



Oscar López García

Doctor Ingeniero Industrial. Profesor del Departamento de Fluidos y Calor e Investigador en el Instituto de Investigación Tecnológica de la ETSI-ICAI. Sus campos de conocimiento son la mecánica del medio continuo, sistemas de energía eólica, mecánica de la fractura y fatiga, materiales inteligentes y el método de los elementos finitos.



Alberto Carnicero López

Doctor Ingeniero Industrial del ICAI prom. 1995. Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica e Investigador en el Instituto de Investigación Tecnológica de la ETSI-ICAI. Sus campos de conocimiento están relacionados con la aplicación de métodos numéricos a la resolución de problemas de dinámica de estructuras y mecánica de medios continuos, así como el modelado de materiales inteligentes para su empleo en actuadores o sensores.



Rosa Ruiz Pablos

Licenciada en Ciencias Físicas por la Universidad de Salamanca (Especialidad Fundamental). Ha trabajado en proyectos de investigación en las áreas de energía atómica, física nuclear, física del estado sólido e ingeniería de materiales. Actualmente investiga en el Instituto de Investigación tecnológica de la ETSI-ICAI (Análisis y diseño en Ingeniería).



Materiales inteligentes I/II. Introducción a los materiales del siglo XXI

En la última década se ha experimentado un gran avance en el campo de los materiales inteligentes asociado fundamentalmente a la madurez tecnológica alcanzada en su desarrollo. Los materiales inteligentes han conseguido precios competitivos y elevadas prestaciones, lo cual ha fomentado el desarrollo de estructuras inteligentes capaces de cambiar la concepción de la ingeniería. En este artículo se hace una breve presentación de los principios físicos en los que se basan la mayor parte de los considerados materiales inteligentes.

Materiales y estructuras inteligentes

El campo tecnológico de los denominados materiales inteligentes ha evolucionado rápidamente en los últimos años aunque desde los años 50 se llevan empleando materiales y conceptos que podrían denominarse como inteligentes. Los fundamentos físicos en los que se basa el funcionamiento de estos materiales se conoce desde el siglo XIX en la mayor parte de los casos.

La terminología que rodea este campo es la mayor parte de las veces confusa, dispersa y poco precisa. De hecho, se suelen emplear los términos materiales inteligentes, materiales activos o materiales adaptativos indistintamente. En el presente artículo se ha preferido la denominación de materiales inteligentes y en la medida de lo posible será la empleada.

Existen diversas definiciones de material inteligente entre las cuales la más establecida y aceptada define un material inteligente como aquel material que responde ante un estímulo exterior cambiando sus propiedades o incluso su forma. Sin embargo, según esta definición

todos los materiales se comportan así, luego ¿son todos los materiales inteligentes? Ni mucho menos, aunque la mayor parte de los materiales se expanden cuando son calentados, algunos se vuelven más dúctiles e incluso otros pueden convertirse en conductores eléctricos, lo que hace inteligente a un material es que cambios como los anteriormente descritos ocurran por diseño. Es decir, que este cambio de propiedades persiga el cumplimiento de una funcionalidad para la cual el sistema fue diseñado. Así pues una definición más precisa podría ser la siguiente: *un material inteligente es un sistema de ingeniería hecho por el hombre que mimetiza la habilidad de la naturaleza para reaccionar ante estímulos exteriores.*

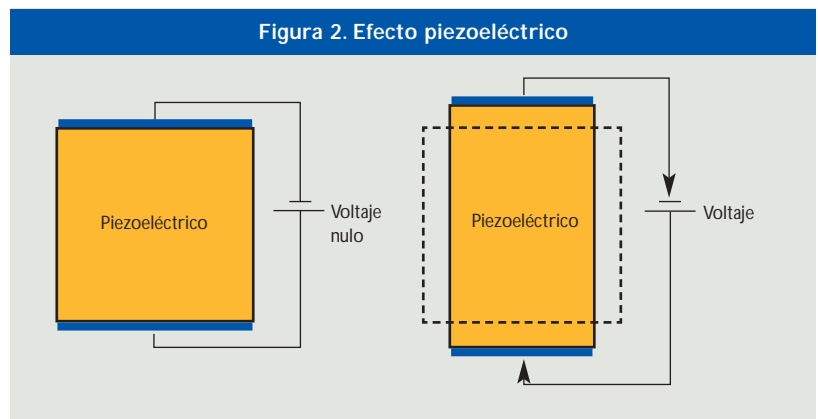
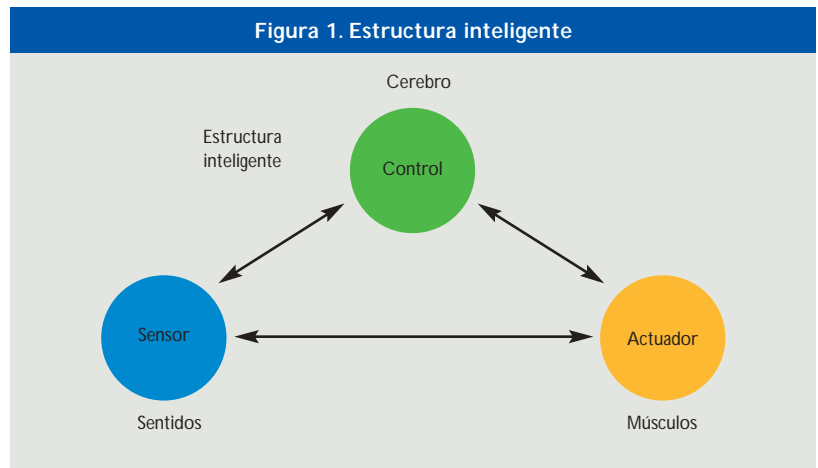
En cualquier caso la definición rigurosa de material inteligente implica multitud de dificultades. Para muchos investigadores los materiales inteligentes no dejan de ser simples materiales que producen una respuesta proporcional a un estímulo exterior, pero que incluyen principios de adaptación y realimentación. En cambio otros autores establecen una

importante distinción entre materiales activos e inteligentes, en el sentido en el que los materiales realmente inteligentes se les debería exigir características como la de ser capaces de tomar decisiones o incluso autorepararse a ellos mismos.

Los materiales inteligentes y sobre todo las estructuras inteligentes son sistemas complejos que contienen tanto componentes activos como pasivos. La respuesta del sistema normalmente es una combinación de las características de los componentes activos y pasivos. La cuestión de si el sistema debe considerarse como un material o una estructura inteligente es a menudo una cuestión de escala. Desde este punto de vista, las estructuras inteligentes pretenden imitar el comportamiento de la naturaleza. Al igual que en el caso de nuestros sentidos: vista, oído, olfato, gusto y tacto se han desarrollado análogamente sensores: ópticos, acústico-ultrasonicos, eléctricos, químicos y térmico-magnéticos. La respuesta de estos sensores es convertida en señales eléctricas y se transmite al centro de proceso de la información o unidad de control, cerebro. El papel desempeñado por la unidad de control es la toma de decisiones en función de las señales de entrada detectadas por los sensores para posteriormente enviar las señales oportunas a los actuadores, músculos, para responder de acuerdo a la estrategia programada en la unidad de control (Figura 1). Actualmente las estructuras inteligentes carecen de una unidad de control en sí misma como tal y las decisiones que se toman no dejan de ser simples en su esencia. Para dotar a la propia estructura de la capacidad de toma de decisiones es necesario embeber dentro de la propia estructura la unidad de control y de proceso de la información junto con los sensores y actuadores. Con el advenimiento de la tecnología MEMS (Sistemas Micro-Eléctrico-Mecánicos) este tipo de desarrollo parece encontrarse en el umbral de la madurez tecnológica. El lector interesado puede encontrar mas información sobre materiales y estructuras inteligentes en referencias generales como [11].

Clasificación de los materiales inteligentes

Existen diversas formas de clasificar los materiales inteligentes. En este artículo se ha elegido una clasificación basada en el fundamento físico. Así pues, los materiales inteligentes mas empleados se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes características:



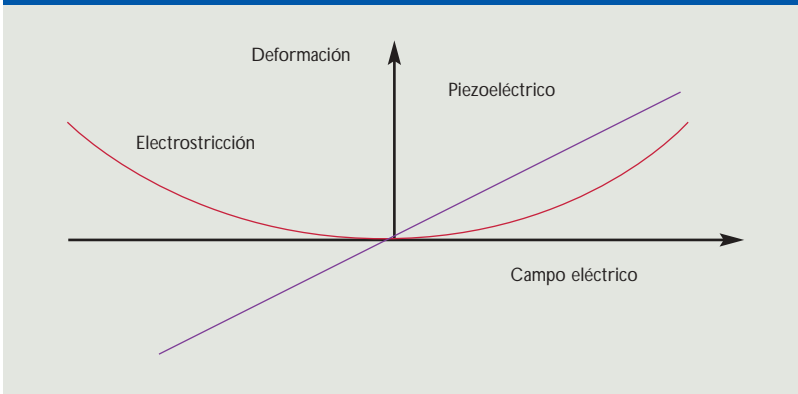
piezoelectricidad, magnetoestricción, aleaciones de memoria de forma, fluidos reológicos, fibra óptica y sistemas microelectromecánicos entre otros muchos. A continuación, se describirán brevemente las propiedades y fundamentos de estos materiales.

Piezoelectricidad

El efecto piezoeléctrico se basa en que ante un proceso de deformación en el material se induce una polarización eléctrica que crea una diferencia de potencial eléctrico (efecto piezoeléctrico directo). El efecto también existe en el sentido contrario. Es decir, ante la presencia de un campo eléctrico exterior el material se deforma y lo hace proporcionalmente al valor del campo eléctrico (efecto piezoeléctrico inverso). En la Figura 2 se muestra esquemáticamente el efecto piezoeléctrico.

El efecto piezoeléctrico es conocido desde hace más de un siglo. Originalmente fue descubierto en una sal de Rochelle por los hermanos Jacques y Pierre Curie alrededor del año 1880. Los materiales que poseen carácter piezoeléctrico de forma natural son las

Figura 3. Comparación efecto piezoeléctrico frente a la electrostricción



sales de Rochelle y el cuarzo. Sin embargo, el desarrollo tecnológico de los llamados piezoeléctricos ferroeléctricos que amplifican el efecto piezoeléctrico ha hecho posible su uso de forma tecnológicamente madura. En los últimos años de la década de los 40 se desarrollaron materiales piezoeléctricos cerámicos basados en el titanato de bario que fueron empleados como elementos sensores de vibraciones mecánicas en sonares. Posteriormente se han desarrollado otras cerámicas y polímeros que presentan mejores propiedades y que se han convertido en los materiales piezoeléctricos más empleados. Estos materiales presentan carácter piezoeléctrico después de haber sido sometidos a una polarización artificial. Las cerámicas pueden ser de tantalato de litio, nitrato de litio o berlinita. Se puede encontrar información no solo comercial sino también sobre modelos, propiedades y aplicaciones de los materiales cerámicos piezoeléctricos en [3].

Actualmente existen dos tipos de materiales piezoeléctricos ampliamente aceptados: cerámicas y polímeros piezoeléctricos. Las cerámicas piezoeléctricas más empleadas se denominan titanato de zirconio de plomo (PZT). Su composición química es $Pb_x(TiZr)_{1-x}O_3$. Una de las composiciones comercialmente más típicas contiene aproximadamente el 47% de $PbTiO_3$ y el 53% de $PbZrO_3$. El polímero piezoeléctrico más desarrollado es el poli(fluoruro de vinilideno) (PVDF). Mientras que las piezocerámicas son rígidas y frágiles, los piezopolímeros son flexibles y dúctiles. Teniendo en cuenta estas características los piezocerámicos son magníficos candidatos para ser empleados como actuadores debido a su gran módulo de elasticidad lo cual facilita el acoplamiento mecánico con la estructura. Para conseguir desplazamientos apreciables se suelen apilar juntos un

gran número de piezocerámicos. En cambio, los piezopolímeros están mejor preparados para actuar como sensores porque añaden una rigidez mínima a la estructura dada su flexibilidad y además son fácilmente fabricables. De hecho, la forma más habitual de emplearlos es como sensores de contacto y transductores acústicos en forma de lámina delgada.

En un material existen regiones que presentan la misma orientación de polarización y son denominadas dominios. La orientación de la polarización en cada dominio se distribuye aleatoriamente y la polarización total termina siendo eléctricamente nula. Para conseguir desarrollar el efecto piezoeléctrico en una cerámica se somete a ésta a un elevado campo eléctrico de manera que se fuerza a que todos dominios se orienten en la dirección del campo.

Realmente el acoplamiento que existe entre el campo de deformación y el campo eléctrico en un material piezoeléctrico se puede manifestar de dos formas diferentes atendiendo a la relación entre causa y efecto, que se denominan piezoelectricidad y electrostricción. La diferencia entre la piezoelectricidad y la electrostricción aparece cuando se invierte el sentido del campo eléctrico. Mientras que el piezoeléctrico puede alargarse o comprimirse, el electrostrictivo solo puede alargarse independientemente de la dirección del campo eléctrico aplicado. En la Figura 3 se muestra gráficamente la diferencia entre ambos efectos.

Físicamente todos los materiales piezoeléctricos manifiestan electrostricción, sin embargo el efecto piezoeléctrico domina frente a la electrostricción. La polarización electrónica justifica el efecto electrostrictivo. Un átomo neutro es deformado en la medida en que es polarizado por la aplicación de un campo eléctrico y evidentemente el sentido del campo no afecta la dirección de la deformación porque siempre se alargará. Dado que todos los materiales tienen una estructura electrónica todos experimentan electrostricción. Sin embargo, solo determinadas cerámicas, como PMN, han sido especialmente diseñadas para ofrecer elevadas deformaciones y pueden ser empleadas como materiales activos.

Los materiales piezoeléctricos han sido embebidos en materiales compuestos para conseguir el amortiguamiento de vibraciones, detección de impacto y diagnosis de daño. También han sido empleados en micrófonos,

sónares, acelerómetros e incluso en sistemas de supresión de ruido entre otras diversas aplicaciones. Algunas de las limitaciones que presentan los materiales piezocerámicos son envejecimiento O_3 decaimiento con el tiempo de algunas de sus propiedades, fragilidad e histéresis a campos elevados.

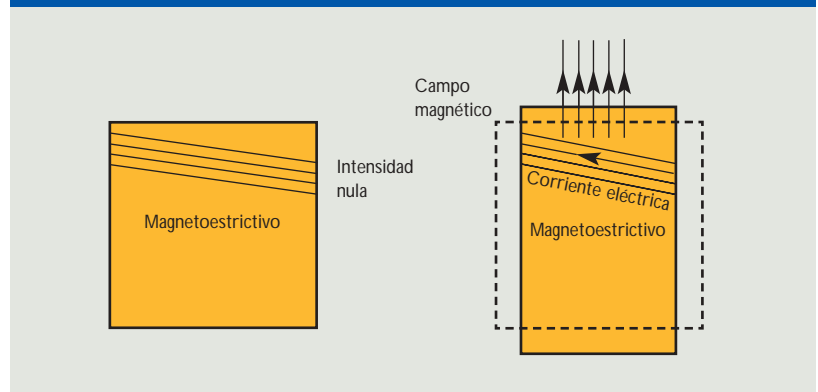
Magnetoestricción

El efecto magnetoestrictivo se basa en que en el material ante la presencia de un campo magnético exterior se induce una deformación. Igualmente que el caso de la piezoelectricidad estos materiales también experimentan el efecto inverso, es decir, ante una deformación del material se induce un campo magnético. En general la mayor parte de los materiales magnetoestrictivos presenta magnetoestricción positiva, es decir, ante un campo magnético se alargan, sin embargo materiales como el níquel ante el mismo campo se contraen.

El fenómeno de la magnetoestricción fue descubierto por Joule en 1842 [7]. Joule observó que bajo un campo magnético débil en la dirección del eje de una barra de hierro ésta experimentaba un incremento de su longitud, ver Figura 4. Otros efectos magnetoestrictivos implican acoplamiento en las tres direcciones del espacio y naturaleza anisótropa de la magnetoestricción. En 1972 Clark et. al descubrieron que materiales basados en tierras raras a los cuales se les añadía hierro experimentaban grandes desplazamientos magnetoestrictivos a temperatura ambiente. Sin embargo estos materiales presentaban una elevada anisotropía lo cual hacía difícil su utilización en aplicaciones prácticas. Para reducir esta anisotropía se sintetizó una aleación a partir de compuestos con elevada magnetoestricción como eran el $TbFe_2$ y $DyFe_2$. Finalmente el compuesto que presentaba las mejores propiedades fue una aleación de hierro, terbio y disprosio, y tenía la siguiente composición $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$, $0,25 < x < 0,3$. Se la denominó Terfenol, cuyo nombre proviene de TER, Terbio, FE hierro, y NOL de Naval Ordnance Laboratory, el laboratorio donde fue desarrollada inicialmente y es el material magnetoestrictivo comercialmente más establecido. Etrema Products comercializa Terfenol-D en diversas formas y tamaños [5].

Los actuadores magnetoestrictivos se emplean en la industria aeroespacial para activar superficies sustentadoras en alas de aviones, control de vibraciones en palas de helicópteros.

Figura 4. Efecto magnetoestrictivo



También han sido empleados como elementos detectores de corrosión en tuberías así como en el amortiguamiento de vibraciones de estructuras espaciales. En la referencia [1] se puede encontrar más información sobre los fundamentos físicos, modelos y aplicaciones de la magnetoestricción. Entre las limitaciones más importantes que presentan cabe destacar su elevada no linealidad y la necesidad de aplicar elevados campos magnéticos para inducir desplazamientos apreciables del orden de milímetros.

Aleaciones de memoria de forma (SMA)

Las aleaciones de memoria de forma son capaces de recordar su tamaño y forma originales después de haber sufrido un proceso de deformación siendo incluso capaces de volver a dicha configuración inicial a una temperatura determinada. Esta característica denominada efecto de memoria de forma fue por primera vez observada en 1932 en componentes de cadmio-oro y en 1938 en aleaciones de cobre-zinc. Fue en 1962, y nuevamente en el Naval Ordnance Laboratory donde se encontraron aleaciones de Níquel-Titanio que presentaban este fenómeno de manera significativa. Estas aleaciones denominadas comúnmente Nitinol, NI de Níquel, TI de titanio y NOL de Naval Ordnance Laboratory, son las que comercialmente se encuentran más extendidas. Una empresa que comercializa Nitinol es Nitinol Devices and Components [2].

El fundamento físico de su funcionamiento se basa en que la aleación presenta diferentes estructuras a escala atómica a baja y altas temperaturas. El Nitinol se caracteriza porque sufre una transformación de fase a una determinada temperatura. Durante esta transformación la estructura de la aleación cambia de austenita a martensita. Esta trans-

Figura 5. Funcionamiento básico de una aleación de forma

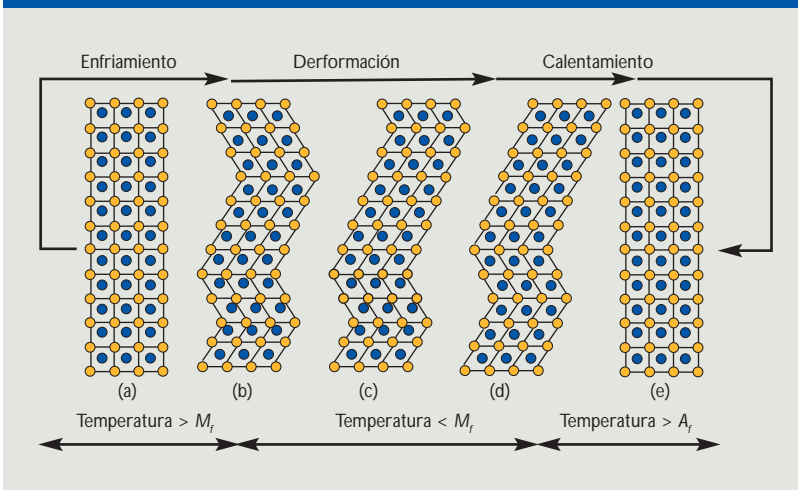
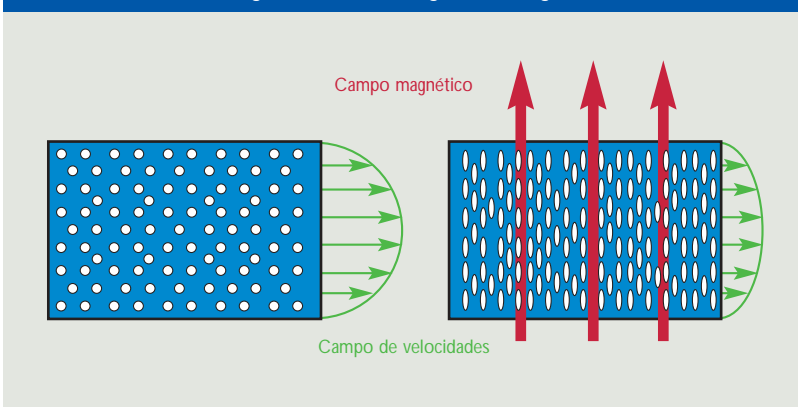


Figura 6. Fluido magnetoreológico



formación va acompañada directamente de un cambio de volumen y forma del componente. Además, si el material ha sido apropiadamente diseñado la transformación puede ser completamente reversible y reproducible.

Aunque la transformación es extremadamente rápida la frecuencia del sistema está limitada por las constantes de tiempo asociada al proceso térmico. Sin embargo si la aleación de forma es usada en forma de cables delgados los tiempos de respuesta pueden ser mejorados. Dado que la aleación de forma tiene una elevada conductividad eléctrica y los cables presentan pequeña sección transversal permiten que la disipación eléctrica se emplee para calentar la aleación y producir la transformación de fase al hacer pasar una corriente eléctrica.

En la Figura 5 se muestra el proceso de enfriamiento, deformación y calentamiento de una aleación de memoria de forma para recuperar su forma inicial. En (a) se muestra la estructura del cristal original, según se produ-

ce el enfriamiento la austenita se va transformado en martensita hasta alcanzar la temperatura M_f en la que toda la austenita se ha convertido en martensita (b). A temperaturas inferiores a M_f se pueden producir procesos de deformación (c) y (d) de forma que calentando se va convirtiendo martensita en austenita de manera que una vez alcanzada la temperatura en la cual se ha convertido toda la martensita en austenita, A_f , el material recupera su forma inicial.

Las aleaciones de memoria de forma se han empleado como cables activos para estructuras, monturas de gafas o mecanismos de despliegue de satélites entre otras muchas aplicaciones. Su uso puede encontrar algunas limitaciones ya que presentan anchos de banda bajos e histéresis.

Fluidos reológicos

Son fluidos cuyas propiedades cambian ante la presencia de un campo eléctrico o magnético exterior. Los fluidos reológicos son líquidos inertes que portan partículas en suspensión. Estas partículas tienen un tamaño del orden 5 μm y son habitualmente aceites de silicona o minerales.

Existen dos tipos de fluidos reológicos que pueden considerarse materiales activos. Se trata de los fluidos electroreológicos y los magnetoreológicos. Ambos se basan en el mismo principio y solo se diferencian en que son sensibles a diferentes estímulos exteriores. Mientras que un fluido electroreológico cambia sus propiedades ante un campo eléctrico exterior, el magnetoreológico lo hace ante un campo magnético. Esta propiedad es consecuencia de la formación de estructuras dentro del fluido como respuesta a los estímulos exteriores. A bajos esfuerzos esta formación de estructuras, realmente agregados de partículas sólidas, domina el flujo del fluido y puede llegar a evitar la creación del mismo. En la Figura 6 se muestra el efecto de la presencia de un campo magnético sobre el campo de velocidades de un fluido magnetoreológico.

Cuando no existe campo exterior los fluidos reológicos pueden considerarse fluidos newtonianos. En esta condición se comportan como un fluido normal, es decir, ante una velocidad de deformación de deslizamiento oponen un esfuerzo viscoso y este esfuerzo es proporcional a la velocidad de deformación a través de la viscosidad del fluido. Cuando se aplica un campo exterior, las partículas en suspensión forman cadenas en la dirección

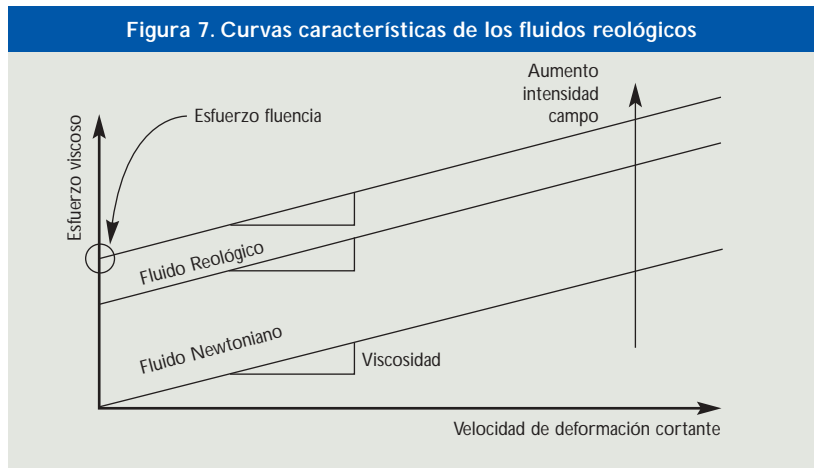
del campo. Si el campo se aplica perpendicularmente a la dirección del flujo del fluido entonces las cadenas se forman perpendicularmente al flujo y como consecuencia del propio flujo estas cadenas se rompen y deben ser otra vez formadas, de manera que la continua rotura y formación de cadenas da como resultado la aparición de un esfuerzo que se opone al movimiento. Para producir el deslizamiento de las capas de fluido es necesario superar este esfuerzo denominado de fluencia. Ante esfuerzos inferiores al de fluencia el fluido reológico responde como un sólido viscoelástico. La ventaja que presentan estos fluidos es que para conseguir una velocidad de deformación determinada es necesario un esfuerzo viscoso superior al que correspondería en el caso de un fluido ordinario, y este esfuerzo es controlable en función de la intensidad del campo exterior. Este aumento del esfuerzo viscoso no se debe a un aumento de la viscosidad, sino que se produce porque el esfuerzo de fluencia aumenta con el valor del campo exterior, ver Figura 7.

El aumento de esfuerzo viscoso de estos fluidos los hace especialmente atractivos para aplicaciones relacionadas con el amortiguamiento y control activo de vibraciones. Entre diversos fabricantes y vendedores de este tipo de materiales cabe destacar en los fluidos magnetoreológicos [9] y en electroreológicos [6].

Los fluidos reológicos se han empleado generalmente como actuadores y especialmente en el control de vibraciones como por ejemplo en el desarrollo de amortiguadores, apoyos de motores y amortiguadores para palas de helicópteros. Uno de las limitaciones de su implantación es que necesitan elevados niveles de campo exterior para producir niveles aceptables de actuación.

Fibra óptica

Al igual que un cable de cobre conduce electricidad la fibra óptica transmite luz. El uso más común de la fibra óptica es el de transmisión de datos como televisión, teléfono, etc. En el campo de las estructuras inteligentes, la fibra óptica es esencialmente empleada como elemento sensor debido principalmente a su inmunidad a interferencias electromagnéticas, pequeño tamaño, ligereza, compatibilidad con el material matriz y a la enorme capacidad para transportar información. La fibra óptica es capaz de detectar diversos tipos de información incluyendo temperatura, cambios químicos, deformación,



presión, vibración de componentes estructurales etc. Se suelen fabricar basadas en vidrio por ser éste un material con alto índice de refracción. Esta característica facilita que la luz que se propaga por la fibra se refleje y no se transmita al medio exterior quedando confinada a la fibra en la que se transmite. El núcleo de la fibra se cubre también con vidrio con un índice de refracción inferior.

Una de las aplicaciones más habituales de la fibra óptica en las estructuras inteligentes es su capacidad para medir deformaciones. Entre otras posibilidades existentes las más habituales son:

- **Fibras microdobladas.** Los cambios en la estructura en la cual se encuentra embebida la fibra producen cambios en ciertas características ópticas que son empleadas para realizar la medición. Se suele emplear la diferencia de fase entre una señal que se transmite por una fibra y otra señal procedente de una fibra con microdobles a lo largo de su longitud. Las microdobles se crean intencionadamente para permitir la radiación de la luz al exterior. Existen fibras denominadas GRIN que emplean microdobles separadas periódicamente para atenuar la luz transmitida reduciendo el problema de la detección de fase a la medida de intensidad.
- **Sensor Fabry-Perot.** Este instrumento se adhiere a una superficie sobre la que se pretende medir deformaciones. Interiormente existe una fibra unimodal y una multimodal separadas por una distancia prefijada. Cuando la superficie se deforma se induce un cambio en la separación entre las dos fibras. Esto produce un cambio de fase debido a la interferencia entre dos reflexiones, una, la señal de referencia que se refleja en la interfase de la fibra unimodal y otra, la señal de la medida que se refleja en la interfase de la fibra

Tabla 1. Comparación de propiedades entre diversos materiales inteligentes [4]

Propiedad	PMN	PLZT	PVDF	Terfenol-D	Nitinol
Máxima deformación ($\times 10^{-6}$)	600	3000	200	1800	70000
Máximo esfuerzo (MPa)	72	180	1	90	190
Densidad (Kg/m^3)	7500	7500	1780	9250	6450
Módulo elástico (Gpa)	120	60	3	40	78
Eficiencia (%)	75	¿?	2	40	>3
Ancho de banda (Hz)	1000	¿?	1000	100	3
Densidad energética (KJ/m^3)	22	¿?	1	19	>10
Mecanismo de fractura	Frágil	Frágil	Dúctil	Frágil	Dúctil
Densidad de coste ($\$/\text{cm}^2$)	800	200	15	400	2
Madurez tecnológica	Comercial	Comercial	Comercial	Comercial	Comercial

multimodal. Este cambio de fase es la base de la medida de la deformación porque proporciona una medida de la separación entre las fibras y por tanto de la deformación.

- *Redes de Bragg.* En el núcleo de una fibra se crea una variación periódica del índice de refracción mediante la realización de una serie de marcas en forma de líneas paralelas en una pequeña longitud. Este enrejado permite el paso de ciertas longitudes de onda y en cambio refleja otras. Cuando la luz se encuentra con una de las redes de Bragg la longitud de onda proporcional a la separación de la red de Bragg es reflejada, de manera que en el espectro de la luz transmitida faltará esa componente y en cambio en el espectro de la luz reflejada aparecerá un pico asociado a esa longitud de onda. Cuando la fibra óptica con redes de Bragg se embebe en un elemento estructural la deformación producirá una variación del espaciado de la red por lo que longitud de onda reflejada también cambiará. Esta variación es la que se emplea para medir la deformación.

En la referencia [10] puede encontrarse una excelente revisión de los tipos de sensores basados en fibra óptica y su aplicación a las estructuras inteligentes.

Sistemas microelectromecánicos (MEMS)

Un sistema microelectromecánico es una tecnología que combina ordenadores con elementos mecánicos, sensores y actuadores embebidos en chips semiconductores. MEMS son pequeños instrumentos hechos mediante micromecanizado y otros procesos desarrollados para realizar circuitos integrados. Básicamente son mecanismos que contienen microcircuitos sobre un pequeño chip en el que se han añadido sistemas mecánicos. Su desarrollo como actuadores se ve frenado por su elevado coste

y solo en campos como la automoción y la biomedicina se han logrado introducir. El mayor uso que se les ha dado ha sido como sensores en general y en particular como sensores químicos, acelerómetros en airbags, frenos antibloqueo, medidores de presión sanguínea, sensores de detección de gas, etc. Para mayor información sobre MEMS [8].

Comparación de propiedades

En la Tabla 1 se muestra diversas propiedades de tres materiales con carácter piezoelectrico, el material magnetostrictivo mas empleado, Terfenol-D y la aleación de forma mas empleada, Nitinol. Se muestran diversas variables relativas a sus propiedades mecánicas y su eficacia en la conversión energética, así como entre otras características su coste. ■

Referencias

- [1] Edited by Gran Engdahl. Handbook of Giant Magnetostrictive Materials. Academic Press, 2000.
- [2] Nitinol Devices and Components. Nitinol manufacturer. <http://www.nitinol.com/Default.htm>.
- [3] Morgan Electroceramics. Piezoceramic manufacturer. <http://www.morganelectroceramics.com/index.html>.
- [4] R. Fletcher. Force transduction materials for human-technology interfaces. IBM Systems Journal, 35(3 and 4):630 638, 1996.
- [5] Etrema Products Inc. Magnetostrictive manufacturer. <http://www.etrema-usa.com>.
- [6] Technology Catalysts International. Electrorheological manufacturer. <http://www.technology-catalysts.com/>.
- [7] J.P. Joule. Philosophical Magazine, 30:76, 1847.
- [8] G. Paula. Mems sensors branch out. Mechanical Engineering, pages 64 68, 1996.
- [9] Rheonetic. Magnetorheological manufacturer. <http://www.rheonetic.com>.
- [10] A. Selvarajan and A. Asundi. Photonics, fiber optic sensor and their application in smart structures. Journal of Non-Destructive Evaluation, 15(2), 1995.
- [11] A.V. Srinivasan and D. Michael McFarland. Smart Structures. Analysis and Design. Cambridge University Press, 2001.