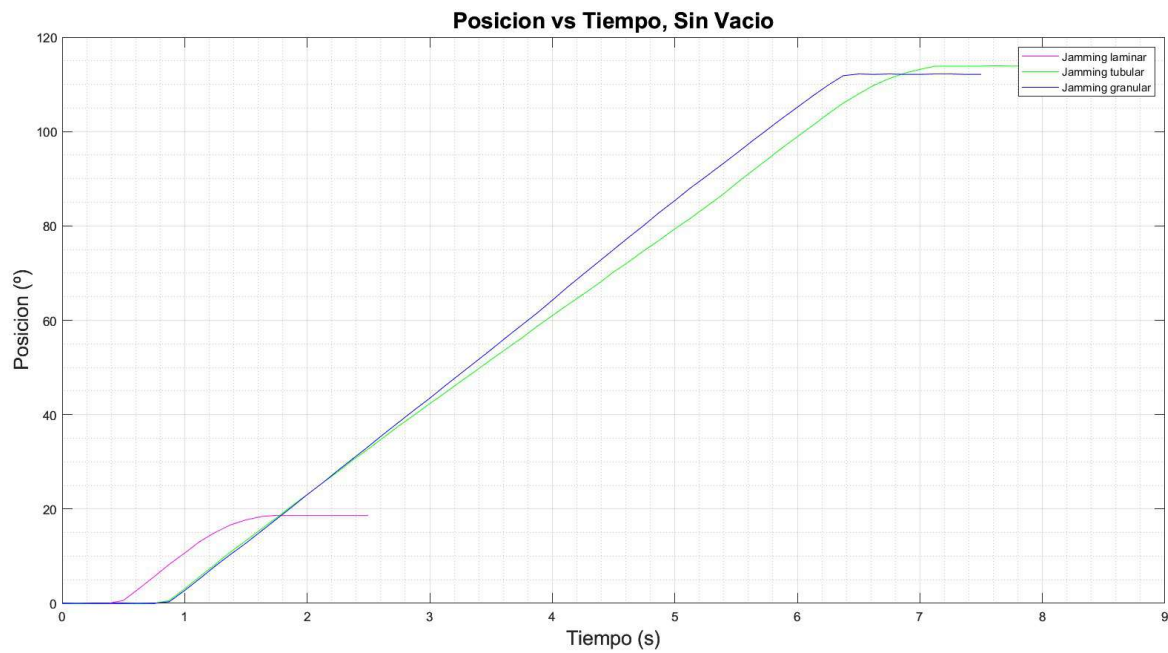


Figura 4.3: Gráfica Posición vs Tiempo en Jamming sin vacío

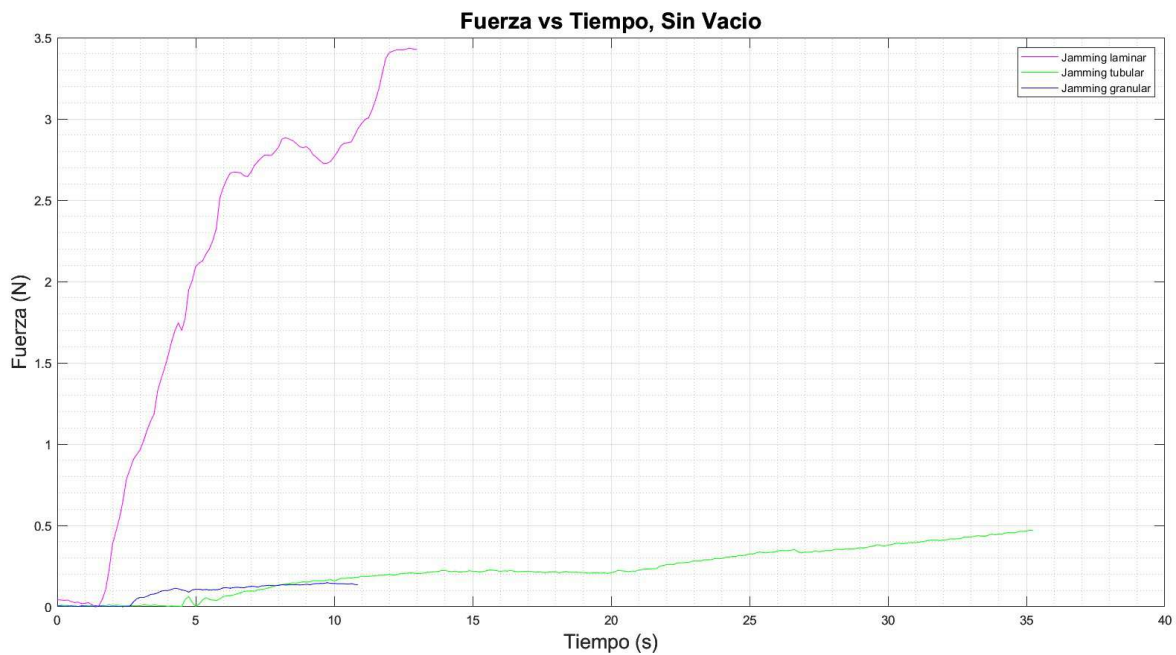


Figura 4.4: Gráfica Fuerza vs Tiempo en Jamming sin vacío

Como se puede observar en la gráfica, la prueba de jamming laminar es la que genera una mayor fuerza, un poco por encima de 3.4N. Mientras se observa cómo, en el caso de jamming granular, apenas genera una fuerza superior a 0.1N. Y el jamming tubular llega un poco por debajo de los 0.5N. Era un resultado a esperar, después de ver en la gráfica 4.3, cómo el motor ha girado sin apenas

frenarse ante el sensor de fuerza en el caso del jamming granular y tubular.

Finalmente en la figura 4.5 muestro una gráfica de fuerza frente a posición. Donde cuanto mayor sea la pendiente, mayor rigidez ha presentado el cilindro de jamming.

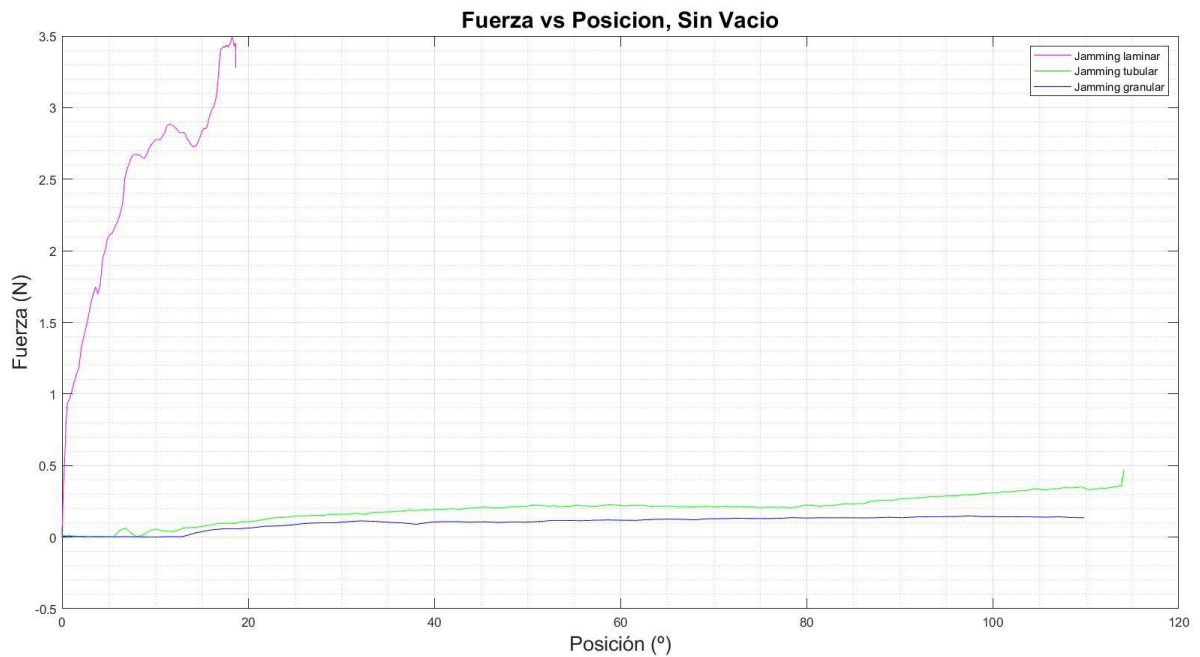


Figura 4.5: Gráfica Fuerza vs Posición en Jamming sin vacío

El resultado en esta gráfica pone en conjunto lo anteriormente discutido. En la prueba de jamming laminar se demuestra una mayor rigidez ya que la posición del motor no varía más de 20 grados y da una mayor fuerza. Se ve una gran diferencia con los otros dos tipos de jamming. En el caso del jamming tubular tiene un poco más de pendiente que el jamming granular, ya que ejerce una mayor fuerza sobre el sensor de fuerza. En la prueba de jamming granular se aprecia una pendiente muy pequeña. Todo acorde con lo esperado viendo las anteriores gráficas.

4.5. Experimento 4

En este experimento el objetivo es obtener los datos necesarios para analizar la rigidez del eslabón tras realizar jamming. Con ese fin, primero hago el vacío en el eslabón usando la campana de vacío hasta llegar a -0.8bar. Y de la misma forma que en el anterior experimento, me conecto a los nodos que permiten la lectura y escritura sobre el motor y el sensor de fuerza.

Así pues, envío una orden de giro del 10% al motor, a la vez que guardo los datos de movimiento del motor. Con estos datos obtengo la gráfica de la figura 4.6, donde muestro posición frente a tiempo.

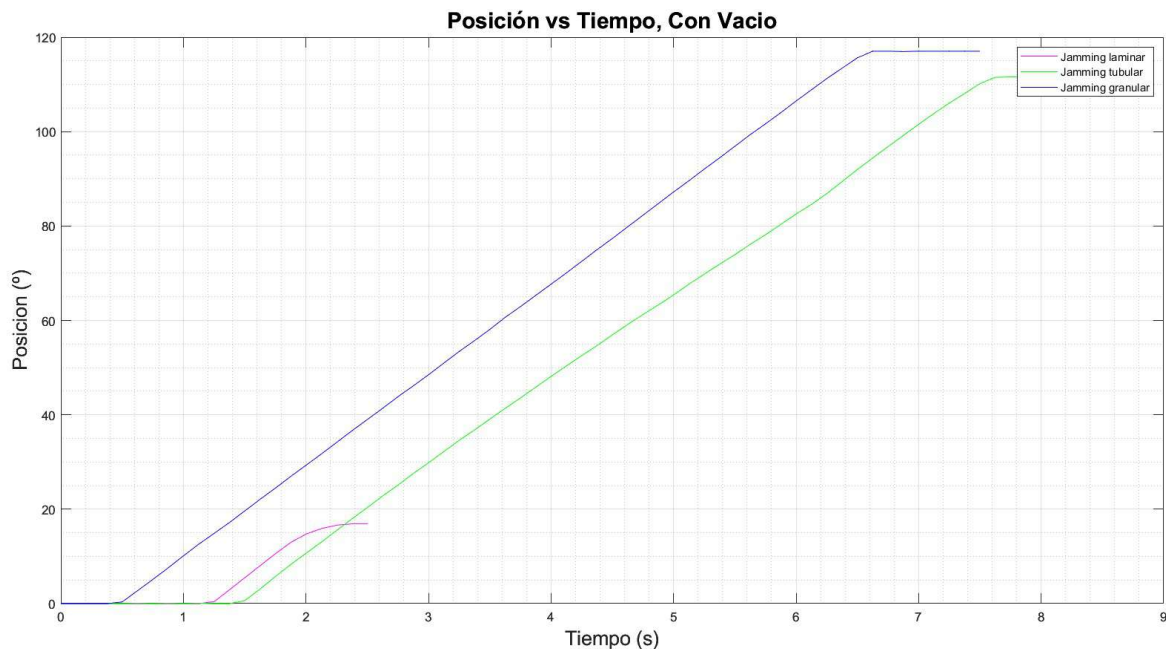


Figura 4.6: Gráfica Posición vs Tiempo en Jamming con vacío

Se pueden apreciar unos resultados muy parecidos a los obtenidos en el experimento anterior. Una gran diferencia entre el rango de movimiento del jamming laminar y los otros dos.

Por otro lado hago la lectura de los datos del sensor de fuerza. Las lecturas de los datos las guardo usando 'roscop'. Con estos datos obtengo la gráfica de fuerza frente a tiempo representada en la figura 4.7.

Como se puede observar, vuelven a ser unos resultados muy parecidos a los obtenidos en el anterior experimento. Donde se muestra que el cilindro de jamming laminar genera una mayor fuerza sobre el sensor de fuerza que el jamming granular o tubular. Sin embargo, en este experimento se puede observar que el cilindro de jamming tubular genera una mayor fuerza que en el anterior experimento, ya que genera una fuerza superior a 0.6N.

Finalmente, con los datos obtenidos, reproduzco una gráfica de fuerza frente a posición, mostrada en la figura 4.8.

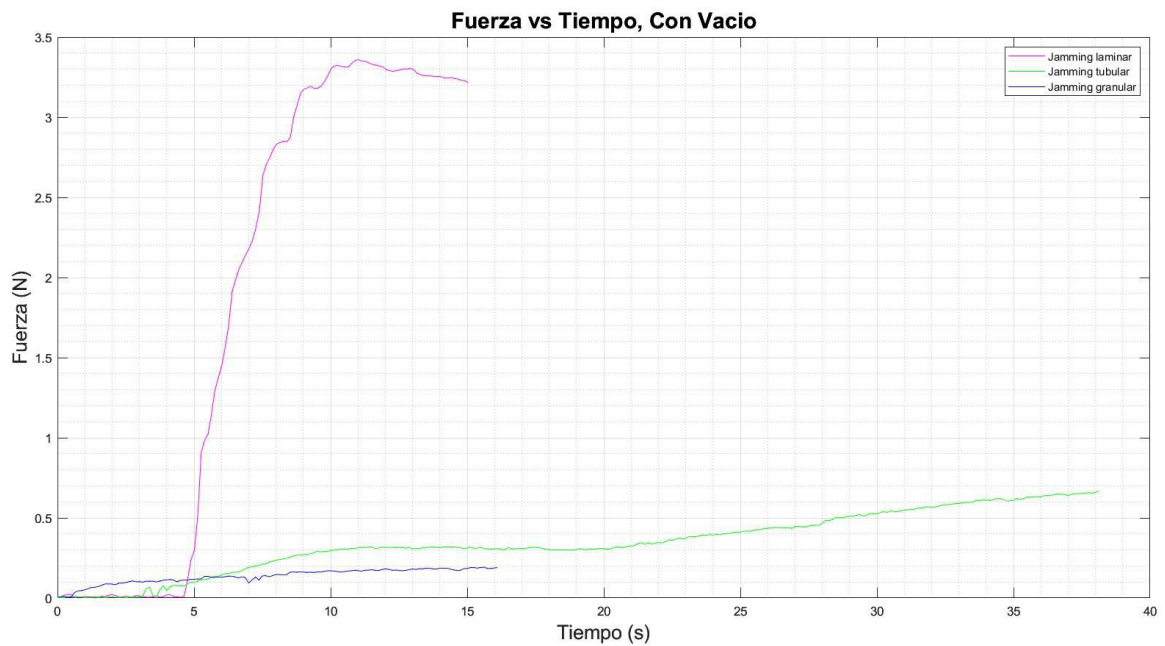


Figura 4.7: Gráfica Fuerza vs Tiempo en Jamming con vacío

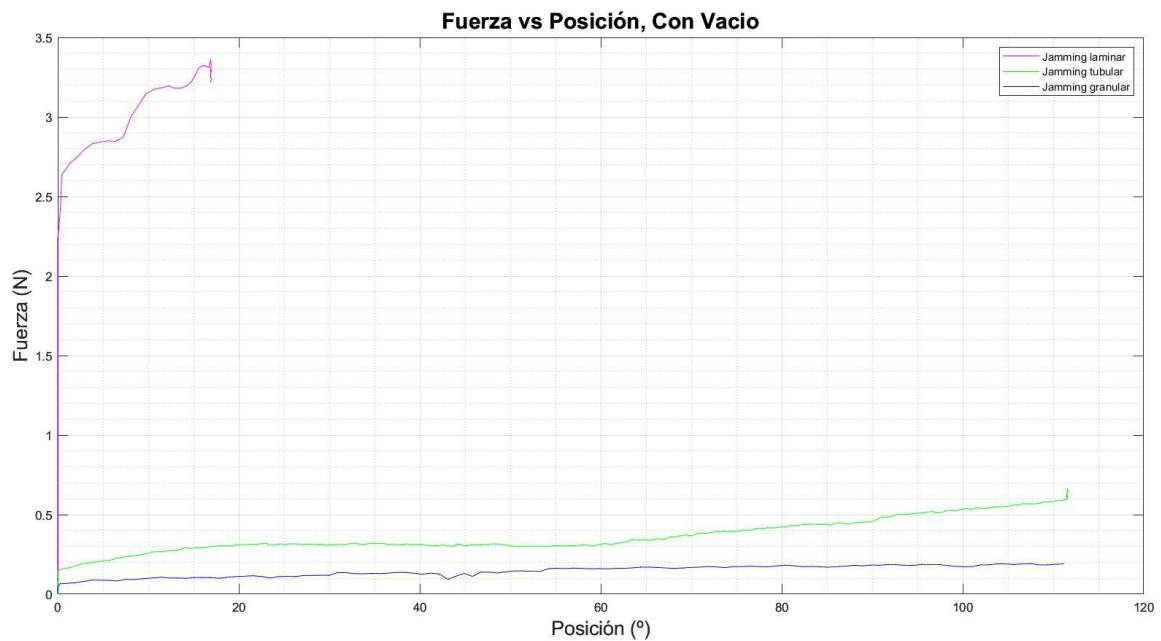


Figura 4.8: Gráfica Fuerza vs Posición en Jamming con vacío

Aquí se puede observar cómo la gráfica con mayor pendiente es la que pertenece al tipo de jamming con mayor rigidez. Los resultados obtenidos en esta gráfica son de esperar, conociendo los datos del anterior experimento y los obtenidos en las gráficas de posición vs tiempo y fuerza vs tiempo. Se muestra una alta rigidez en el jamming laminar, el cual tiene menor rango de movimiento

y genera mayor fuerza. Posteriormente, en el caso del jamming tubular, se observa una mayor rigidez que en el jamming granular, ya que tiene una mayor pendiente, porque genera más fuerza.

Como se ve en las gráficas, los resultados son muy parecidos a los del experimento 3. Esto es malo, ya que significa que al hacer Jamming no surge ningún efecto. En la discusión de resultados y la conclusión, explico las razones y cómo se podría mejorar.

Discusión de resultados

Este capítulo está dedicado a realizar un análisis más a fondo de los resultados obtenidos. La idea es comprender el significado de los datos obtenidos.

En el experimento 1, he observado el tiempo que tarda cada tipo de cilindro de jamming en realizar jamming. Es decir, cuanto se tarda en realizar el vacío en cada tipo. El resultado obtenido es que el jamming laminar es el que más tarda. El cual tarda 0.19 segundos. Mientras el jamming tubular y granular tardan 0.125 y 0.126 segundos respectivamente. Esto se debe probablemente a la cantidad de relleno que tienen cada uno. El cilindro laminar tiene menos relleno respecto al del cilindro granular o tubular. Lo cual provoca que tarde más en realizarse el vacío.

En el experimento 2, me he dedicado a observar la diferencia de la rigidez de cada uno de los cilindros antes de realizar jamming. Se observa claramente, en la figura 4.3, cómo el cilindro más rígido es el relleno de láminas. Y el menos rígido, el relleno de gránulos. Esto se debe a que el cilindro granular no tiene una estructura definida, ya que los gránulos se distribuyen como quieren. Mientras que en el cilindro de jamming tubular y laminar se puede observar una clara estructura recta. En el caso del jamming tubular se ve una mayor caída que en el jamming laminar, porque los tubos son más maleables que las láminas.

Esta diferencia de rigidez se nota en los experimentos 3 y 4. Hay una diferencia muy clara y grande entre los resultados obtenidos en el caso de jamming laminar frente a los resultados obtenidos con el jamming granular y tubular. Debido a que el jamming laminar tiene una estructura más firme, presenta una mayor rigidez. Esto hace que el rango de movimiento del motor sea menor respecto a los otros, 20 grados. Y además, genere más fuerza, casi 3.5N.

Mientras, claramente se observa un rango de movimiento de 120 grados en el caso del jamming granular y tubular. Además, ninguno de los dos ejerce una fuerza superior a 1N sobre el sensor de fuerza. Esto se cumple tanto antes como después de realizar jamming.

Sin embargo, en el jamming tubular se ve un claro aumento de la rigidez tras realizar jamming. Esto se observa si se comparan las figuras de fuerza vs tiempo (figura 4.5 y 4.8). Donde se ve como sin jamming, el cilindro tubular ejerce una fuerza algo por debajo de los 0.5N. Mientras, tras realizar jamming ejerce una fuerza superior a 0.6N. Esto también se observa al comparar las gráficas de fuerza vs posición (figuras 4.6 y 4.9).

Con estos resultados, puedo concluir que en el caso de mis experimentos, el jamming genera un claro efecto sobre el relleno tubular. Esto no quiere decir que no genere ningún efecto sobre el jamming granular o laminar. De hecho, hay que fijarse mucho, pero el jamming también provoca un efecto de mayor rigidez sobre el jamming granular. Se puede observar que hay un aumento en la fuerza que genera. Antes de realizar jamming, el relleno granular ejerce una fuerza de apenas 0.135N. Mientras que tras realizar jamming, ejerce una fuerza de 0.18N.

En el caso del jamming laminar, ciertamente no se pueden observar diferencias antes o después de realizar jamming. Esto se debe a cómo he diseñado el relleno. En mi diseño he dejado un espacio muy pequeño entre las láminas. Además, el propio hecho de usar láminas ya da una alta rigidez a la estructura. Es muy posible que si hubiese usado una orientación distinta de las láminas o un mayor espacio entre estas, hubiese obtenido resultados distintos. Si en lugar de orientar las láminas en perpendicular al sensor de fuerza, las hubiera orientado en paralelo, podría haber un mayor rango de movimiento en el motor y menor fuerza ejercida sobre el sensor de fuerza. Además de que se podría observar una cierta diferencia entre realizar o no jamming, ya que las láminas se juntarían más, al tener más espacio de movimiento entre ellas.

Conclusión

En este capítulo final resumo lo que he hecho a lo largo del proyecto. Además, discuto los resultados y conclusiones que obtengo del proyecto. Finalmente, hago una contemplación de las futuras líneas de investigación que pueden surgir en base a este proyecto.

6.1. Conclusión

En este proyecto me he dedicado a la investigación de los distintos proyectos de “Soft Robotics”. Adentrándome en la línea de investigación de la robótica blanda. He estudiado los distintos tipos de proyectos y técnicas de desarrollo de la rigidez variable. Centrándome en las técnicas de jamming.

Como he explicado, hay tres tipos de jamming: el jamming granular, el jamming tubular y el jamming laminar. Como parte de mi proyecto he desarrollado tres cilindros de silicona, con distintos rellenos para poder estudiar cada uno de los tipos de jamming. He montado un circuito neumático/-electrónico para poder realizar jamming en los cilindros, y poder obtener datos útiles para el estudio. En mi circuito se puede destacar la presencia de una campana de vacío, una bomba de vacío, un motor Dynamixel, una electroválvula, un relé, un sensor de vacío, un sensor de fuerza y placas ESP32 para el control y lectura de los componentes.

He realizado cuatro experimentos. Cada uno de ellos destinado a analizar las distintas características de los cilindros. Los resultados de estos experimentos me han llevado a entender:

- En primer lugar, la cantidad de relleno hace una diferencia en el tiempo de realización del jamming. Cuanto más relleno tenga menor espacio hay, llevando a que tarde menos en realizarse

jamming.

- En segundo lugar, el tipo de relleno es de gran importancia. En el caso de tener láminas, se obtiene una estructura fija y rígida. En el caso de usar gránulos la estructura es laxa lo cual afecta a la hora de obtener rigidez. También, se debe tener en cuenta que cuanto menor sea el tamaño de los gránulos, más laxa es la estructura.
- En el caso del jamming tubular se observa un efecto notable y positivo al realizar jamming. Ya que tras realizar jamming obtengo una mayor rigidez que se nota al estudiar la fuerza que se genera sobre el sensor de fuerza.
- El jamming laminar nos proporciona una estructura muy firme y rígida y claramente poco moldeable. Posiblemente si se usa un tipo de material distinto se podría obtener mayor maleabilidad.
- El jamming granular nos proporciona una estructura altamente maleable pero muy poco rígida. Quizás se necesite una columna interior para dar mayor firmeza al sistema.
- En los resultados finales no es muy visible. Sin embargo, a lo largo de los distintos experimentos que he realizado he tenido problemas para mantener el vacío en los cilindros. Esto se debe a que los tubos que he usado en el circuito neumático son muy rígidos y al girar el motor se salían de los cilindros.

6.2. Líneas futuras

En este ultimo apartado me gustaría hablar de las posibles líneas futuras que pueden surgir de mi proyecto.

- Análisis de la variación en los resultados al usar mayor o menor cantidad de relleno. Observar no sólo cómo una mayor cantidad de relleno afecta al tiempo de realización de jamming. Si no también si afecta a la fuerza que ejerce.
- Estudio del uso de distintos tipos de rellenos en cada tipo de jamming. Por ejemplo, la diferencia entre usar granos de café, arena o virutas de cristal.
- Análisis de la variación en los resultados según el alto y ancho de los cilindros. Es posible que si se hacen cilindros más anchos y cortos presenten mayor rigidez. O si se hacen cilindros con un grosor de silicona menor también se observen diferencias en los resultados.
- Estudio de cómo afecta el uso de distintos grados de vacío. Puede ser que si en lugar de llegar hasta los -0.8bar se llegue a -0.4bar se observe una fuerza aplicada distinta o no.

- Estudiar los posibles puntos de ruptura de los eslabones. Si en lugar de dar al motor un PWM de giro del 10 %, fuera del 60 % podrían haberse partido las láminas del cilindro de jamming laminar.
- Investigación sobre una mejor estructura para el uso de jamming granular. Hay muchos estudios de uso de grippers de jamming granular donde se observa su utilidad. Sería interesante investigar otros diseños de eslabones para mejorar el rendimiento del cilindro de jamming granular que he diseñado.
- Aumento y mejora del circuito neumático/electrónico. Se podría hacer uso de tubos neumáticos más flexibles, o el uso de un mayor número de electroválvulas para un mayor control. Por ejemplo, usar una electroválvula para el desahogo del cilindro, así se podría analizar el tiempo que tarda en deshacerse el vacío en los cilindros.
- Modelar el comportamiento del sistema. Determinar que tipo de sistema es, si es de primer o segundo grado.

Bibliografía

- [1] A. Das and M. Nabi, “A review on soft robotics: Modeling, control and applications in human-robot interaction,” in *2019 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, 2019, pp. 306–311.
- [2] Y. Jiang, D. Chen, C. Liu, and J. Li, “Chain-like granular jamming: A novel stiffness-programmable mechanism for soft robotics,” *Soft Robotics*, vol. 6, no. 1, p. 118–132, Feb 2019.
- [3] Y. Wei, Y. Chen, T. Ren, Q. Chen, C. Yan, Y. Yang, and Y. Li, “A novel, variable stiffness robotic gripper based on integrated soft actuating and particle jamming,” *Soft Robotics*, vol. 3, no. 3, pp. 134–143, 2016.
- [4] Y. Deng, D. Pan, and Y. Jin, “Jamming is a first-order transition with quenched disorder in amorphous materials sheared by cyclic quasistatic deformations,” *Nature Communications*, vol. 15, no. 1, Aug 2024.
- [5] H. A. Makse, D. L. Johnson, and L. M. Schwartz, “Packing of compressible granular materials,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, pp. 4160–4163, May 2000. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.4160>
- [6] C. S. O’Hern, L. E. Silbert, A. J. Liu, and S. R. Nagel, “Jamming at zero temperature and zero applied stress: The epitome of disorder,” *Physical Review E*, vol. 68, no. 1, Jul 2003.
- [7] A. J. Liu and S. R. Nagel, “The jamming transition and the marginally jammed solid,” *Annual Review of Condensed Matter Physics*, vol. 1, no. 1, p. 347–369, Aug 2010.
- [8] M. van Hecke, “Jamming of soft particles: Geometry, mechanics, scaling and isostaticity,” *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 22, no. 3, p. 033101, Dec 2009.
- [9] D. Pan, Y. Wang, H. Yoshino, J. Zhang, and Y. Jin, “A review on shear jamming,” *Physics Reports*, vol. 1038, p. 1–18, Nov 2023.
- [10] G. Parisi and F. Zamponi, “Mean-field theory of hard sphere glasses and jamming,” *Reviews of Modern Physics*, vol. 82, no. 1, p. 789–845, Mar 2010.

- [11] P. Charbonneau, J. Kurchan, G. Parisi, P. Urbani, and F. Zamponi, “Glass and jamming transitions: From exact results to finite-dimensional descriptions,” *Annual Review of Condensed Matter Physics*, vol. 8, no. 1, p. 265–288, Mar 2017.
- [12] G. Parisi, P. Urbani, and F. Zamponi, *Theory of Simple Glasses: Exact Solutions in Infinite Dimensions*. Cambridge University Press, 2020.
- [13] *Wikipedia*, Aug 2024. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Jamming_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Jamming_(physics))
- [14] D. Vigil, “The jamming transition in granular materials,” 2008.
- [15] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier, and I. D. Walker, “Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research,” *Penn State*, Mar 2008. [Online]. Available: <https://pure.psu.edu/en/publications/soft-robotics-biological-inspiration-state-of-the-art-and-future->
- [16] C. Majidi, “(pdf) soft robotics: A perspective—current trends and prospects for the future,” *Soft robotics*, 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/275605108_Soft_Robotics_A_Perspective-Current_Trends_and_Prospects_for_the_Future
- [17] D. Rus and M. T. Tolley, “Design, fabrication and control of soft robots,” *Nature*, vol. 521, no. 7553, p. 467–475, May 2015.
- [18] A. Chen, R. Yin, L. Cao, C. Yuan, H. Ding, and W. Zhang, “Soft robotics: Definition and research issues,” *2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, Nov 2017.
- [19] S. Terrile, “Soft robotics: Applications, design and control,” Ph.D. dissertation, 2022.
- [20] B. Zhang, Y. Fan, P. Yang, T. Cao, and H. Liao, “Worm-like soft robot for complicated tubular environments,” *Soft Robotics*, vol. 6, no. 3, p. 399–413, Jun 2019.
- [21] S. Rozen-Levy, W. Messner, and B. A. Trimmer, “The design and development of branch bot: A branch-crawling, caterpillar-inspired, soft robot,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 40, no. 1, p. 24–36, May 2019.
- [22] T. Li, K. Nakajima, M. Calisti, C. Laschi, and R. Pfeifer, “Octopus-inspired sensorimotor control of a multi-arm soft robot,” *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Aug 2012.
- [23] S. Mao, E. Dong, S. Zhang, M. Xu, and J. Yang, “A new soft bionic starfish robot with multi-gaits,” *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Jul 2013.
- [24] W. McMahan, V. Chitrakaran, M. Csencsits, D. Dawson, I. Walker, B. Jones, M. Pritts, D. Dienno, M. Grissom, and C. Rahn, “Field trials and testing of the octarm continuum manipulator,” *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, 2006.

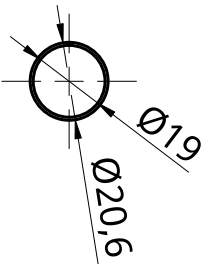
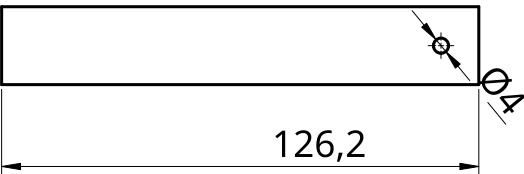
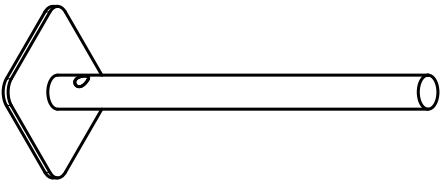
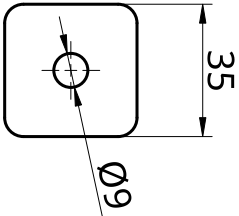
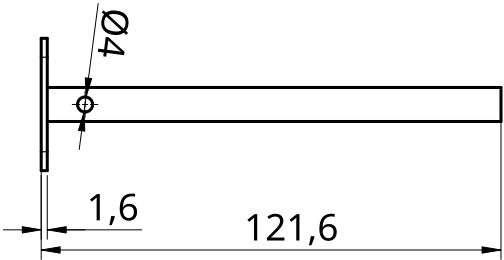
- [25] M. Rolf and J. J. Steil, "Constant curvature continuum kinematics as fast approximate model for the bionic handling assistant," *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct 2012.
- [26] W. McMahan, B. Jones, and I. Walker, "Design and implementation of a multi-section continuum robot: Air-octor," *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005.
- [27] E. T. Roche, M. A. Horvath, I. Wamala, A. Alazmani, S.-E. Song, W. Whyte, Z. Machaidze, C. J. Payne, J. C. Weaver, G. Fishbein, and et al., "Soft robotic sleeve supports heart function," *Science Translational Medicine*, vol. 9, no. 373, Jan 2017.
- [28] T. Shahid, D. Gouwanda, S. G. Nurzaman, and A. A. Gopalai, "Moving toward soft robotics: A decade review of the design of hand exoskeletons," *Biomimetics*, vol. 3, no. 3, p. 17, Jul 2018.
- [29] J. Ortiz, C. Di Natali, and D. G. Caldwell, "Xosoft - iterative design of a modular soft lower limb exoskeleton," *Biosystems & Biorobotics*, p. 351–355, Oct 2018.
- [30] A. Thallemer and D. Diensthurber, *Gripper device for gripping objects*, 2012.
- [31] *Soft Robotics INC*.
- [32] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, and H. Shea, "Polymer actuators: Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators (adv. mater. 2/2016)," *Advanced Materials*, vol. 28, no. 2, p. 205–205, Jan 2016.
- [33] C. Cruz Ulloa, S. Terrile, and A. Barrientos, "Soft underwater robot actuated by shape-memory alloys "jellyrobicb" for path tracking through fuzzy visual control," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 20, p. 7160, Oct 2020.
- [34] H.-T. Lin, G. G. Leisk, and B. Trimmer, "Goqbot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 6, no. 2, p. 026007, Apr 2011.
- [35] S. Seok, C. D. Onal, K.-J. Cho, R. J. Wood, D. Rus, and S. Kim, "Meshworm: A peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 5, p. 1485–1497, Oct 2013.
- [36] A. Arienti, M. Calisti, F. Giorgio-Serchi, and C. Laschi, "Poseidrone: Design of a soft-bodied rov with crawling, swimming and manipulation ability," in *2013 OCEANS - San Diego*, 2013, pp. 1–7.
- [37] F. Renda, F. G. Serchi, F. Boyer, and C. Laschi, "Structural dynamics of a pulsed-jet propulsion system for underwater soft robots," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 12, no. 6, p. 68, Jan 2015.
- [38] M. Runciman, A. Darzi, and G. P. Mylonas, "Soft robotics in minimally invasive surgery," *Soft Robotics*, vol. 6, no. 4, pp. 423–443, 2019.



- [39] M. W. Gifari, H. Naghibi, S. Stramigioli, and M. Abayazid, "A review on recent advances in soft surgical robots for endoscopic applications," *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 15, no. 5, Jun 2019.
- [40] M. Sitti, "Miniature soft robots — road to the clinic," *Nature Reviews Materials*, vol. 3, no. 6, p. 74–75, Apr 2018.
- [41] C.-Y. Chu and R. M. Patterson, "Soft robotic devices for hand rehabilitation and assistance: A narrative review," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 15, no. 1, Feb 2018.
- [42] Y. Kim, S. S. Cheng, A. Ecins, C. Fermüller, K. P. Westlake, and J. P. Desai, *Towards a Robotic Hand Rehabilitation Exoskeleton for Stroke Therapy*, ser. Dynamic Systems and Control Conference, Oct. 2014, vol. Volume 1: Active Control of Aerospace Structure; Motion Control; Aerospace Control; Assistive Robotic Systems; Bio-Inspired Systems; Biomedical/Bioengineering Applications; Building Energy Systems; Condition Based Monitoring; Control Design for Drilling Automation; Control of Ground Vehicles, Manipulators, Mechatronic Systems; Controls for Manufacturing; Distributed Control; Dynamic Modeling for Vehicle Systems; Dynamics and Control of Mobile and Locomotion Robots; Electrochemical Energy Systems.
- [43] A. J. Veale and S. Q. Xie, "Towards compliant and wearable robotic orthoses: A review of current and emerging actuator technologies," *Medical Engineering & Physics*, vol. 38, no. 4, p. 317–325, Apr 2016.
- [44] N. Agharese, T. Cloyd, L. H. Blumenschein, M. Raitor, E. W. Hawkes, H. Culbertson, and A. M. Okamura, "Hapwrap: Soft growing wearable haptic device," *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2018.
- [45] S. Jadhav, V. C. Kannanda, B. Kang, M. T. Tolley, and J. P. Schulze, "Soft robotic glove for kinesthetic haptic feedback in virtual reality environments," in *The Engineering Reality of Virtual Reality*, 2017. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53992770>
- [46] C. Rognon, M. Koehler, C. Duriez, D. Floreano, and A. M. Okamura, "Soft haptic device to render the sensation of flying like a drone," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 2524–2531, 2019.
- [47] E. H. Skorina, M. Luo, and C. D. Onal, "A soft robotic wearable wrist device for kinesthetic haptic feedback," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 5, Jul 2018.
- [48] J. Guo, C. Xiang, and J. Rossiter, "A soft and shape-adaptive electroadhesive composite gripper with proprioceptive and exteroceptive capabilities," *Materials & Design*, vol. 156, pp. 586–587, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127518305574>

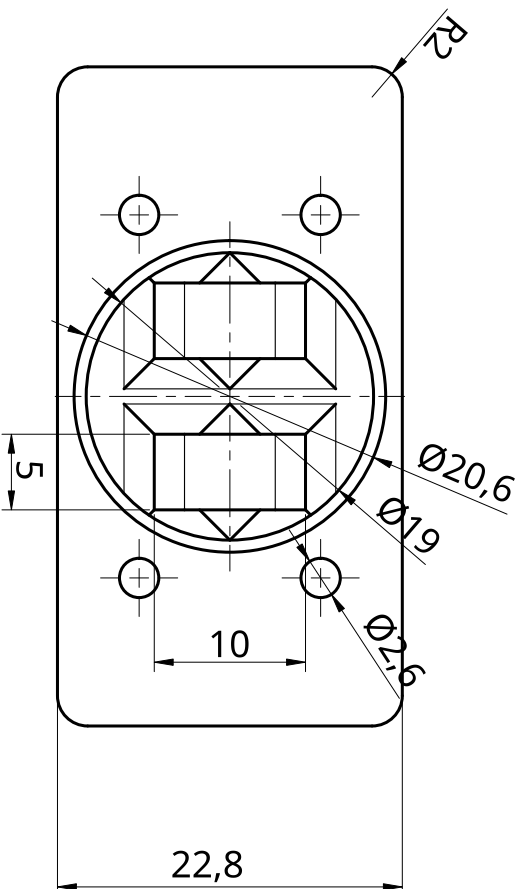
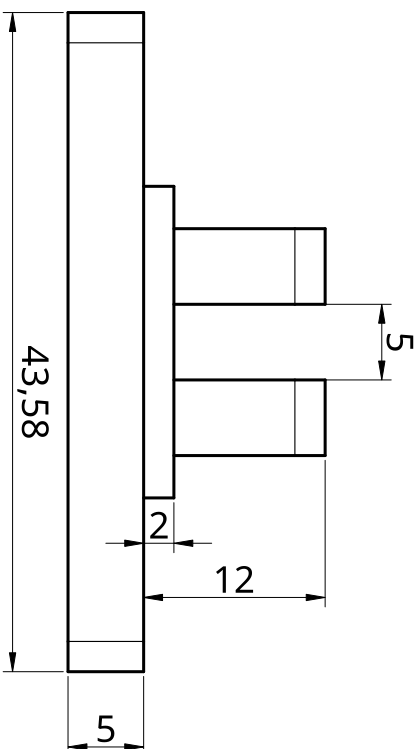
- [49] I. Schmidt, “Flexible moulding jaws for grippers,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 5, no. 1, p. 24–26, Jan 1978.
- [50] A. PEROVSKII, “Universal grippers for industrial robots,” *RUSSIAN ENGINEERING JOURNAL*, vol. 60, no. 8, pp. 3–4, 1980.
- [51] T. Rienmüller and H. Weissmantel, “A shape adaptive gripper finger for robots,” *Proceedings of the 18th International Symposium on Industrial Robots*, p. 241–250, 1988.
- [52] J. M. Gómez-Paccapelo, A. A. Santarossa, H. D. Bustos, and L. A. Pugnaroni, “Effect of the granular material on the maximum holding force of a granular gripper,” *Granular Matter*, vol. 23, no. 1, Nov 2020.
- [53] N. Cheng, J. Amend, T. Farrell, D. Latour, C. Martinez, J. Johansson, A. McNicoll, M. Wartenberg, S. Naseef, W. Hanson, and et al., “Prosthetic jamming terminal device: A case study of untethered soft robotics,” *Soft Robotics*, vol. 3, no. 4, p. 205–212, Dec 2016.
- [54] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. Zakin, H. Lipson, and H. M. Jaeger, “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 44, pp. 18 809–18 814, 2010. [Online]. Available: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1003250107>
- [55] S. Hauser, M. Mutlu, F. Freundler, and A. Ijspeert, “Stiffness variability in jamming of compliant granules and a case study application in climbing vertical shafts,” *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2018.
- [56] M. A. Karimi, V. Alizadehyazdi, B.-P. Busque, H. M. Jaeger, and M. Spenko, “A boundary-constrained swarm robot with granular jamming,” *2020 3rd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, vol. 521, p. 291–296, May 2020.
- [57] Y. Yang, Y. Zhang, Z. Kan, J. Zeng, and M. Y. Wang, “Hybrid jamming for bioinspired soft robotic fingers,” *Soft Robotics*, vol. 7, no. 3, p. 292–308, Jun 2020.
- [58] S. Jadhav, M. R. Majit, B. Shih, J. P. Schulze, and M. T. Tolley, “Variable stiffness devices using fiber jamming for application in soft robotics and wearable haptics,” *Soft Robotics*, vol. 9, no. 1, p. 173–186, Feb 2022.
- [59] M. Brancadoro, M. Manti, S. Tognarelli, and M. Cianchetti, “Preliminary experimental study on variable stiffness structures based on fiber jamming for soft robots,” *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, vol. 396, p. 258–263, Apr 2018.
- [60] M. Brancadoro, M. Manti, F. Grani, S. Tognarelli, A. Menciassi, and M. Cianchetti, “Toward a variable stiffness surgical manipulator based on fiber jamming transition,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 6, Mar 2019.

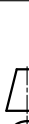
- [61] M. Brancadoro, M. Manti, S. Tognarelli, and M. Cianchetti, "Fiber jamming transition as a stiffening mechanism for soft robotics," *Soft Robotics*, vol. 7, no. 6, p. 663–674, Dec 2020.
- [62] Y.-J. Kim, S. Cheng, S. Kim, and K. Iagnemma, "Design of a tubular snake-like manipulator with stiffening capability by layer jamming," *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct 2012.
- [63] N. G. Cheng, M. B. Lobovsky, S. J. Keating, A. M. Setapen, K. I. Gero, A. E. Hosoi, and K. D. Iagnemma, "Design and analysis of a robust, low-cost, highly articulated manipulator enabled by jamming of granular media," *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2012.
- [64] J. Ou, L. Yao, D. Tauber, J. Steimle, R. Niiyama, and H. Ishii, "Jamsheets," *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, Feb 2014.
- [65] Y. Gao, X. Huang, I. S. Mann, and H.-J. Su, "A novel variable stiffness compliant robotic gripper based on layer jamming," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 12, no. 5, Jun 2020.
- [66] Y. S. Narang, A. Degirmenci, J. J. Vlassak, and R. D. Howe, "Transforming the dynamic response of robotic structures and systems through laminar jamming," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 2, p. 688–695, Apr 2018.
- [67] L. Gerez, G. Gao, and M. Liarokapis, "Laminar jamming flexure joints for the development of variable stiffness robot grippers and hands," *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Oct 2020.

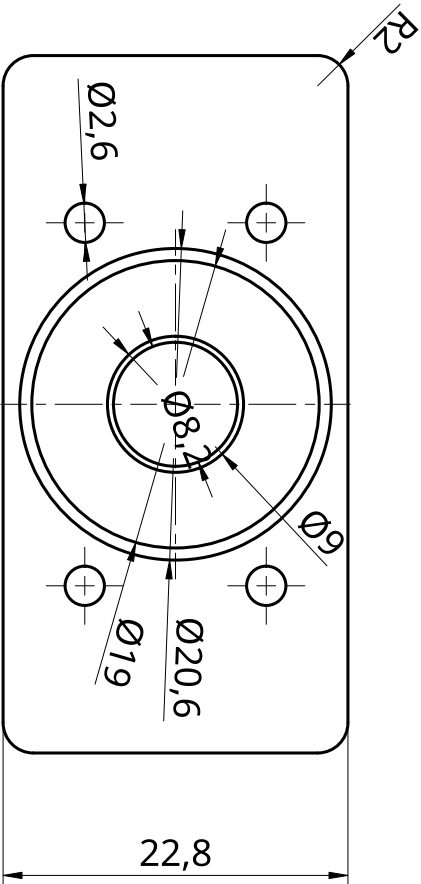
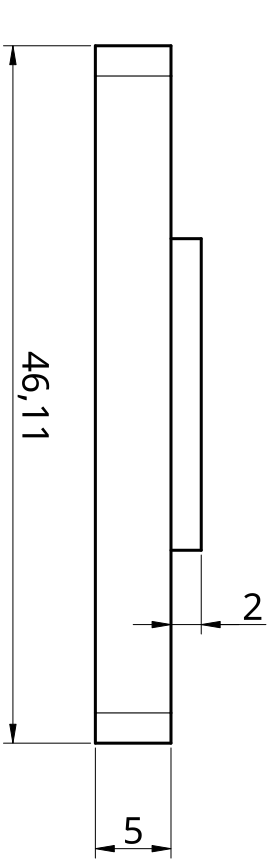
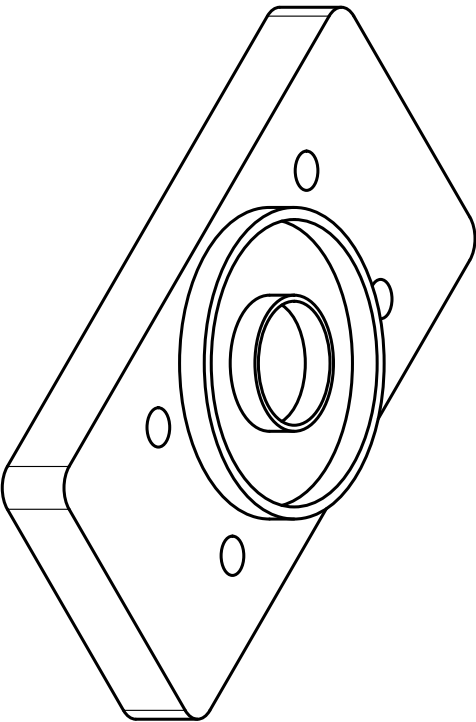
Apéndices y planos



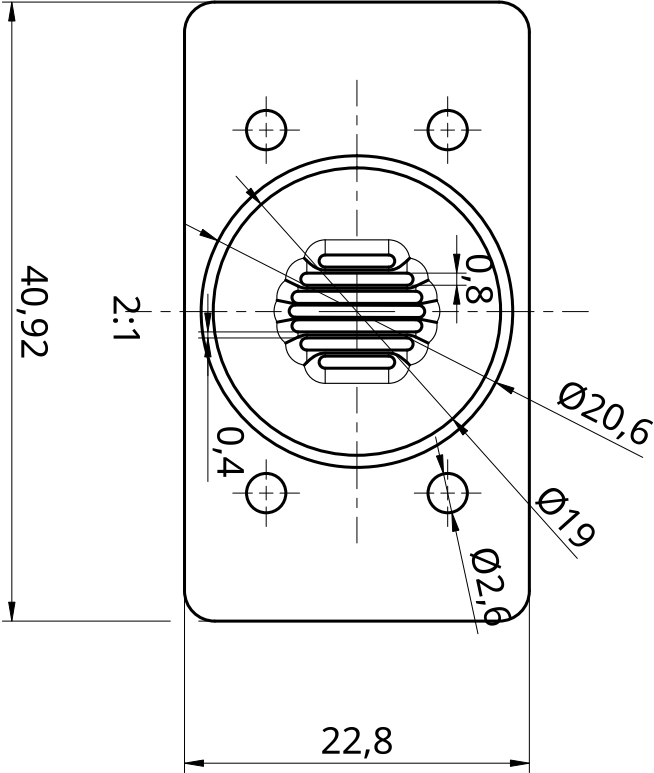
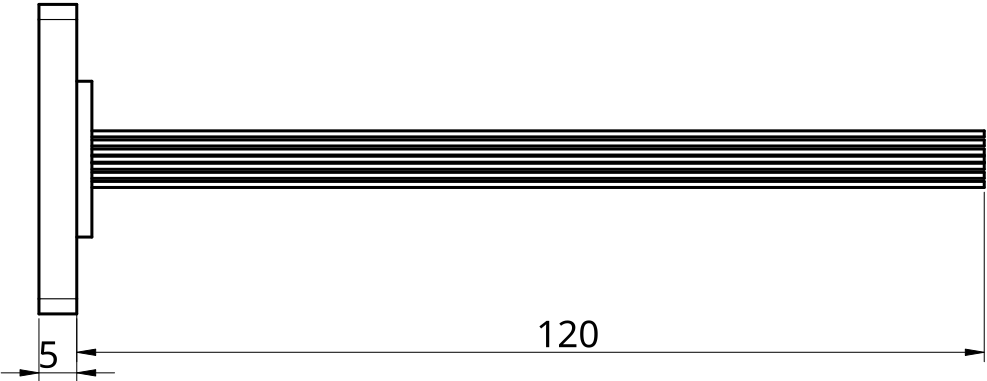
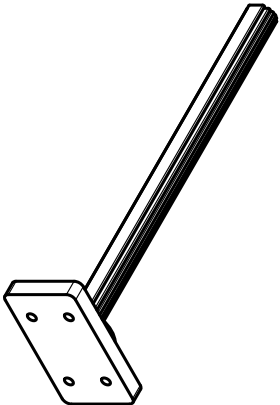
<div>UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS</div> <div>ANGULAR = ±°</div> <div>SURFACE FINISH </div> <div>DO NOT SCALE DRAWING</div> <div>BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS</div> <div>FIRST ANGLE PROJECTION </div>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	ANGULAR = ± °		
	NAME	SIGNATURE	DATE
	DRAWN	ESTRELLA ISLA SILVANA	2024-07-01
	CHECKED	JUAN MANUEL GARCERAN PALACIOS	2024-07-01
	APPROVED		
SURFACE FINISH	✓		
DO NOT SCALE DRAWING			
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS			
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH	
			
TITLE			
BOCETO DEL ACOPL DE JAMMING GRANULAR			
SIZE	DWG NO.	REV.	
A4	2		
SCALE	WEIGHT	SHEET	1 of 1
2:1			



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			NAME	SIGNATURE	DATE
ANGULAR = ±°		DRAWN	ESTRELLA ISA SULIMMA		2024-07-01
SURFACE FINISH ✓		CHECKED	JUAN MANUEL GANDRANG PALACIOS		2024-07-01
DO NOT SCALE DRAWING		APPROVED			
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS					
FIRST ANGLE PROJECTION		MATERIAL		FINISH	
TITLE					
BOCETO DEL ACOPLE DE JAMMING TUBULAR					
SIZE A4		DWG NO.		REV.	
SCALE 2:1		WEIGHT		SHEET 1 of 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		NAME		SIGNATURE		DATE	
ANGULAR = ±°		DRAWN	ESTRELLA ISLA SILVANA			2024-07-01	
SURFACE FINISH ✓		CHECKED	JUAN MANUEL GANDRANG PULACIOS			2024-07-01	
DO NOT SCALE DRAWING		APPROVED					
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS							
FIRST ANGLE PROJECTION		MATERIAL		FINISH			
TITLE				SIZE			
BOCETO DEL ACOPLE DE JAMMING LAMINAR				A4		DWG NO.	
				4		REV.	
SCALE		1:2		WEIGHT		SHEET	
						1 of 1	

