



ika4 research alliance

Ikerlan S.Coop
Pº J.M. Arizmendiarieta, 2
20500 ARRASATE - MONDRAGÓN
GIPUZKOA
Fernando Martínez
943 71 24 00 - fmartinez@ikerlan.es



Maier Technology Centre-MTC
Polígono Industrial Arabieta
Apartado 51
48300 GERNIKA - BIZKAIA
Mario Ordóñez
94 625 92 65 - marord@mtc.maier.es



ika4 research alliance
Fundación Cidetec
Parque Tecnológico de Miramón
Paseo Miramón, 196
20009 Donostia - GIPUZKOA
Josexto Pomposo
943 30 90 22 - jpomposo@cidetec.es



Inasmets
Mikelegi Pasealekua, 2
Parque Tecnológico / Teknologi Parkea
20009 Donostia - GIPUZKOA
Fernando Seco
943 00 37 04 - fernando.seco@inasmets.es



Grupo de Investigación en Metalurgia Física
UPV/EHU - Facultad de Ciencia y Tecnología LEIOA - BIZKAIA
Apartado 644, 48080 BILBAO
Jose Mº San Juan
94 601 24 78 - wrmpsanuj@lg.ehu.es



Grupo de Magnetismo y Materiales Magnéticos
UPV/EHU - Facultad de Ciencia y Tecnología LEIOA - BIZKAIA
Apartado 644, 48080 BILBAO
Jon Gutiérrez
94 601 25 53 - jon@we.lc.ehu.es



Laboratorio de Química Macromolecular
UPV/EHU - Facultad de Ciencia y Tecnología LEIOA - BIZKAIA
Apartado 644, 48080 BILBAO
Jose Luis Vilas
94 601 59 67 - gfpvivil@lg.ehu.es



Robotiker
Parque Tecnológico, Edif. 202
48170 Zamudio - BIZKAIA
Arantxa Rentería
94 600 22 66 - arantxa@robotiker.es



Mondragón Goi Eskola Politeknikoa (MGEp)
Loramendi 4, Aptdo. 23
20500 Mondragón - GIPUZKOA
Jon Aurrekoetxea
943 79 47 00 - jaurrekoetxea@eps.mondragon.edu



ika4 research alliance

Adimendun

M A T E R I A L A K

ENERO 2008



Boletín externo ACTIMAT nº 18



- 1 ESTRUCTURAS INTELIGENTES: CONTROL Y ACTUACIÓN EN BASE A MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS
- 2 ACTIVIDADES
- 3 PUBLICACIONES Y CONGRESOS
- 4 NOVEDADES



Para solicitar información acerca de estos artículos y publicaciones, contactar con

JOSÉ RAMÓN DIOS
GAIKER
CENTRO TECNOLÓGICO

Parque Tecnológico, Edificio 202
48170 Zamudio BIZKAIA SPAIN
Tel.: 34 94 600 23 23
Fax: 34 94 600 23 24
e-mail: dios@gaiker.es
http://www.actimat.org

■ ■ ■ ESTRUCTURAS INTELIGENTES- CONTROL Y ACTUACIÓN EN BASE A MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS.

INASMET-TECNALIA

Las vibraciones que experimentan las estructuras es, hoy en día, uno de los problemas tecnológicos a los que se enfrentan sectores tan diversos como el de la construcción, el de la ingeniería civil (puentes, túneles o estructuras elevadas), el del transporte (aeronáutica, automoción, ferrocarril) o el de la máquina herramienta... Esto provoca pérdidas económicas, por ejemplo, por consumos energéticos excesivos o por fallos en la propia estructura o en las instalaciones contiguas a la fuente de vibración. Este problema puede llegar a causar daños incluso a los propios usuarios de la estructura vibrante. Dentro de este contexto, los materiales inteligentes actualmente se proponen como una solución de gran interés tecnológico para la amortiguación y el control de las vibraciones estructurales.

El uso de materiales inteligentes para el control de vibraciones ha originado un nuevo concepto, el de **estructura inteligente**, que podríamos definir como la estructura que es capaz de detectar las vibraciones a las que está sometida (*control pasivo*) y, además, actuar sobre ellas de algún modo (*control activo*). Es en este último concepto en el que INASMET-Tecnalia ha estado trabajando durante los últimos años, el control activo de vibraciones en estructuras (*diseño de estructuras inteligentes*).

Si bien, la mayoría de los materiales empleados para el control de las vibraciones, son pasivos (suelos aislantes, tapones, cascos, materiales más resistentes a la fatiga, etc.) y se trata sólo de soluciones que mitigan el daño pero sin reducir las vibraciones de la estructura. Entre los materiales inteligentes más empleados en el control activo de estructuras están los materiales piezoeléctricos, los magnetostrictivos y las aleaciones con memoria de forma. Todas estas familias de materiales inteligentes tienen la capacidad de experimentar una deformación mecánica frente a un estímulo externo (campo eléctrico o magnético, variación térmica). Entre estas soluciones una de las que mayor versatilidad aporta son los materiales piezoeléctricos debido a su gran capacidad de actuación, alta sensibilidad a la deformación mecánica su gran banda de frecuencias de actuación, su buena linealidad voltaje/desplazamiento, y de integración en estructuras compuestas o metálicas.

Una vez seleccionado el tipo de material a emplear, es necesario caracterizar y controlar este tipo de sensores/actuadores en un entorno de vibraciones conocido. Para ello, se ha diseñado una estructura inteligente formada por una viga en voladizo dotada de sensores piezoeléctricos que nos permiten resolver

las vibraciones en una dimensión (1D). Se ha trabajado con los elementos piezoeléctricos adheridos en la superficie de la estructura, puesto que esto nos permite variar la colocación de los elementos actuadores en diferentes posiciones de la estructura vibrante. La viga ha sido fabricada de material compuesto para la que se ha empleado una matriz de resina epoxy y fibra de vidrio con una configuración de la fibra 0/90° mediante el método de compresión.

Los pasos que se han seguido en esta investigación son la selección de los actuadores piezoeléctricos más adecuados



Figura 1. Demostrador de viga en voladizo en la que se han ensayado los elementos piezoeléctricos.

(*actuador MFC*), modelización teórica y experimental de los modos de vibración de la estructura (*caracterización de la estructura*) y control de los elementos activos (*control de los sensores/actuadores MFC*).

Diseño del demostrador:

La viga se ha montado en voladizo, como se puede ver en la fotografía del demostrador, ver figura 1. En el extremo libre de la viga se ha incluido un sensor Láser de posición OPTO NCDT 1401 de la marca comercial MicroEpsilon para corroborar las lecturas obtenidas por los sensores/actuadores piezoeléctricos. Los sensores y/o actuadores empleados en el demostrador son elementos compuestos en base a fibras piezoeléctricas con forma de parche desarrollados por la empresa Smart Materials, modelo M241BP1. Han sido desarrollados de tal manera que entre sus cualidades se encuentran: una mayor *durabilidad*, *flexibilidad* y *eficiencia*.

Actuador MFC (Macro Fibre Composite):

Estos parches están basados en una matriz de fibras del material piezoeléctrico unidas mediante epoxy. Las capas de epoxy estructural previenen la propagación de las fracturas en los cerámicos y funciona también como unión para los componentes del sensor. Las señales obtenidas de las fibras de piezoeléctricos luego son transmitidas a través de los electrodos interdigitalizados tipo IDE. En la figura 2 se muestra una imagen del sensor y un esquema de la distribución de las diversas capas que componen el sensor. Los beneficios obtenidos al utilizar este tipo de sensores/actuadores se recogen en la tabla 3.

Si bien, los primeros piezocomposites fueron desarrollados por A. A. Bent en 1997 (Activo Fibre Composite, AFC) e impulsados posteriormente por el Centro Langley de la NASA (Macro Fibre Composite, MFC), hoy en día, existen varios sistemas similares disponibles comercialmente. Entre las empresas desarrolladoras de estos sensores/actuadores se encuentran: Smart Materials, Midé, Physiks Instrumente y Piezo Sistem. Las características generales de los sensores piezoeléctricos de SmartMaterials seleccionados para nuestra aplicación se muestran en la tabla 5.

Los sensores/actuadores MFC son muy adecuados para un gran número de aplicaciones entre las que son de destacar:

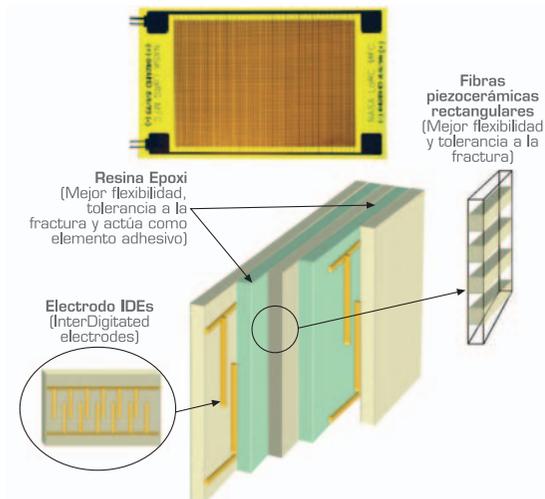


Figura 2. Imagen del sensor y esquema de un corte transversal de los elementos que componen el sensor.

Aumento de la dureza	El material cerámico presenta una menor fragilidad en forma de fibra respecto al material masivo. Superándose las limitaciones del PZT monolítico respecto a su capacidad de conformación y curvatura.
Mayor protección	La matriz polimérica protege las fibras de impactos o deformaciones que puedan fracturar la fibra.
Aumento de la versatilidad	El conjunto del sensor se puede adaptar a superficies curvas gracias a su gran flexibilidad.
Alta capacidad de integración en estructuras	Puede incorporarse con mayor facilidad a una estructura durante su fabricación por su flexibilidad, su espesor.
Comportamiento en el plano anisótropo	Para estructuras en composite es importante, debido a los fenómenos de acoplamiento que se dan en estos materiales.
Mejora del coeficiente d33	Produce el doble de deformación por unidad de voltaje aplicado que el d31 (figura 4) El alto acoplamiento electromecánico se debe al uso de electrodos en forma de peine, que orienta axialmente el campo eléctrico, produciéndose mejor relación fuerza/desplazamiento respecto al material monolítico.

Tabla 3. Ventajas de los sensores/actuadores de MCF (SmartMaterials).



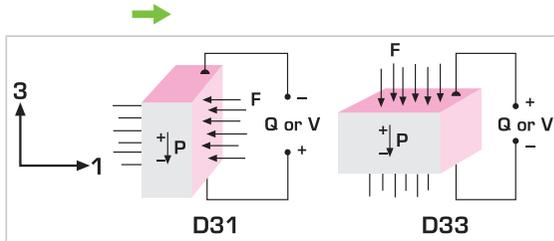


Figura 4. Coeficientes piezoeléctricos de deformación unitaria.

Dimensiones	37mm x 17mm (1.5" x 1.0")
Área activa (Aactuación)	28mm x 14mm (1.1" x 0.55")
IDE separación	0.5 mm (20 mil)
Capacitancia	approx. 1.2nF
Modelo PZT	Navy Type II
V_{max}	-500V to +1500V
Deformación de tracción máxima	4500 ppm
Espesor aproximado	0.3 mm (12 mil)

Tabla 5. Características de los parches MFC.

Reducción de vibraciones

- Control de estructuras para generar un cambio de forma
- Microposicionamiento
- Sensores de fuerza
- Monitorización de estructuras

Caracterización de la estructura:

La colocación de los sensores/actuadores MFC en la estructura requiere del conocimiento teórico de los diferentes modos de vibración de la estructura para realizar un adecuado control de las vibraciones de la misma. Por ello se realizó una simulación de los diferentes modos de vibración de la viga en voladizo, simulando la estructura mediante el método de elementos finitos que han sido completados con ensayos reales sobre la estructura vibrante. Dicha simulación nos permitió conocer los cuatro primeros modos de vibración, ver tabla 6.

Una vez obtenidos estos resultados se llevaron a cabo ensayos sobre la estructura real de forma que se pudiesen confirmar los modos de vibración obtenidos de la simulación por el método de los elementos finitos. El ensayo consiste en un barrido de frecuencias para lo que se emplean dos parches de MFC, el primero de ellos se emplea como actuador sobre la viga y, el segundo, como sensor de las vibraciones que experimenta la viga en

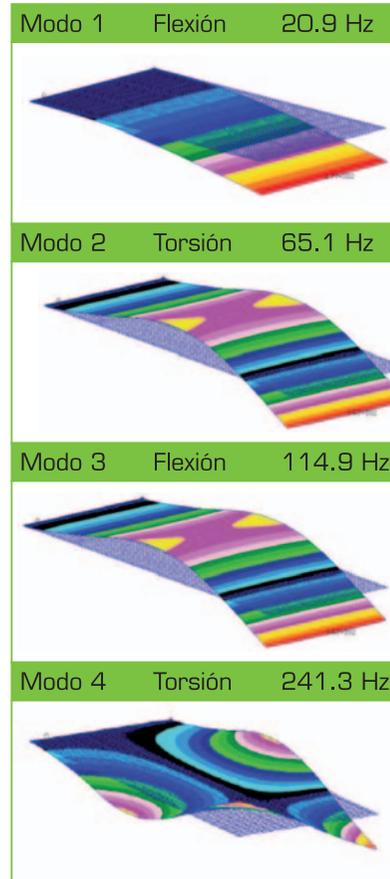


Tabla 6. Modos de vibración teóricos.

voladizo. La vibración del conjunto del sistema (viga+parches MFC) se confirma mediante un sensor láser de posición NCOT 1401 que nos permite comprobar la validez de los datos de vibración obtenidos.

La respuesta del modo de vibración de la viga en voladizo al ser excitada mediante un parche MFC en el rango de frecuencias entre 0 y 120 Hz, ver figura 7, muestra los tres primeros modos de vibración que corresponden a los dos primeros modos de flexión a 19 Hz y 104 Hz y el primer modo de torsión a 60 Hz. Estos datos son coherentes con los datos obtenidos con el láser, confirmando de esta forma la validez de los resultados obtenidos con los parches de MFC. Además

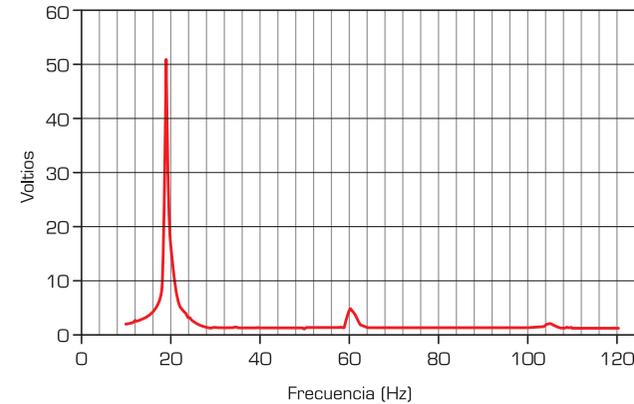


Figura 7. Respuesta en frecuencia de la viga en voladizo monitorizada mediante el sensor MFC.

de este tipo de ensayos, se han realizado ensayos de respuesta a impacto y respuesta "step" que nos permite conocer el comportamiento de la estructura y la respuesta de los sensores MFC.

Control de los sensores/actuadores MFC:

Una vez, conocida la respuesta del sistema (viga+parches MFC) ante los diferentes modos de perturbación, que experimenta la estructura, mediante la caracterización que hemos comentado en párrafos anteriores; se ha realizado la fase de control de las vibraciones de la estructura.

El sistema de control empleado para reducir las vibraciones que sufre el sistema ha sido un sistema de control proporcional integrativo, PI. Mientras la viga y su soporte son sometidos a una vibración continua, mediante el uso de una mesa vibradora, se utiliza un parche MFC, en su modo de sensor, para analizar las vibraciones a las que está siendo sometido el sistema. Así mismo, el otro parche MFC se emplea como actuador para amortiguar las vibraciones de la viga. Los resultados obtenidos mediante el sensor óptico y el sensor MFC nos permiten comprobar que las vibraciones son realmente amortiguadas mediante la actuación del parche piezocerámico MFC.

Al producirse la excitación de la viga mediante una frecuencia concreta, la respuesta detectada por el sensor se corresponde con una onda sinusoidal (figura 8, línea —). Cuando se activa el control de la vibración mediante el actuador MFC, se produce el amortiguamiento de la excitación, esto provoca un decaimiento de la señal del actuador. Es decir,

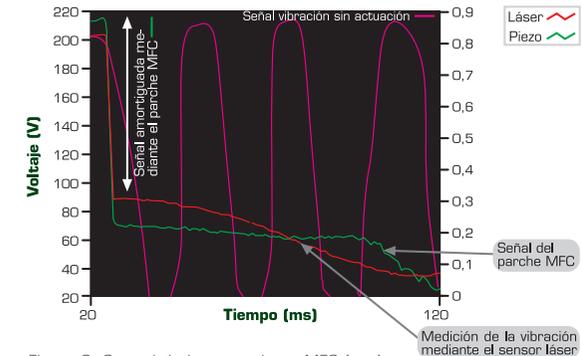


Figura 8- Control de los actuadores MFC (—) sobre la vibración inducida (—) y comprobación del sensor externo (—).

en la gráfica se observa un decaimiento del potencial del material piezoeléctrico, debido a la deformación continuada que ejerce sobre la viga. Este decaimiento se confirma mediante la lectura del sensor óptico (señal — en la figura 8). El control ejercido por los actuadores MFC ha permitido un 70 % de amortiguación de la vibración de la viga. En la figura 8, podemos ver también una ligera variación de la amortiguación que es debida a limitaciones de hardware empleado.

Estos estudios nos han permitido conocer la capacidad de actuación y monitorización de los sensores piezocerámicos en estructuras 1D para la amortiguación de vibraciones. Actualmente, INASMET-Tecnalia está ampliando esta investigación para el control y actuación sobre estructuras en 2D. ■

consiguen unos 10mT a pesar de definir el capuchón como acero Carpenter.

En el tercer diseño se aumenta la intensidad a 2A y el número de vueltas a 3.000. Se usa un entrehierro de 10mm y se bobina todo el perímetro de la "U". Se lleva el capuchón hasta 1mm del eje de simetría y se consigue un campo de 675mT. En una cuarta simulación, se acerca el capuchón a 0,5mm del eje de simetría y el campo sube por encima de los 720mT.

En estas simulaciones habría que tener en cuenta factores como la intensidad que puede soportar el hilo y el espacio que este ocupa, o la caída de tensión que produce el aumento de la temperatura. Para ver las variaciones que estos factores producen sobre la simulación, se realizan mediciones de campo sobre bobinas reales. Para una bobina de 3.700 vueltas, 0,2mm de diámetro del hilo, 170mm de longitud y una altura de 50mm fabricada por Robotiker y Gaiker, se empleó una fuente de alimentación de 30V a un amperaje máximo de 0,3A obteniendo un campo de tan sólo 53mT.

Un gran problema que se presenta es el consumo de estas bobinas. Su alta resistencia limita la corriente que se les puede aplicar y por otro lado, el campo magnético es proporcional a la corriente ($B \approx \mu \cdot N \cdot I$). Se busca que la bobina no sea excesivamente grande para poder ser integrada con facilidad en el robot y que la resistencia no sea elevada para no tener que utilizar fuentes de alimentación de gran voltaje. Se analiza, por ello, de qué parámetros depende dicha resistencia: $R = \rho \cdot l / s$, siendo ρ , l y s la resistividad, la longitud y la sección del hilo respectivamente.

Para completar la primera capa de bobinado se necesita una longitud de hilo $L_1 = 2\pi (r_e + r_h) h_e / d_h$, siendo r_e y r_h el radio del entrehierro y del hilo, h_e la altura del bobinado y d_h el diámetro del hilo. Del mismo modo, para la capa de bobinado n -ésima: $L_n = 2\pi (r_e + (2n - r_h)) h_e / d_h$. Teniendo en cuenta todas las capas, se necesita una longitud de hilo:

$$L_T = \sum_{n=1}^{N \cdot \frac{d_h}{h_e}} 2\pi (r_e + (2n - r_h)) \frac{h_e}{d_h} = 2\pi \cdot (Nr_e + \frac{2}{h_e} N^2 r_h^2)$$

con lo que la resistencia del hilo será:

$$R = 4\rho \cdot [2 \frac{Nr_e}{d_h^2} + \frac{N^2}{h_e}]$$

Gracias a la obtención de esta ecuación pueden fijarse valores de resistencias y jugar con las dimensiones de la bobina.

Para una fuente de 30V-3A se construye una bobina con 17 $\frac{1}{2}$ de resistencia con un hilo de 0,5mm de diámetro, $h_e=60$ mm, $r_e=5$ mm y $N=3.000$ vueltas. Tras una serie de pruebas se llega a la conclusión de que la ecuación no tiene en cuenta la saturación del entrehierro.

VOLTAJE (V)	AMPERAJE (A)	CAMPO MAGNETICO (mT)
1,6	0,1	22
3,4	0,2	43
5,1	0,3	68
8,4	0,5	108
11,8	0,7	142
17,1	1,0	167

Tabla 1: pruebas en bobina de 17

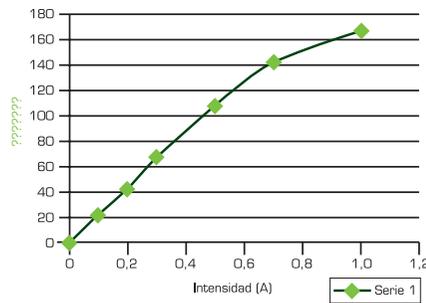
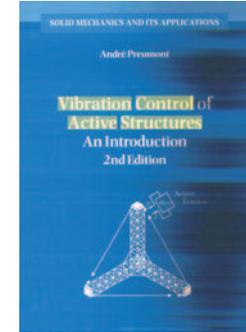


Fig. 5: Campo magnético frente a intensidad

Pese a un comportamiento casi lineal hasta 0,7A se da paso a una saturación del entrehierro. Para evitarla se podría probar aumentando la sección del mismo o cambiando a un material con una permeabilidad magnética (μ) mayor. Pruebas estas que serán objeto de estudio en futuros trabajos. ■

PUBLICACIONES ■■■

- **“Vibration Control of Active Structures: An Introduction”, Author André Preumont.** This text is an introduction to the dynamics of active structures and to the feedback control of lightly damped flexible structures; the emphasis is placed on basic issues and simple control strategies that work. A solutions manual is available from the author. Para más información: www.amazon.com

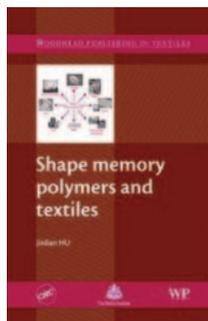


CONGRESOS ■■■

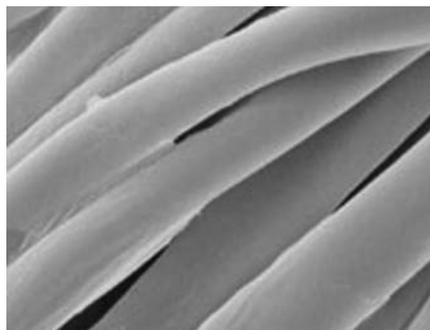
- **13 - 17 de Enero de 2008: “MEMs 2007: 21th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems”,** Tucson, Arizona. Para más información: <http://www.mems2008.org/>
- **18 - 21 Febrero de 2008: “ICAM 2008: International conference on Advance Materials”,** India. Para más información: <http://www.materialschem.org/>
- **9 - 13 Marzo de 2008: “Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring 2008”,** San Diego, California, USA. Para más información: <http://spie.org/smart-structures-nde.xml>
- **19 Marzo de 2008: “Nanotechnology and Smart Textiles for Industry and Fashion”,** London, UK. Para más información: <http://www.nano.org.uk/events/ionevents.htm#textiles3>
- **1 - 4 Abril de 2008: International Baltic Sea Region conference “Functional materials and nanotechnologies” (FM&NT-2008),** Riga. Para más información: <http://www.fmnt.lv/home/>
- **9 - 10 de Abril de 2008: “Smart Systems Integration 2008”,** Barcelona, Spain. Para más información: <http://www.mesago.de/en/SSI/main.htm>
- **22 - 25 Abril de 2008: “SmartMat 2008 (Smart/Intelligent Materials and Nano Technology) & IWOFM-2 (2nd International Workshop on functional Materials and nanomaterials)”,** Tailandia. Para más información: <http://www.science.cmu.ac.th/smartmat08/home.php>
- **2-3 Junio de 2008: “Smart Textiles: Technology and Desing”,** Sweden. Para más información: <http://www.smarttextiles.se/Ambience08/>
- **8 - 13 Junio de 2008: “3rd International Conference: Smart Materials and Structures Systems (CIMTEC 2008)”,** Sicilia, Italia. Para más información: <http://www.cimtec-congress.org/2008/index.asp>
- **16 - 19 Junio de 2008: “2nd International conference on functional materials and devices (ICFMD-2008)”,** Malasya. Para más información: <http://icfmd.uitm.edu.my/icfmd2008/intro2.asp>
- **28 - 31 Julio de 2008: “International Conference on multifunctional materials or structures and their applications”,** Hong Kong. Para más información: <http://www.a-tech.hk/MFMS2008/Index.htm>

■■■ POLÍMEROS CON MEMORIA DE FORMA EN GAIKER

Las actividades de investigación en la tecnología de los polímeros con memoria de forma dirigidos al sector textil comienzan a dar sus frutos en forma de nuevos desarrollos y oportunidades, como demuestran los trabajos presentados por el Centro de Textiles con Memoria de Forma del Instituto de Textiles y Prendas de la Universidad Politécnica de Hong Kong. Este centro, fundado en el año 2003, y considerado uno de los centros pioneros en esta tecnología, está dirigido por el profesor Jinlian Hu, científico reconocido y con más de 300 artículos publicados, 14 patentes y varios libros sobre materiales textiles y, más recientemente, sobre polímeros con memoria de forma. Sirva como ejemplo de los trabajos de este centro la publicación del libro titulado "Shape memory polymers and textiles", publicado por Woodhead Publishing Limited en asociación con The Textile Institute en el año 2007.



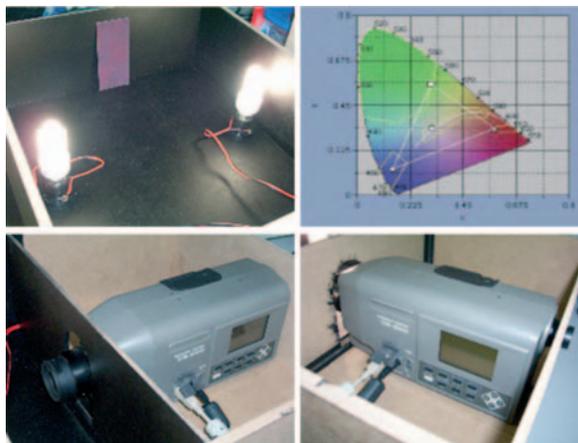
A su vez, cabe destacar los últimos artículos en revistas como *Nature China* o *Smart Materials and Structures* a lo largo de este mismo año 2007 sobre la fabricación de fibras con memoria de forma y el tratamiento de fibras y tejidos de algodón con poliuretanos con memoria de forma. ■



Fibras de algodón recubiertas de poliuretano con memoria de forma (Fuentes: Liem, H., Yeung, L. Y. and Hu, J. L., "A prerequisite for the effective transfer of the shape-memory effect to cotton fibers". *Smart Mater. Struct.* 16, 748-753 (2007); Mondal S., Hu J.L., "Water vapor permeability of cotton fabrics coated with shape memory polyurethane". *Carbohydr. Polym.* 67, 282-287 (2007).

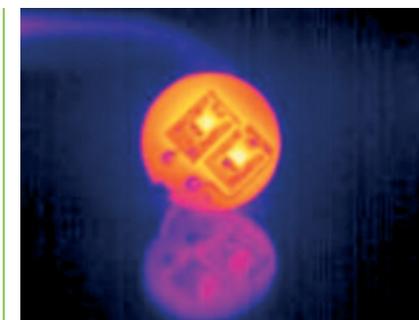
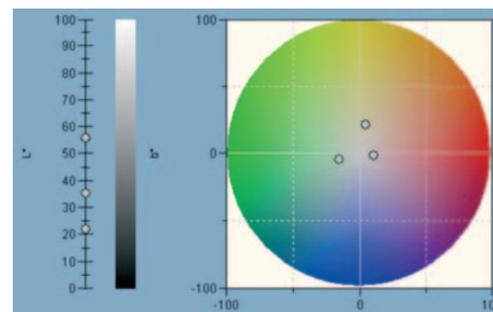
■■■ NUEVOS EQUIPOS COMERCIALES PARA MEDIDAS DE COLOR EN MATERIALES ACTIVOS.

Para las medidas de color, siempre se han empleado colorímetros de medidas estáticas o puntuales, que permiten hacer medidas de escala de color con respecto a una referencia. Sin embargo cuando el color se ve alterado cambiando de modo importante su color por la temperatura, ángulo de reflexión, u otros parámetros, se podría medir el color en cada uno de los estados extremos de color, pero resulta casi imposible seguir su evolución en uno y otro sentido, es decir comprobar las tonalidades cuando se enfría o calienta el material. En el caso de un material fosforescente, estas medidas se com-



Espectrocolorímetro CS200, arriba situación e iluminación de la muestra, abajo el equipo desde diferentes ángulos.

Muestra	Tª (°C)	L*	a*	b*	X	Y	Z
1 Pintura1	21 °	22,19	9,89	-1,37	4,14	3,57	4,41
2 Pintura1	50 °	35,45	-15,82	-4,16	6,8	8,72	11,62
3 Pintura1	70 °	55,99	4,06	21,93	24,17	23,9	15,48



Mapa de color para un material termocrómico con 3 temperaturas/colores de cambio

> Mapa térmico de un dispositivo con LED

plican más aún al intentar conocer el tono de color y duración de la luz una vez se ha dejado de excitar.

El espectrocolorímetro CS-200 de Minolta permite, hacer medidas de color, transmisión, reflexión, contraste, evolución en el tiempo, componentes RGB, cuerpos luminosos (LED), fosforescentes, varios espacios de color, etc. GAIKER ha adquirido recientemente este equipo y gracias a él puede caracterizar los materiales fotocromáticos, termocrómicos, fosforescentes y electroluminiscentes de una forma rápida y sencilla. En el caso de los materiales electrocromáticos acompaña las medidas de color además con el registro de las variaciones térmicas del dispositivo, mediante una cámara termográfica. ■

■■■ TEJIDOS INTELIGENTES

En los últimos tiempos han aparecido multitud de tejidos conductores comerciales, que permiten una multitud de aplicaciones electrónicas novedosas en el sector textil. Estas aplicaciones van desde camisetas que incorporan equalizadores que entran en funcionamiento frente al ruido que rodea a la persona que lleva la camiseta, hasta ropa deportiva para esquiadores que integra leds como medida de seguridad.

Una de las últimas novedades surgidas es un desarrollo de Philips denominado "LUMALIVE", se trata de tejidos con luces de colores dinámicas, es decir, textiles que se pueden programar con diferentes imágenes y colores dependiendo de la información que se quiera suministrar o del estado de ánimo del usuario. <http://www.lumalive.com/business/> ■



>LED Clothing (OSRAM)



T-Dancert-shirt <