



Cálculo y diseño de un mecanismo flexible de fuerza constante como actuador en una máquina de ensayos de desgaste entre pantógrafo y catenaria

Vid Bačić¹, Rafael J. Luque¹, Pedro Reyes¹, Montserrat Simarro¹, Sergio Postigo¹, Juan J. Castillo¹

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos, Universidad de Málaga, vidbacic@uma.es, rafaeljesuslqa@uma.es, Pedrozuniga1798@uma.es, msimarro@uma.es, spostigo@uma.es, juancas@uma.es

Se presenta el diseño de un mecanismo flexible que genera una fuerza de contacto constante entre pantógrafo y catenaria. El mecanismo se integrará en una máquina de ensayos para estudiar el desgaste en el contacto entre ambos elementos. Con este diseño se persigue minimizar las fluctuaciones de fuerza causadas por perturbaciones y eliminar la necesidad de sistemas de control de fuerza complejos. Para el diseño se ha empleado el método de combinación de rigideces, asociando en paralelo un elemento de rigidez negativa y otro de rigidez positiva, ambas con el mismo valor absoluto para que la rigidez equivalente del sistema sea nula. El elemento de rigidez negativa se ha resuelto utilizando flejes biestables aprovechando el cambio de rigidez al producirse el pandeo, mientras que para el elemento de rigidez positiva se ha usado un mecanismo flexible en forma de rombo. La síntesis y el dimensionamiento de los componentes se han realizado a través de simulaciones de elementos finitos en SolidWorks empleando una malla mixta con elementos sólidos para las partes rígidas y elementos tipo placa para las partes flexibles del mecanismo. Con ello, se obtiene un diseño que únicamente permite grandes desplazamientos en su dirección vertical, absorbiendo las cargas que se apliquen en otras direcciones. Este desarrollo abre nuevas posibilidades para la aplicación de mecanismos flexibles de fuerza constante en la industria ferroviaria y otros sistemas que requieren un control de fuerzas.

1. Introducción

La capacidad de aplicar una fuerza constante es una característica necesaria en varios sistemas de precisión, ya sea en campos como la robótica, ingeniería biomédica, generación de energía, sistemas microelectromecánicos (MEMS), cadenas de montaje, entre otros [1].

Tradicionalmente, la fuerza constante se ha conseguido mediante procesos de control, recurriendo a sistemas de bucle cerrado donde un sensor envía información sobre la fuerza que se aplica entre la herramienta y el objeto al controlador, para que este regule el sistema mediante algoritmos [2]. La implementación de sensores, el tratamiento y acondicionamiento de las señales de los mismos para que estas puedan ser interpretadas por el controlador y el diseño del algoritmo que se encarga de tomar decisiones en función de dicha señal con una velocidad y precisión adecuadas, plantea una serie de retos que complican y encarecen el diseño de estos sistemas de control.

A raíz de ello, en las últimas dos décadas ha habido un auge en el desarrollo de sistemas mecánicos capaces de aplicar una fuerza cuasiconstante en un rango de desplazamientos determinado (ver Figura 1), conocidos como mecanismos flexibles de fuerza constante (MFFC). Estos mecanismos consiguen reducir las variaciones en la fuerza de forma pasiva, recurriendo para ello a la deformación elástica de los elementos que lo componen. Sin embargo, el hecho de depender de la deformación de sus miembros implica, en general, la necesidad de considerar grandes deformaciones, complicando así el cálculo y diseño de estos.

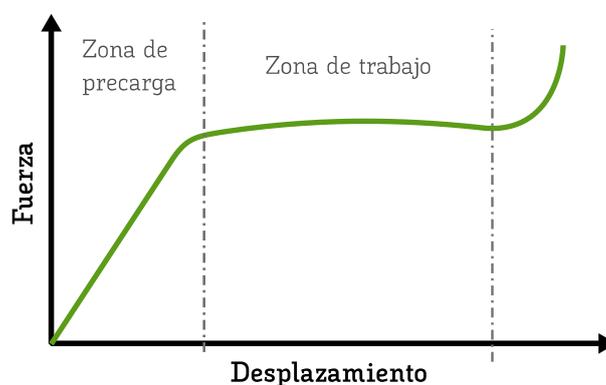


Figura 1: Gráfica fuerza-desplazamiento típica de un mecanismo flexible de fuerza constante.

Este trabajo surge con la idea de estudiar estos mecanismos y de diseñar un primer prototipo en ácido poliláctico (PLA) para sopesar la viabilidad de su implementación en un banco de ensayos para el estudio de la interacción pantógrafo-catenaria (ver Figura 2) dentro del proyecto de investigación “Detección de zonas de desgaste irregular en catenaria rígida de Metro Málaga y su disminución a partir de modelos de desgaste validados con registros en túnel”. En este proyecto se busca estudiar y cuantificar el desgaste del conjunto frotador-catenaria, para así desarrollar estrategias que permitan disminuir dicho desgaste en las instalaciones de Metro Málaga.

Este tipo de máquinas de ensayo buscan recrear las condiciones que se dan en las vías, controlado para ello parámetros como la fuerza de contacto, el voltaje y la intensidad de la corriente y la velocidad del tren [3]. Para ello, en estos bancos es posible distinguir dos grandes bloques, uno encargado de simular la catenaria y otro encargado de simular el frotador del pantógrafo.

El bloque encargado de recrear el hilo de la catenaria se compone de una rueda giratoria a la que se fija el cable de cobre. Por otro lado, el bloque encargado de recrear el frotador se compone de un sistema de actuadores unidos a una probeta de frotador, encargados de dotar a esta última de un movimiento zigzag, a fin de recrear el descentramiento de la catenaria y de aplicar la fuerza necesaria para asegurar el contacto entre hilo y frotador.

Cuando ambos bloques entran en contacto, el giro de la rueda simula el avance del pantógrafo y los actuadores que desplazan al frotador simulan el descentramiento que tiene la catenaria para asegurar un desgaste uniforme del material del frotador. Parámetros como la velocidad de giro y de descentramiento, la intensidad y voltaje de la corriente y la fuerza de aplicación deben estar controlados para poder realizar el ensayo.

El MFFC debería ser capaz de aportar la fuerza deseada para mantener el contacto entre ambos bloques y a su vez absorber posibles desplazamientos no deseados, producidos por perturbaciones o impactos durante el ensayo, sin afectar al contacto hilo-frotador, instalándose en el bloque del pantógrafo de la máquina.

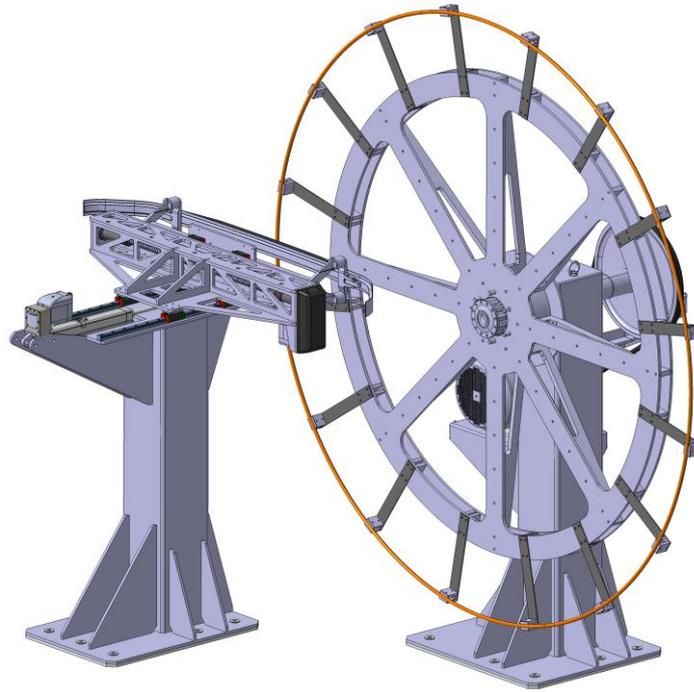


Figura 2: Modelo del banco de ensayos.

2. Consideraciones iniciales

2.1. Condiciones de trabajo

Metro Málaga dispone de pantógrafos asimétricos de dos frotadores (ver Figura 3), con los que se ejerce una fuerza de entre 60 y 80 N en función de su apertura. Como en la máquina de ensayos se usará únicamente un frotador, la fuerza de contacto a aplicar será la mitad, es decir entre los 30 y 40 N , una variación no mayor a $\pm 2 N$. En cuanto al rango de desplazamiento en el que se desea mantener la fuerza constante, se estima que deberá estar comprendido entre los 10 y 20 mm.

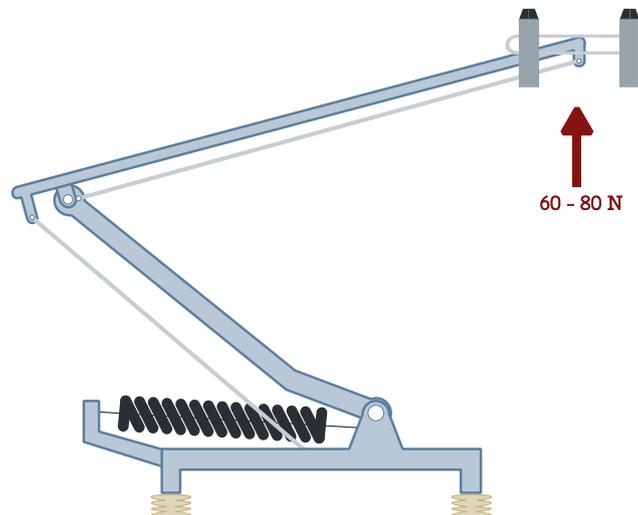


Figura 3: Esquema de pantógrafo asimétrico de dos frotadores de Metro Málaga.

2.2. Descripción del sistema

En cuanto a la geometría del MFFC, este se resolverá mediante el método de combinación de rigideces, utilizado en [4], [5] y [6], habiendo una fase y base rígidas, unidas mediante elementos flexibles, uno de rigidez negativa y otro de rigidez positiva (ver Figura 4).

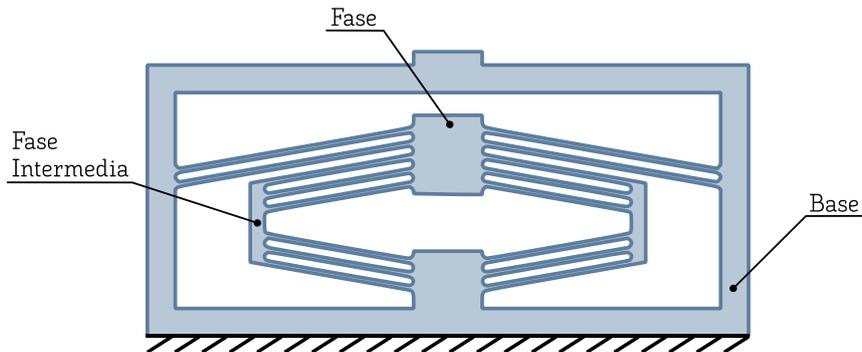


Figura 4: Esquema del diseño del MFFC propuesto.

Para el mecanismo de rigidez negativa, se recurrirá a cuatro flejes biestables acoplados en paralelo a la base y fase. Por otro lado, la rigidez positiva se conseguirá mediante un mecanismo flexible en forma de rombo, donde varios flejes, unidos mediante una fase intermedia rígida, se acoplan en serie y en paralelo. Ambos mecanismos se diseñarán para que sus rigideces tengan la misma magnitud pero signo contrario, por lo que al acoplarse la rigidez equivalente del sistema será nula, obteniéndose una fuerza constante en dicho intervalo.

En cuanto a la fabricación del prototipo, esta se realizará mediante fabricación aditiva de modelado por deposición fundida (FDM), disponiendo las capas en la dirección longitudinal de los flejes, ya que estos trabajan a flexión. La densidad del relleno de los elementos rígidos se tomará del 50%, y el número de las pasadas para las paredes exteriores se ajustará para que los flejes no tengan relleno. El material de impresión a usar será el ácido poliláctico (PLA), cuyas propiedades a flexión quedan recogidas en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades del ácido poliláctico a flexión.

Material	Módulo Elástico E (GPa)	Coef. de Poisson μ	Límite elástico a flexión σ_y (MPa)
Ácido Poliláctico (PLA)	3.5	0.35	77.4

2.3. Variables de diseño

La respuesta del mecanismo depende de la geometría de los flejes, por lo que es necesario definir su largo, ancho, espesor e inclinación respecto de la horizontal. A fin de simplificar el proceso de dimensionamiento, se impone que todos los flejes tengan el mismo ancho y la misma inclinación horizontal, facilitando así el proceso de impresión y evitando posibles interferencias entre los flejes del mecanismo de rigidez positiva y negativa.

En cuanto a los elementos rígidos (fase, fase intermedia y base de la Figura 4), la única condición a satisfacer es que presenten la suficiente rigidez como para no sufrir grandes desplazamientos bajo las acciones impuestas, por lo que se buscará minimizar su tamaño sin que comprometan el funcionamiento del mecanismo.

3. Metodología

El dimensionamiento del MFFC se realizará mediante el método de elementos finitos (MEF), recurriendo al programa de SolidWorks para modelar y simular el diseño. Para simular el mecanismo se ha aprovechado la simetría para considerar únicamente la mitad del modelo. Además, se ha recortado la base para ahorrar en costes de computación, incluyendo únicamente las zonas cercanas a la unión con los flejes (ver Figura 5.a).

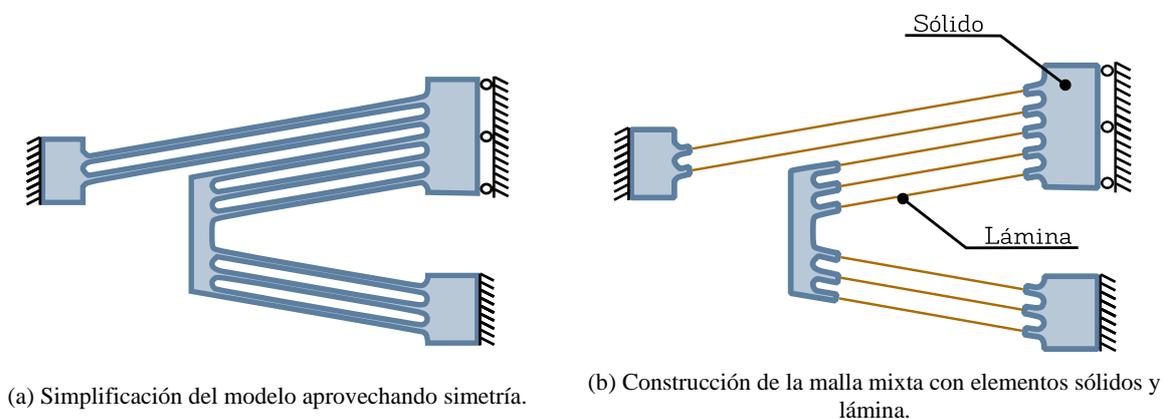


Figura 5: Simplificaciones para construir el modelo de MEF.

Los flejes se han modelado con elementos tipo lámina, ya que el espesor es mucho menor a su ancho y largo (del orden de 10% de la dimensión más pequeña de ambas). Como el modelo contempla redondeos en las zonas de unión, se ha decidido modelar la base y fases del MFFC con elementos sólidos, en los que se incluyen los redondeos, recurriendo para ello a una malla combinada, en la que se unen los dos tipos de elementos mediante una unión rígida (ver Figura 5.b).

En el dimensionamiento del mecanismo flexible es posible diferenciar dos pasos, en primer lugar la determinación de la geometría necesaria para generar la fuerza constante deseada y posteriormente la comprobación de las tensiones del modelo construido. Por ello, se definirán dos configuraciones dentro del modelo construido, una con las modificaciones necesarias para poder estudiar la fuerza de reacción del mecanismo y otra para estudiar las tensiones generadas en el mismo. Con la primera se definirá la geometría de los elementos flexibles para conseguir la fuerza constante deseada, y en la segunda se estudiarán las tensiones en las zonas críticas del diseño. Así, es posible definir el diagrama de flujo de la Figura 5.

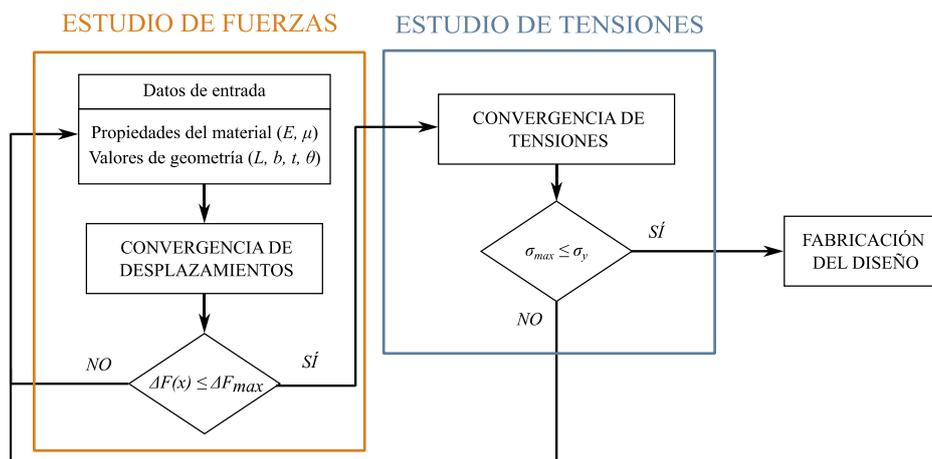


Figura 6: Metodología a seguir en el análisis de elementos finitos.

Para las simulaciones, se realizará un estudio estático no lineal mediante control de desplazamientos a fin de poder estudiar lo que sucede tras el pandeo de los flejes del mecanismo de rigidez negativa. Para ello, se aplica un desplazamiento de control de 20 mm con una carga distribuida de 100 N sobre la fase del mecanismo, a partir de la que se puede estudiar la evolución del factor de carga para obtener la fuerza necesaria para comprimir el mecanismo. Por otro lado, se aplica una pequeña fuerza descentradora sobre los flejes del mecanismo de rigidez negativa a fin de generar una pequeña imperfección inicial que facilite el pandeo de los mismos durante la simulación (ver Figura 7).

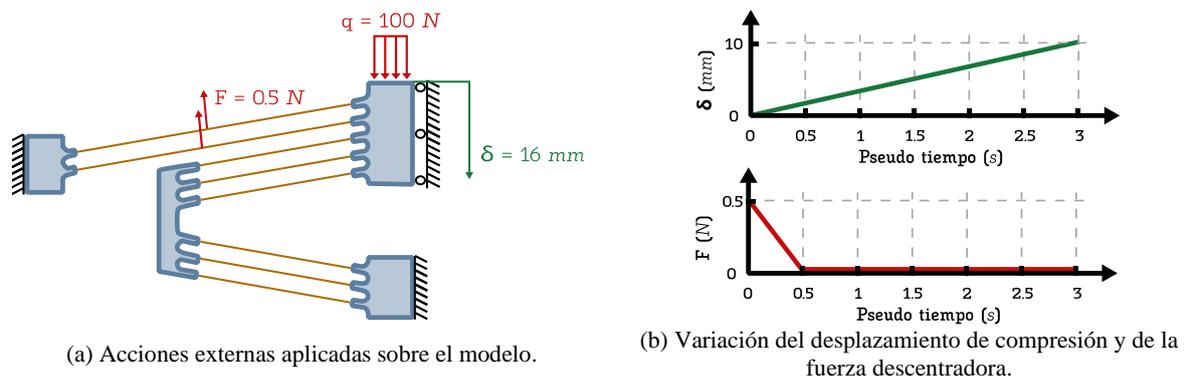


Figura 7: Situaciones de carga del MFFC.

4. Diseño del mecanismo

En primer lugar se construye el modelo simplificado en SolidWorks, modelando los elementos tipo placa con superficies y generando líneas de partición para aplicar las fuerzas descentradoras (ver Figura 8.a). Para las simulaciones se recurre a una malla basada en curvatura de combinado con elementos tetraédricos y triangulares de segundo orden. Tras los refinamientos globales y locales, la malla presenta 70368 elementos con un tamaño máximo de 4 mm y mínimo de 0.6 mm, con un coeficiente de crecimiento de 1.1.

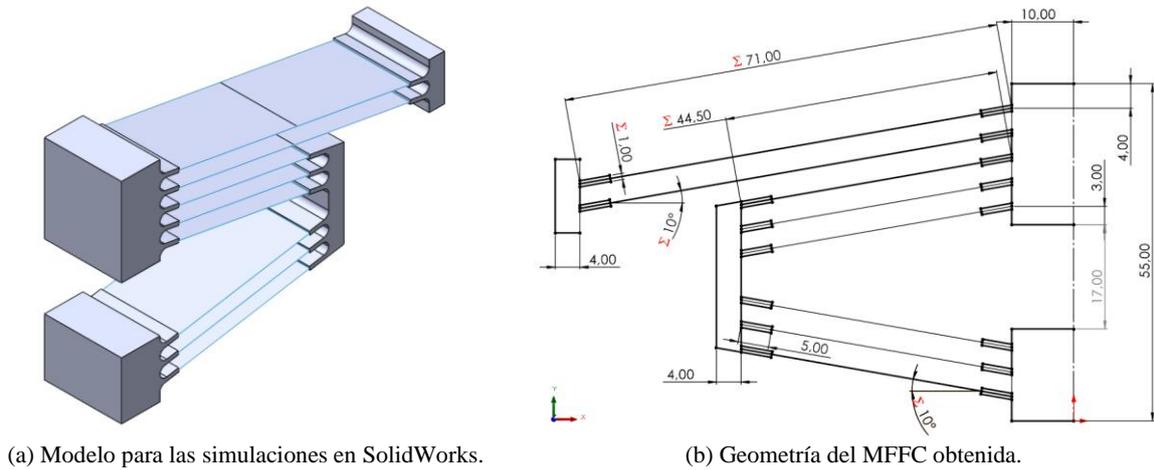


Figura 8: Construcción del modelo y de la geometría en SolidWorks.

Haciendo variar la geometría de los flejes, se obtienen finalmente las dimensiones de la Figura 8.b, a partir de la que se obtiene una gráfica de fuerza frente a desplazamiento representada en la Figura 9. Como en el modelo se representa medio mecanismo, los valores de la fuerza obtenidos corresponden a la mitad del mecanismo completo, por lo que la fuerza total del mecanismo según las simulaciones debería ser de $37.04 \pm 0.68 \text{ N}$.

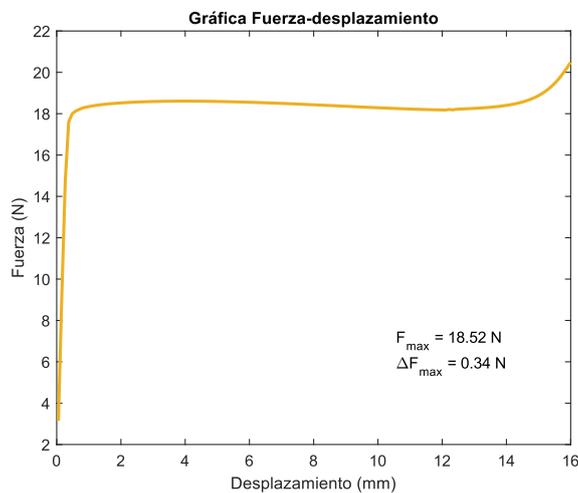


Figura 9: Gráfica fuerza-desplazamiento del modelo de MFFC obtenida mediante simulaciones.

En cuanto a las tensiones, se obtiene un coeficiente de seguridad de 1.52, apareciendo los valores máximos en los radios de redondeo de los flejes del mecanismo de rigidez positiva, con un valor máximo de 51 MPa (ver Figura 10 y 11).

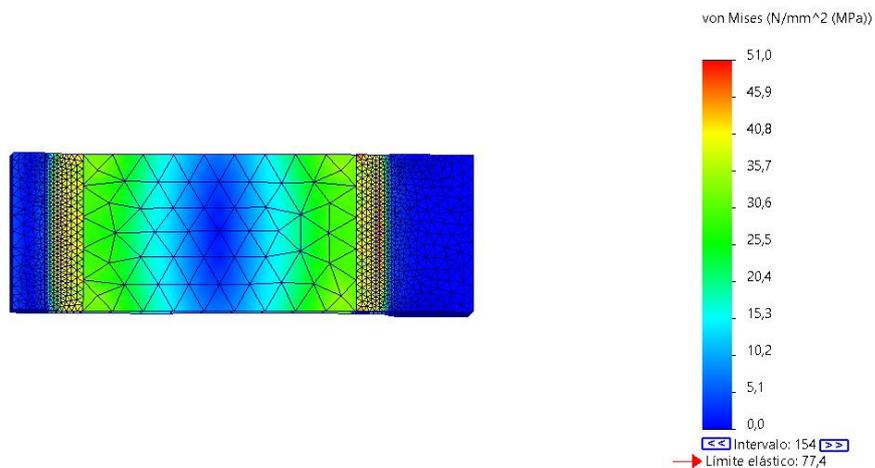


Figura 10: Distribución de tensiones en flejes del mecanismo de rigidez positiva, vista superior.

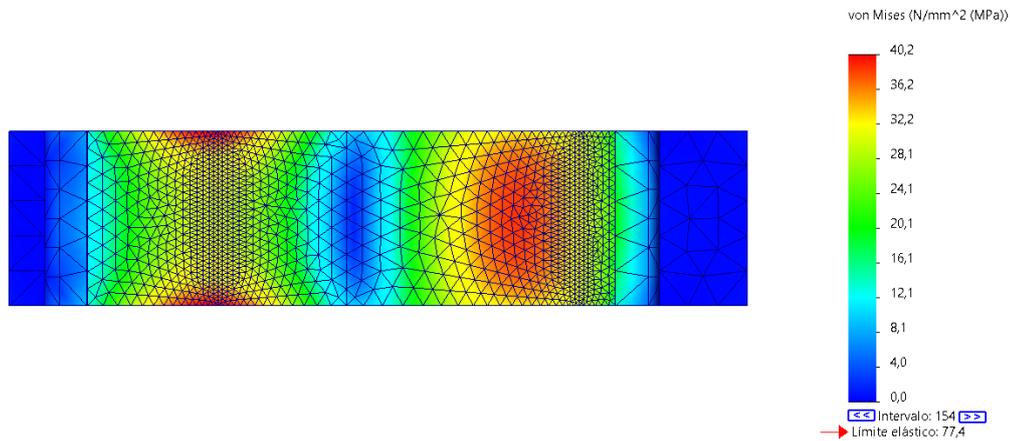


Figura 11: Distribución de tensiones en flejes del mecanismo de rigidez negativa, vista superior.

4.1. Ensayo del prototipo

El diseño obtenido cumple las especificaciones de fuerza y tensiones, por lo que se procede a su fabricación y posterior ensayo. Como la base del MFFC está cerrada sobre la fase a fin de dotarla de suficiente rigidez, se introduce un perno, fijado mediante un inserto, a fin de facilitar la compresión del mecanismo (ver Figura 12).

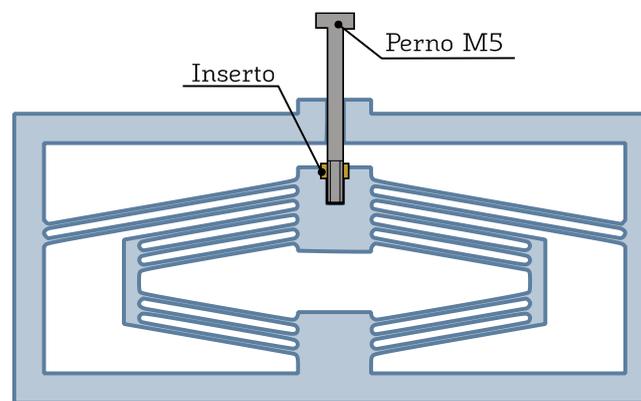
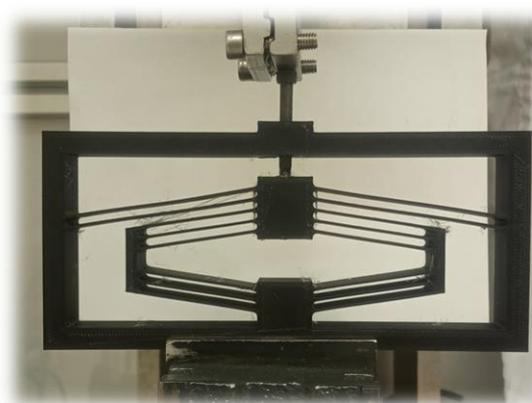
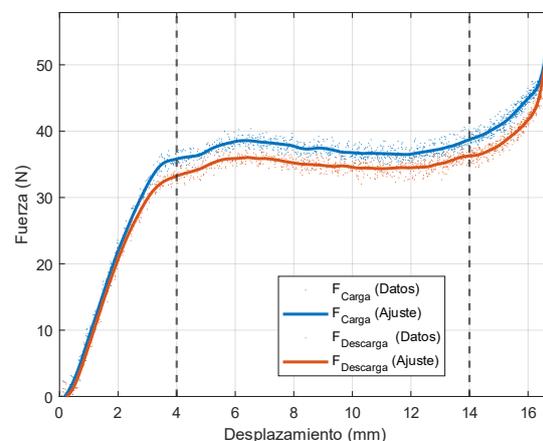


Figura 12: Modificación del diseño para facilitar el ensayo del MFFC.

Con ello, es posible proceder al ensayo del prototipo en un banco de ensayo de tracción. Para ello se aplica una compresión cíclica con una onda de tipo coseno de 16.5 mm de amplitud entre picos y a una frecuencia de 0.1 Hz , obteniéndose una gráfica fuerza-desplazamiento experimental (ver Figura 13). Aplicando un ajuste polinomial sobre los resultados obtenidos, se tiene una fuerza de aproximadamente $37 \pm 1.5 \text{ N}$ durante la carga y una fuerza de $34.5 \pm 1.5 \text{ N}$ durante la descarga del mecanismo, ambas en un rango de compresión de 10 mm .



(a) Fijación del prototipo en la máquina de ensayos.



(b) Gráfica fuerza-desplazamiento experimental del prototipo.

Figura 13: Ensayo del prototipo en un banco de ensayo de tracción.

5. Discusiones

A partir de los resultados del ensayo, es posible apreciar indicios de histéresis en el MFFC, ya que existe una diferencia de aproximadamente 1.5 N entre la curva de carga y descarga del mecanismo. Este fenómeno es posiblemente debido al material usado (PLA) y al proceso de fabricación, ya que las capas del material depositadas durante la impresión pueden presentar pequeños deslizamientos relativos entre sí al deformar el sistema.

La gráfica fuerza-desplazamiento de las simulaciones mediante MEF se acerca bastante en valor a la curva de carga obtenida de los ensayos, sin embargo esta última presenta una variación de fuerza bastante más considerable y una zona de trabajo menor que la curva de las simulaciones (ver Figura 14).

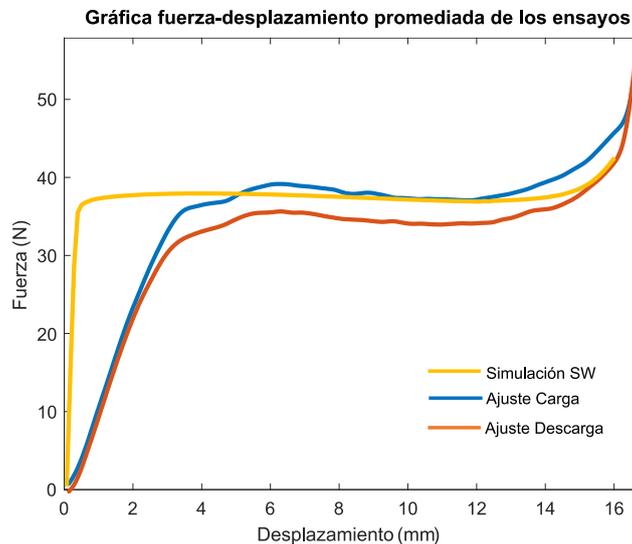


Figura 14: Superposición de la gráfica fuerza-desplazamiento obtenida mediante simulación y las curvas de carga y descarga obtenidas mediante ensayo.

6. Conclusiones y consideraciones futuras

Se ha diseñado y fabricado un mecanismo flexible de fuerza constante aplicando el método de combinación de rigideces y recurriendo al método de elementos finitos utilizando una malla mixta de elementos sólidos para las partes rígidas y elementos tipo placa para las partes flexibles del mecanismo.

A partir de las simulaciones del sistema completo con la malla mixta se ha variado la geometría de los elementos flexibles para conseguir una fuerza de $37.04 \pm 0.68\text{ N}$ en un rango de 15 mm de desplazamiento, con un coeficiente de seguridad de 1.52. Finalmente, se ha fabricado el prototipo mediante impresión 3D de modelado por deposición fundida (FDM) y se ha comprobado experimentalmente la fuerza constante generada por el mismo con una máquina de ensayos de tracción, obteniéndose una fuerza de aproximadamente $37 \pm 1.5\text{ N}$ en un rango de 10 mm de desplazamiento, dándose por válido el diseño.

El prototipo obtenido sirve como base para entender el funcionamiento de los MFFC y de su proceso de diseño, desde su conceptualización hasta las mediciones experimentales para comprobar las discrepancias entre la teoría y la realidad. A partir de lo aprendido en este proceso se espera poder dar el siguiente paso y obtener un diseño definitivo hecho de metal que pueda instalarse en la máquina de ensayos a fin de proporcionar una fuerza de contacto uniforme entre frotador e hilo. Durante dicho proceso, sería interesante además realizar estudios de fatiga y de respuesta armónica, a fin de estudiar la longevidad del mecanismo frente a los sucesivos ciclos de carga y descarga, así como su respuesta dinámica ante posibles perturbaciones.

7. Agradecimientos

La implementación de este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración de Metro de Málaga S.A.

8. Referencias

- [1] J. Ling, T. Ye, Z. Feng, Y. Zhu, Y. Li y X. Xiao, “A survey on synthesis of compliant constant force/torque mechanisms”, *Mechanisms and machine theory* **176**, 104970 (2022)
- [2] P. Wang y Q. Xu, “Design and modeling of constant-force mechanisms: A survey” *Mechanism and Machine Theory* **119**, (2018)
- [3] T. Kziazzyk, E. Gagniet, P.-H. Cornuault, P. Baucour y D. Chamagne, “Review on Test Benches Studying Sliding Electrical Contact and Synthesis of Experimental Results”, *Energies* (2023)
- [4] B. Ding, X. Li y Y. Li, “Configuration design and experimental verification of a variable constant-force compliant mechanism”, *Robotica*, **vol. 40** (2022)
- [5] Z. Chen, L. Shuaishuai, L. Pngbo y Y. Peng, “Design of a locust leg-like compliant constant-force mechanism supporting large-scale damage-free manipulation”, *Review of Scientific Instruments* (2023)
- [6] Y. Liu y Q. Xu, “Design of a Compliant Constant Force Gripper Mechanism Based on Buckled Fixed-Guided Beam”, *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)* (2016)