

Jornadas de Automática

Diseño conceptual de una pinza robótica de rigidez variable basada en materiales magnetorreológicos

Teresa Vicente^a, Juan M. Garcia-Haro^{a,*}, Santiago Martínez^a, Carlos Balaguer^a

^aRoboticsLab, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Av. De la Universidad 30, 28911 Leganés, España.

To cite this article: Vicente, T, Garcia-Haro, J.M., Martínez, S, Balaguer, C. 2026. Conceptual design of a variable-stiffness robotic gripper based on magnetorheological materials. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13814>

Resumen

Este trabajo presenta el diseño conceptual de una pinza robótica blanda de rigidez variable basada en materiales magnetorreológicos (MR). La novedad principal es combinar dos propiedades que, en robótica blanda, no siempre van de la mano: por un lado, la capacidad de adaptarse al objeto de forma segura y, por otro, la posibilidad de aumentar la rigidez para conseguir un agarre más estable. Para ello, se propone una arquitectura formada por dos dedos opuestos articulados, accionados mediante un sistema de tendón, e incorporando material MR en las falanges y en las zonas de contacto. La rigidez se controla de forma mediante un campo magnético generado por un electroimán de núcleo en U situado en la palma. Además, se han analizado tres variantes basadas en fluido magnetorreológico, elastómero magnetorreológico blando y espuma magnetorreológica.

Palabras clave: Manipuladores robóticos, Tecnología robótica, Estructuras inteligentes

Conceptual design of a variable-stiffness robotic gripper based on magnetorheological materials

Abstract

This paper presents the conceptual design of a soft robotic gripper with variable stiffness based on magnetorheological (MR) materials. The main innovation lies in combining two properties that, in soft robotics, do not always go hand in hand: on the one hand, the ability to adapt safely to the object, and on the other, the ability to increase stiffness to achieve a more stable grip. To achieve this, an architecture consisting of two opposing articulated fingers, actuated by a tendon system, and incorporating MR material in the phalanges and contact areas is proposed. Stiffness is controlled via a magnetic field generated by a U-core electromagnet located in the palm. In addition, three variants based on magnetorheological fluid, soft magnetorheological elastomer, and magnetorheological foam have been analyzed.

Keywords: Robot manipulators, Robotics technology, Smart structures

1. Introducción

La manipulación segura y versátil sigue siendo un reto importante en robótica humanoide, sobre todo cuando el robot tiene que trabajar con objetos que no siempre tienen la misma forma, peso o fragilidad. Las pinzas rígidas tradicionales permiten aplicar fuerzas elevadas y controlar bien la posición, pero tienen una limitación clara: al ser rígidas, pueden dañar objetos delicados o generar contactos poco seguros.

En cambio, las pinzas blandas se adaptan mejor a la forma del objeto y toleran mejor pequeños errores durante el contacto, aunque normalmente tienen menos capacidad de carga y el agarre puede ser menos estable (Lee et al., 2017). Esta diferencia entre adaptabilidad y rigidez es precisamente uno de los principales retos de diseño. En una mano robótica humanoide interesa que la pinza sea lo bastante blanda como para adaptarse al objeto, pero también lo bastante rígida como para sujetarlo de forma segura.

*Autor para correspondencia: jgarciah@ing.uc3m.es

Por eso, una posible opción es usar materiales de rigidez variable, que puedan comportarse como materiales blandos durante la fase de contacto y aumentar su rigidez una vez que el agarre ya se ha producido. En este contexto, los materiales magnetorreológicos (MR) resultan especialmente relevantes, ya que sus propiedades mecánicas pueden modificarse mediante la aplicación de un campo magnético de forma rápida, reversible y controlable electrónicamente (Gaeta et al., 2023).

El objetivo y novedad principal de este trabajo es proponer una arquitectura conceptual compacta de pinza MR para robots humanoides que mejora la adaptabilidad del agarre, donde además se implementan tres diseños conceptuales basados en materiales MR distintos. Esta comparativa permite analizar las ventajas, limitaciones y retos de integración de cada alternativa para manipulación segura.

2. Rigidez Variable en Robótica Blanda: Materiales

La rigidez variable en robótica blanda se ha estudiado mediante distintos enfoques, como mecanismos de jamming, materiales de cambio de fase, aleaciones con memoria de forma, estructuras antagonistas y materiales inteligentes sensibles a campos externos. Todos estos métodos pueden ser útiles, pero no todos encajan igual de bien en una pinza compacta. Algunos necesitan líneas neumáticas externas, otros dependen de procesos térmicos más lentos y otros presentan histéresis o una respuesta menos directa (Lee et al., 2017).

Frente a estas opciones, los materiales MR ofrecen una alternativa bastante atractiva, porque su respuesta puede activarse mediante un campo magnético generado localmente. Es decir, no hace falta añadir vacío, compresores o sistemas de calentamiento. Además, en robótica blanda ya se han utilizado tanto para aumentar la rigidez de estructuras deformables como para mejorar la estabilidad del agarre (Koivikko et al., 2021; Gaeta et al., 2023).

Dentro de esta familia de los materiales magnetorreológicos, existen tres tipos principales de materiales: fluidos magnetorreológicos (MRF), elastómeros magnetorreológicos (MRE) y espumas magnetorreológicas (MR-Foam). Aunque todos se basan en la interacción entre partículas ferromagnéticas y un campo magnético aplicado, cada uno tiene un comportamiento distinto. Cambian su forma física, su facilidad de fabricación, el rango de rigidez que pueden alcanzar y también los problemas prácticos que pueden aparecer al integrarlos en una pinza real.

2.1. Elastómeros magnetorreológicos - MRE

Los MRE pueden entenderse como una versión sólida de los MRF. En este caso, las partículas magnéticas, normalmente partículas de hierro carbonilo, están embebidas dentro de una matriz elastomérica, como silicona o caucho. Al estar dentro del polímero, se evitan los problemas de fuga y se reduce el riesgo de sedimentación, lo que facilita mucho su integración en estructuras robóticas blandas (Saber and Sedaghati, 2023).

Un aspecto importante de los MRE es cómo se realiza el curado del material. Si el elastómero se cura sin aplicar un campo magnético, las partículas quedan distribuidas de forma aleatoria dentro de la matriz, por lo que el material tiene un comportamiento más isotrópico, es decir, responde de forma

parecida en distintas direcciones. En cambio, si el curado se hace bajo un campo magnético, las partículas tienden a alinearse formando cadenas internas. Esto da lugar a un material más anisotrópico, con una respuesta más marcada en la dirección en la que se han alineado las partículas. (Saber and Sedaghati, 2023).

También conviene diferenciar entre MRE blandos y duros. En los sMRE (soft), las partículas responden principalmente mientras el campo está aplicado, por lo que el cambio de rigidez es más reversible.

En los hMRE (hard), las partículas pueden mantener cierta magnetización incluso después de retirar el campo, algo que puede ser útil para actuación o cambio de forma programado. Por ello, para esta aplicación, donde interesa alternar varias veces entre un estado blando y otro más rígido, los sMRE encajan mejor.

2.2. Fluidos magnetorreológicos - MRF

Los MRF están formados por partículas ferromagnéticas micrométricas suspendidas en un líquido portador, normalmente aceite mineral o silicona. Cuando no hay campo magnético, las partículas permanecen dispersas y el material puede fluir con facilidad. En cambio, cuando se aplica un campo magnético, las partículas tienden a alinearse formando cadenas internas, lo que aumenta la resistencia del fluido al movimiento y dificulta su deformación interna (de Vicente et al., 2011).

En una pinza blanda, este comportamiento puede aprovecharse para restringir la deformación de un canal interno lleno de MRF. De esta forma, el dedo puede permanecer flexible durante el contacto inicial con el objeto y aumentar su rigidez cuando se activa el campo magnético. La idea es bastante atractiva porque los MRF pueden producir un cambio de comportamiento muy claro. El inconveniente es que su fabricación es complicada: hay que encapsular el fluido, evitar fugas y tener en cuenta la posible sedimentación de las partículas.

2.3. Espuma MR - MR-Foam

Los MR-Foam son una alternativa menos estudiada, pero pueden tener sentido para tareas de agarre. Están formadas por una estructura porosa flexible que incorpora partículas ferromagnéticas. Gracias a esa estructura celular, pueden comprimirse con facilidad y adaptarse bien a objetos frágiles o con geometrías irregulares (Carlson and Jolly, 2000).

En una pinza, el MR-Foam podría ayudar a aumentar la superficie de contacto y a repartir mejor las presiones durante el agarre, lo que resulta especialmente relevante cuando se quieren manipular objetos frágiles o con geometrías irregulares.

Aun así, esta alternativa también presenta algunas dificultades. Su comportamiento mecánico es más difícil de modelar que el de un fluido o un elastómero, y la distribución del campo magnético dentro de una estructura porosa puede no ser tan uniforme. Por ello, en este trabajo se considera como una alternativa exploratoria, cuyo principal interés está más relacionado con la adaptación morfológica y la seguridad de contacto que con alcanzar el mayor cambio de rigidez.

2.4. Trabajos relacionados con pinzas MR y rigidez variable

En los últimos años se han propuesto diferentes sistemas de agarre y estructuras blandas basadas en activación magnética. Por ejemplo, se han presentado pinzas de succión blandas con respuesta magnética (Koivikko et al., 2021), así como estudios sobre endurecimiento inducido magnéticamente en robótica blanda (Gaeta et al., 2023).

También existen prototipos de pinzas blandas basadas en MRE y sistemas activados mediante imanes permanentes o campos externos (Bernat et al., 2022, 2024; Gutenko et al., 2025). Otros trabajos han explorado robots blandos de rigidez variable basados en geles MR (Huang et al., 2022) y mecanismos de layer jamming con MRE (Atakuru et al., 2024).

Estos trabajos muestran que los materiales MR tienen bastante potencial para modificar la rigidez de estructuras blandas. Sin embargo, muchas soluciones se centran en demostradores concretos y no comparan distintas familias de materiales MR usando una misma arquitectura de pinza. Además, la integración compacta del sistema magnético sigue siendo un reto importante, sobre todo si se quiere mantener una estructura ligera, blanda y compatible con una mano robótica humanoide.

3. Arquitectura de la pinza MR

La pinza propuesta adopta una configuración de agarre "pinch-grip", formada por dos dedos opuestos articulados que se adaptan pasivamente al objeto durante el contacto y aumentan su rigidez al aplicarse un campo magnético. Así combina la adaptabilidad de una pinza blanda con una mayor firmeza de agarre. Cada dedo consta de dos falanges unidas por una articulación rotacional de un grado de libertad. El cierre se realiza mediante un tendón accionado por un servomotor en la palma: al tirar de él, los dedos rotan hacia el objeto y lo envuelven. Inicialmente, la estructura permanece blanda para adaptarse al objeto sin aplicar fuerzas bruscas (partículas ferromagnéticas dispersas), permitiendo que los dedos se deformen y adapten pasivamente a su geometría. Una vez establecido el contacto, se activa el electroimán; las partículas se alinean en cadenas, aumentando la rigidez del material y estabilizando el agarre. Al retirar el campo, el material vuelve a ser flexible y el objeto se libera de forma segura.

Con este diseño se controlan por separado la posición y la rigidez. La posición se regula mediante la tensión del tendón, mientras que la rigidez efectiva se controla con la intensidad del campo magnético. Por tanto, para una misma posición de los dedos, es posible modificar la rigidez del contacto y la estabilidad del agarre variando únicamente la corriente del electroimán (Figura 1).

Otra decisión del diseño es colocar el sistema magnético en la palma, en lugar de añadir bobinas en los dedos. Para ello, se propone un electroimán de núcleo en U cuyos polos se orientan hacia la zona de agarre. Esto permite generar un campo magnético transversal que atraviesa el material MR. Sin embargo, la intensidad del campo magnético decaerá de manera proporcional cuanto más lejos estén a las falanges distales, particularidad que deberá estudiarse en un futuro.

La Figura 2 resume las tres variantes estudiadas bajo una misma arquitectura mecánica y magnética. La fila superior corresponde al diseño con fluido magnetorreológico, la fila central al diseño con elastómero magnetorreológico blando y la

fila inferior al diseño con espuma magnetorreológica. En cada caso se compara el comportamiento sin campo magnético y con campo aplicado, mostrando de forma esquemática cómo cambia la distribución interna del material y cómo esto afecta a la rigidez del MR evaluado a través de Δk .

3.1. Diseño Conceptual A — Canal con MRF

El primer diseño se basa en usar MRF encapsulado dentro de las falanges. Como se representa en la fila superior de la Figura. 2, cada dedo incorpora un canal interno sellado que contiene el fluido MR. En ausencia de campo magnético, el fluido permite que los dedos mantengan una baja rigidez y puedan deformarse durante el contacto con el objeto. Cuando se activa el electroimán, el campo magnético atraviesa los canales de MRF y modifica el comportamiento del fluido. Como consecuencia, aumenta la resistencia interna del material, se limita la deformación de las falanges y se incrementa la rigidez efectiva de los dedos. De esta forma, el dedo podría mantenerse flexible durante el contacto inicial y rigidizarse una vez establecido el agarre (Gaeta et al., 2023; Huang et al., 2022).

La principal ventaja de este diseño es su elevado potencial de variación de rigidez. Además, los MRF suelen responder rápido al campo magnético y ofrecen cambios reológicos marcados, por lo que son una opción adecuada si se quiere maximizar el efecto de rigidización. Sin embargo, también es la alternativa más delicada de fabricar. Los canales deben mantenerse estancos durante ciclos repetidos de flexión, evitando fugas, degradación de la membrana de sellado y sedimentación de partículas. Por tanto, el diseño con MRF se considera una alternativa de alto rendimiento, especialmente útil para estudiar el máximo cambio de rigidez alcanzable. Aun así, antes de plantearlo como primera opción para un prototipo funcional, sería necesario validar el encapsulado, la durabilidad del sistema y la interacción entre el fluido, la membrana flexible y el campo magnético aplicado.

3.2. Diseño Conceptual B — sMRE

El segundo diseño utiliza un sMRE como material activo de los dedos. A diferencia del MRF, esta alternativa no necesita canales internos ni encapsular ningún fluido, ya que las partículas ferromagnéticas están embebidas dentro de una matriz elastomérica sólida. Como se muestra en la fila central de la Figura. 2, se plantea una configuración bicapa. La capa activa incorpora sMRE con partículas ferromagnéticas, mientras que la capa blanda sin partículas mantiene la adaptabilidad en la zona de contacto.

Así, el dedo conserva un comportamiento flexible durante la aproximación al objeto, pero puede aumentar su rigidez cuando se activa el campo magnético. Además, si el material se cura bajo campo magnético, puede inducirse una orientación preferente de las partículas, mejorando la respuesta en la dirección deseada (Saber and Sedaghati, 2023).

La principal ventaja de este diseño es que resulta mucho más robusto a nivel práctico. Al ser un material sólido, se eliminan los problemas de fuga y se reduce la complejidad de fabricación respecto a los MRF.

Además, su integración mecánica en los dedos es más directa, ya que el material puede moldearse con la geometría deseada. Este planteamiento está en línea con prototipos recién

SECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO

Pinza robótica adaptativa con estructura y puntas de material magneto-reológico (MR)

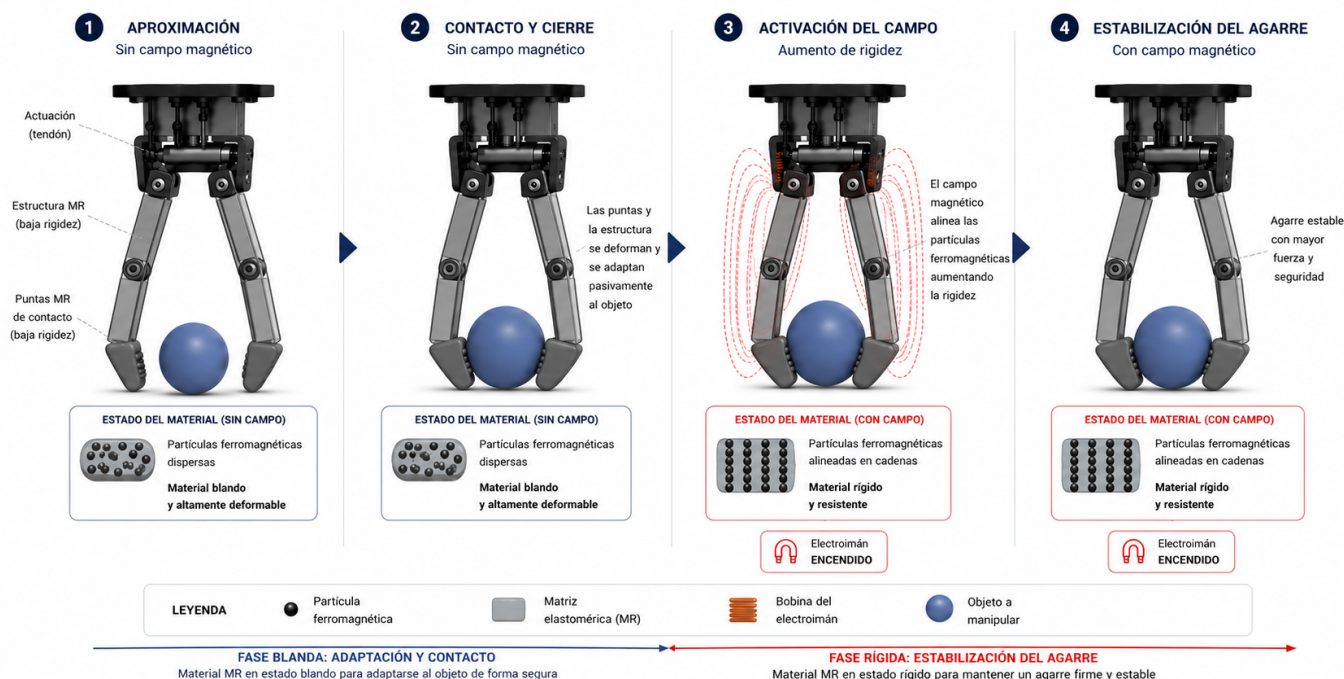


Figura 1: Secuencia de funcionamiento de la pinza robótica adaptativa basada en materiales magnetorreológicos. La imagen resume las cuatro fases principales del agarre: aproximación al objeto, contacto y cierre de los dedos, activación del campo magnético y estabilización final del agarre. Durante las dos primeras fases, el material MR permanece en estado blando, permitiendo la deformación pasiva de las puntas y la adaptación al objeto. Tras el contacto, el electroimán se activa, las partículas ferromagnéticas se alinean y aumenta la rigidez efectiva del material, mejorando la estabilidad y seguridad del agarre.

tes de pinzas blandas basadas en MRE (Bernat et al., 2022, 2024; Gutenko et al., 2025).

Otro aspecto a tener en cuenta es el modelado. En este caso, al tratarse de un material sólido, el comportamiento del sMRE podría aproximarse de forma inicial mediante modelos magneto-mecánicos ya desarrollados para elastómeros magnetorreológicos blandos. En particular, los trabajos de Moreno-Mateos, Danas y García-González proporcionan una base útil para simular la relación entre la deformación mecánica y el campo magnético, lo que facilitaría una primera validación numérica de esta variante (Moreno-Mateos et al., 2023).

Aun así, su principal limitación es que el rango de variación de rigidez suele ser menor que en los fluidos MR, por lo que puede necesitar campos magnéticos más intensos para conseguir cambios significativos. En conjunto, el sMRE se plantea como la alternativa más equilibrada para una primera implementación funcional, ya que combina facilidad de fabricación, ausencia de fugas, posibilidad de modelado y una integración razonable en una estructura robótica blanda.

3.3. Diseño Conceptual C — MR-Foam

El tercer diseño conceptual se basa en utilizar MR-Foam. En este caso, las falanges incorporan una estructura porosa flexible cargada con partículas ferromagnéticas. Como se observa en la fila inferior de la Figura 2, la presencia de poros permite una deformación pasiva elevada, lo que facilita que los dedos se adapten a objetos irregulares o frágiles.

En una pinza, el MR-Foam podría ayudar a aumentar el área efectiva de contacto y a repartir mejor las presiones du-

rante el agarre. Esto resulta especialmente relevante cuando se quieren manipular objetos delicados sin dañarlos. Al aplicar el campo magnético, la espuma puede aumentar su resistencia a la compresión y, por tanto, contribuir a una mayor rigidez efectiva del dedo (Gaeta et al., 2023; Atakuru et al., 2024).

Una posible configuración sería utilizar una espuma polimérica flexible cargada con partículas ferromagnéticas y recubierta por una fina membrana elastomérica para mejorar la integridad superficial. Otra opción, algo más arriesgada, sería impregnar la espuma con fluido MR. Sin embargo, esta solución podría aumentar el riesgo de exudación durante ciclos repetidos de compresión.

La principal ventaja de esta alternativa es su elevada adaptación pasiva y su capacidad de amortiguación. Por eso, puede ser adecuada en tareas donde la seguridad de contacto y la adaptación morfológica sean prioritarias. Aun así, su comportamiento mecánico es menos predecible que el de los MRF o sMRE, y la distribución del campo magnético dentro de una estructura porosa puede ser más difícil de controlar.

Por ello, el MR-Foam se considera una línea exploratoria prometedora, más orientada a mejorar la adaptación morfológica y la seguridad de contacto que a conseguir el mayor cambio de rigidez. Probablemente necesitaría una caracterización experimental más profunda antes de plantearla como opción principal para un primer prototipo funcional.

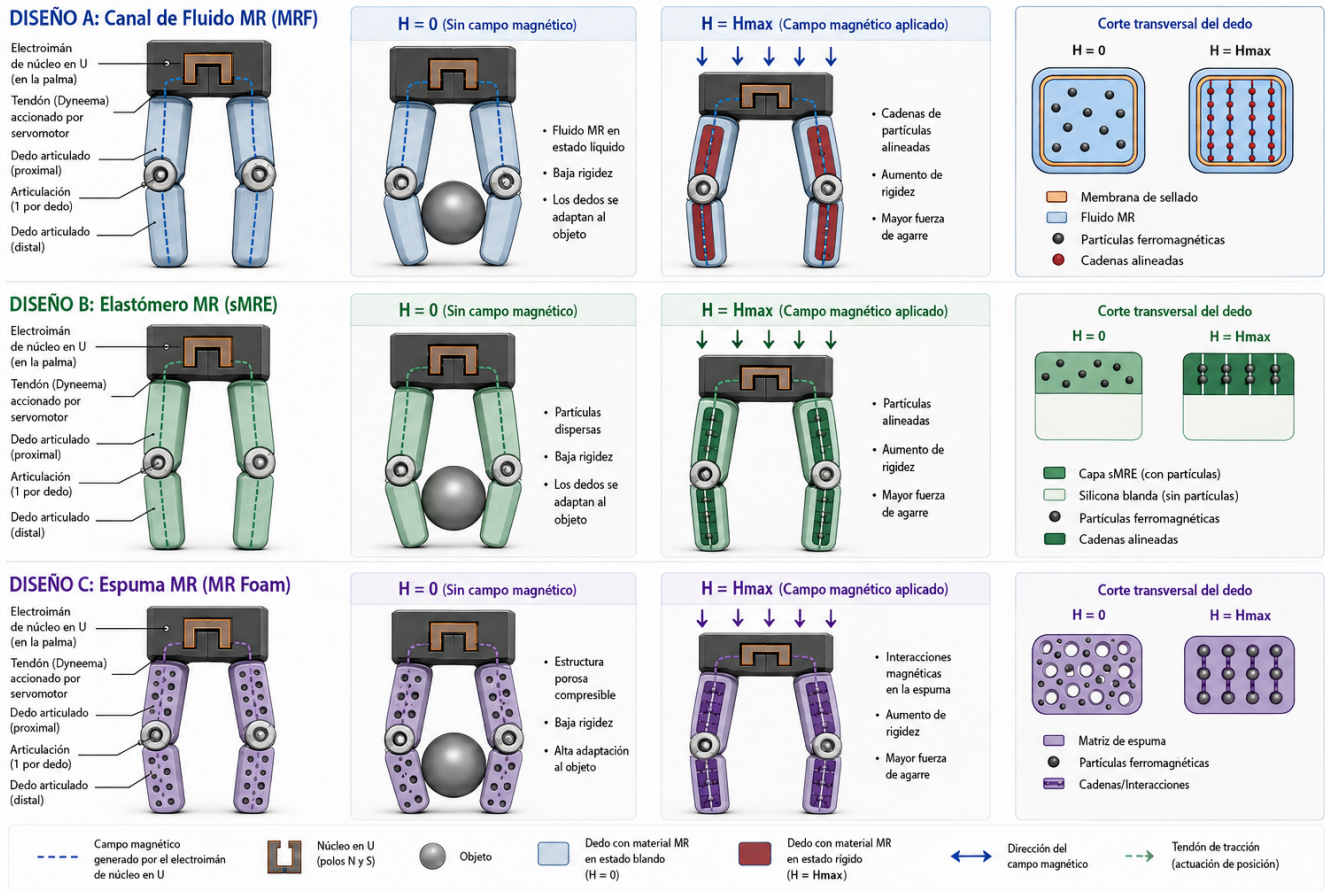


Figura 2: Comparación conceptual de las tres variantes de dedo magnetorreológico propuestas dentro de la misma arquitectura de pinza. La fila superior representa el diseño con MRF o encapsulado en canales internos, la fila central muestra la alternativa basada en sMRE y la fila inferior corresponde al diseño con MR-Foam. En cada caso se compara el comportamiento sin campo magnético y con campo aplicado, indicando cómo cambia la distribución interna de las partículas ferromagnéticas y cómo esta modificación contribuye al aumento de rigidez del dedo durante el agarre.

4. Análisis Comparativo

En conjunto, ninguna de las tres alternativas es claramente superior en todos los criterios. Cada material resuelve unos problemas y complica otros. Por eso, la comparación no puede hacerse solo mirando la variación de rigidez, sino también la fabricación, la robustez, la adaptación al objeto y la dificultad de modelarlo. La Tabla 1 resume de forma cualitativa las principales diferencias entre las tres alternativas.

El diseño basado en MRF presenta el mayor potencial de cambio de rigidez y una respuesta magnetorreológica muy marcada. Al aplicar el campo magnético, las partículas suspendidas en el fluido forman cadenas que aumentan la resistencia interna del material, permitiendo limitar la deformación de las falanges.

Sin embargo, esta alternativa también introduce la mayor complejidad constructiva. Requiere canales internos sellados, membranas flexibles capaces de soportar ciclos de deformación y control de posibles fugas o sedimentación de partículas. Además, su simulación mediante FEM sería más compleja, porque habría que considerar a la vez el fluido, la membrana elastomérica, la deformación del dedo y la variación reológica inducida por el campo magnético.

El diseño basado en sMRE ofrece una variación de rigidez más moderada, pero resulta más robusto y más sencillo

de integrar. Al tratarse de un material sólido, se eliminan los problemas de fuga y se facilita la fabricación mediante moldeo. Además, su comportamiento puede aproximarse inicialmente mediante modelos de módulo elástico dependiente del campo magnético, lo que lo convierte en una alternativa más adecuada para una primera validación funcional y simulable (Moreno-Mateos et al., 2023).

Aunque su cambio de rigidez pueda ser menor que el del MRF, su equilibrio entre rendimiento, fabricación y durabilidad lo convierte en la opción más realista para un primer prototipo. Esta elección también se apoya en trabajos previos sobre fabricación, caracterización y aplicación de elastómeros magnetorreológicos en sistemas blandos (Saber and Sedaghati, 2023; Bernat et al., 2022; Gutenko et al., 2025).

El MR-Foam destaca por su elevada adaptación pasiva, su compresibilidad y su capacidad de amortiguación. Estas propiedades pueden ser muy útiles para manipular objetos frágiles o con geometrías poco regulares. Sin embargo, su comportamiento poroso y compresible hace que su caracterización sea menos directa. Además, la distribución del campo magnético dentro de la espuma puede ser menos uniforme. Por tanto, se plantea como una alternativa exploratoria orientada a maximizar la seguridad de contacto, pero no como la opción más inmediata para una primera implementación.

Tabla 1: Comparación cualitativa de las tres arquitecturas de dedo magnetorreológico propuestas.

Diseño	Δk	Fabricación	Fugas	Sedimentación	Adaptación	Robustez	FEM	Madurez
MRF	Alta	Baja	Alta	Posible	Media	Media	Alta	Media
sMRE	Media	Alta	Nula	No relevante	Media	Alta	Media	Alta
MR Foam	Baja	Media	Media	Posible	Alta	Media	Alta	Exploratoria

A partir de esta comparación, el sMRE se identifica como la alternativa más equilibrada para un primer prototipo funcional, ya que combina una integración mecánica sencilla, ausencia de fugas, buena robustez y una respuesta de rigidez controlable. El MRF se mantiene como una opción con mayor rendimiento potencial, pero también con más dificultad de fabricación y validación. La espuma MR, por su parte, se considera una línea futura interesante para aplicaciones donde la adaptación pasiva y la seguridad de contacto sean más importantes que alcanzar el máximo cambio de rigidez.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto una arquitectura de pinza robótica blanda con rigidez variable basada en materiales MR. La arquitectura combina dos dedos opuestos articulados, un sistema de accionamiento por tendón y un electroimán de núcleo en U integrado en la palma. Con esta configuración se separa el control de posición de los dedos, realizado mediante el tendón, del control de rigidez, generado mediante el campo magnético aplicado al material MR.

La aportación de esta pinza está en la secuencia de funcionamiento propuesta, basada en dos fases principales. Primero, la pinza se aproxima al objeto con el material MR en estado blando, permitiendo que las puntas y la estructura de los dedos se deformen y se adapten pasivamente a la geometría del objeto. Después, una vez establecido el contacto, se activa el campo magnético, las partículas ferromagnéticas se alinean y la rigidez del material aumenta, estabilizando el agarre. Este principio de rigidización inducida magnéticamente se apoya en el comportamiento característico de los materiales MR.

Se han comparado tres variantes: un canal con MRF, una estructura bicapa con sMRE y un MR-Foam. El MRF ofrece el mayor potencial de variación de rigidez, aunque requiere resolver problemas de encapsulación, sellado y durabilidad. El sMRE destaca por su robustez, facilidad de integración y ausencia de fugas, mientras que el MR-Foam ofrece una mayor adaptación pasiva y capacidad de amortiguación, aunque todavía requeriría una caracterización más detallada. Como resultado del análisis comparativo, el sMRE se identifica como la alternativa más equilibrada para una primera implementación funcional de la pinza. Esta opción permite mantener una estructura blanda y adaptable durante el contacto, pero también incorporar un mecanismo de rigidización controlable mediante campo magnético.

Como trabajos futuros, se plantea fabricar prototipos funcionales de las tres variantes y caracterizarlos experimentalmente bajo distintos niveles de campo magnético. Esta caracterización permitiría evaluar la rigidez alcanzada, la fuerza de agarre, la repetibilidad y el comportamiento durante ciclos de apertura y cierre. Además, se propone desarrollar modelos numéricos mediante elementos finitos para estudiar la distribución del campo magnético y la respuesta mecánica de cada

diseño. Con estos resultados se podría refinar la geometría de los dedos, optimizar la posición del electroimán y seleccionar la arquitectura más adecuada para una futura integración en una mano robótica humanoide.

Agradecimientos

La investigación que ha dado lugar a estos resultados ha recibido apoyo del programa de Ayudas para la Actividad Investigadora de los Jóvenes Doctores del Programa Propio de Investigación de la UC3M, con referencia 2025/00826/001, concedido por la Universidad Carlos III de Madrid y también ha sido financiada mediante el programa de actividades de I+D con referencia TEC-2024/TEC-62 y acrónimo iRoboCity2030-CM, concedido por la Comunidad de Madrid a través de la Dirección General de Investigación e Innovación Tecnológica a través de la Orden 5696/2024.

Referencias

- Atakuru, T., Züngör, G., Samur, E., 2024. Layer jamming of magnetorheological elastomers for variable stiffness in soft robots. *Experimental Mechanics* 64, 393–404.
DOI: 10.1007/s11340-024-01031-7
- Bernat, J., Czopek, P., Superczynska, P., Gajewski, P., Marcinkowska, A., 2024. The construction of a soft gripper based on magnetorheological elastomer with permanent magnet. Preprint, arXiv / Poznan University of Technology. Submitted July 2024.
- Bernat, J., Gajewski, P., Kapela, R., Marcinkowska, A., Superczynska, P., 2022. Design, fabrication and analysis of magnetorheological soft gripper. *Sensors* 22 (7), 2757.
DOI: 10.3390/s22072757
- Carlson, J., Jolly, M., 2000. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics* 10 (4–5), 555–569.
DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00064-2
- de Vicente, J., Klingenberg, D., Hidalgo-Alvarez, R., 2011. Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter* 7, 3701–3710.
DOI: 10.1039/c0sm01221a
- Gaeta, L. T., McDonald, K. J., Kinnicutt, L., Le, M., Wilkinson-Flicker, S., Jiang, Y., Atakuru, T., Samur, E., Ranzani, T., 2023. Magnetically induced stiffening for soft robotics. *Soft Matter* 19, 2623–2636.
DOI: 10.1039/d2sm01390h
- Gutenko, D., Goldasz, J., Sapiński, B., Orkisz, P., 2025. Soft mre gripper: Preliminary study. *Actuators* 14 (12), 585.
DOI: 10.3390/act14120585
- Huang, L., Hu, H., Ouyang, Q., 2022. Design and feasibility study of mrg-based variable stiffness soft robot. *Micromachines* 13 (11), 2036.
DOI: 10.3390/mi13112036
- Koivikko, A., Drotlef, D.-M., Sitti, M., Sariola, V., 2021. Magnetically switchable soft suction grippers. *Extreme Mechanics Letters* 44, 101263.
DOI: 10.1016/j.eml.2021.101263
- Lee, C., Kim, M., Kim, Y. J., Hong, N., Ryu, S., Kim, H. J., Kim, S., 2017. Soft robot review. *International Journal of Control, Automation and Systems* 15 (1), 3–15.
- Moreno-Mateos, M. A., Danas, K., Garcia-Gonzalez, D., 2023. Influence of magnetic boundary conditions on the quantitative modelling of magnetorheological elastomers. *Mechanics of Materials* 184, 104742.
DOI: 10.1016/j.mechmat.2023.104742
- Saber, A., Sedaghati, R., 2023. A comprehensive review of magnetorheological elastomers: Materials, fabrication, and applications. *Advanced Engineering Materials* 25, 2300182.
DOI: 10.1002/adem.202300182