

Materiali meccatronici

Si definiscono meccatronici [1] quei materiali in grado di cambiare reversibilmente le proprie caratteristiche reologiche (forma, rigidità, viscosità) in risposta a uno stimolo fisico (termico, elettrico, magnetico). Lo stimolo può provenire dall'ambiente (funzionamento come sensore o sensore/attuatore) oppure essere generato da alimentazione elettrica controllata (funzionamento come attuatore). Il loro nome deriva da questa seconda possibilità. I materiali meccatronici si prestano alla costruzione di dispositivi allo stato solido leggeri, compatti, silenziosi, controllabili elettronicamente e muniti di bassa inerzia meccanica. Attuatori basati su materiali meccatronici raggiungono rapporti tra forza utile e massa comparabili con i sistemi oleodinamici, pur coprendo, rispetto a questi, livelli di forza molto inferiori (fino a qualche decina di Newton).

La ricerca sui materiali meccatronici rientra tra le attività del laboratorio di meccatronica Mectron (www.mectron.org), appartenente alla rete di laboratori Hi-Mech per l'alta tecnologia meccanica della Regione Emilia-Romagna.

Entro la vasta categoria dei materiali meccatronici (tabella 1), il laboratorio si occupa di tre famiglie particolari: liquidi magnetoreologici, leghe a memoria di forma e polimeri elettroattivi.

I liquidi magnetoreologici sono liquidi che solidificano se sottoposti a un campo magnetico. Il comportamento sotto l'azione del campo è rigido-plastico, con limite plastico proporzionale al campo applicato. Le leghe a memoria di forma sono leghe metalliche (esempio nichel e titanio) che cambiano la propria struttura cristallina se portate al di sopra di una temperatura critica. Oltre questa soglia termica, la loro rigidità elastica aumenta ed essi tendono a riprendere una forma originaria "memorizzata" cristallinamente. I polimeri e-

lettroattivi sono plastiche (acriliche) o elastomeri (siliconi) capaci di dilatarsi se sottoposti a un campo elettrico. Le dilatazioni possono raggiungere valori del 300% e oltre.

Mectron opera come centro di competenza per lo studio delle proprietà ingegneristiche dei materiali meccatronici e per lo sviluppo di dispositivi basati sull'impiego di materiali meccatronici. Obiettivi delle attività scientifiche di Mectron sono l'allestimento di apparecchiature per la caratterizzazione dei materiali, finalizzata alla progettazione di dispositivi, e la costruzione di dimostratori meccatronici funzionanti. Tra i dimostratori in corso di sviluppo rientrano i seguenti: smorzatori attivi per alte e basse frequenze (basati su liquidi magnetoreologici), attuatori angolari ad alta coppia e basso ingombro (basati su leghe a memoria di forma), attuatori binari per applicazioni robotiche (basati su polimeri elettroattivi).

Parallelamente alle attività di carattere scientifico, Mectron offre consulenza per l'industrializzazione di dispositivi meccatronici costruiti con questi nuovi materiali. Presso il laboratorio sono presenti competenze e apparecchiature per la progettazione integrata, per la prototipazione rapida e per il collaudo dei dispositivi dal punto di vista meccanico ed elettronico. Collaborazioni già avviate tra Mectron e aziende nazionali riguardano applicazioni dei materiali meccatronici nei settori dell'oleodinamica, dell'autoveicolo e dell'accessoristica industriale.

Liquidi magnetoreologici

I liquidi magnetoreologici sono sospensioni, quasi colloidali, di microparticelle ferromagnetiche disperse in un liquido portatore [2]. I materiali più usati per le particelle sono ferro e leghe di ferrocobalto, queste ultime dotate di migliori presta-

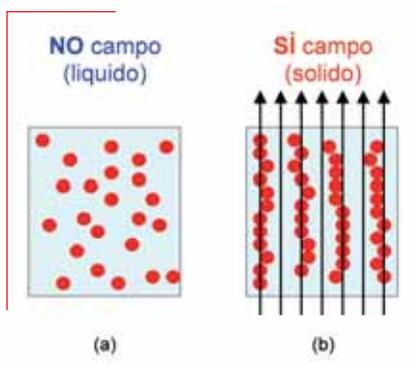
Liquidi che solidificano
se esposti al campo
magnetico, metalli
che si deformano
se percorsi da corrente
elettrica, elastomeri
che si contraggono come
muscoli per effetto
del campo elettrico.
È l'affascinante mondo
dei materiali meccatronici,
fonte di curiosità scientifica
e ispiratore
di nuovi prodotti

Materiale	Causa attivatrice
Liquidi magnetoreologici	Campo magnetico
Liquidi elettroreologici	Campo elettrico
Leghe a memoria di forma	Temperatura
Polimeri a memoria di forma	Temperatura
Polimeri elettroattivi	Campo elettrico
Materiali magnetostrittivi	Campo magnetico
Ceramiche piezoelettriche	Tensione elettrica

Tabella 1. Elenco dei principali materiali meccatronici di interesse applicativo.

I. Comportamento di un liquido magnetoreologico in assenza

(a) e in presenza di campo magnetico (b).



zioni (maggiore livello di saturazione magnetica) ma anche più costose. Come liquidi portatori si usano acqua, idrocarburi e oli di varia natura, scelti a seconda dell'applicazione e del comportamento richiesto in assenza di campo. In aggiunta ai componenti base, la miscela contiene anche additivi per migliorare le proprietà lubrificanti e per attenuare la sedimentazione e l'agglomerazione delle particelle. Grazie agli additivi, un liquido magnetoreologico si mantiene omogeneo anche dopo lunghi periodi di inoperosità. La tabella 2 riporta la composizione e le caratteristiche di liquidi magnetoreologici disponibili commercialmente.

La figura 1 illustra il principio di funzionamento di un liquido magnetoreologico. Nello stato naturale (non attivato), le particelle sferoidali (di dimensioni variabili tra 0,1 e 10 mm) sono distribuite casualmente nella matrice liquida (figura 1a). In questo stato, il materiale si comporta come un normale liquido viscoso, capace di reagire meccanicamente con tensioni tangenziali proporzionali alla velocità di scorrimento (curva nera di figura 2). In presenza di campo magnetico, le particelle ferrose si allineano con la direzione del campo (figura 1b), formando catene rigide che ostacolano il moto della miscela. In questo stato, il materiale si comporta come un solido viscoelastico anisotropo, con resistenza allo snervamento proporzionale al campo applicato e viscosità uguale a quella posseduta in assenza di campo (curve rossa, marrone e blu di figura 2). I tempi caratteristici di attivazione e disattivazione del liquido sono di pochi millisecondi.

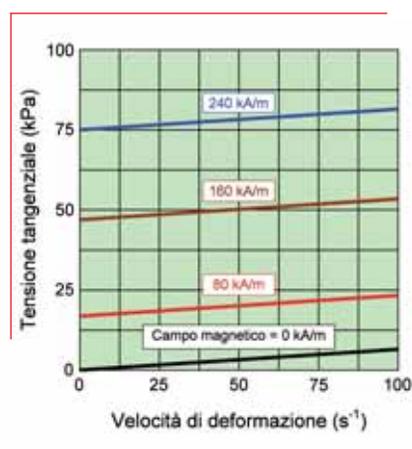
La figura 3 mostra i tre modi fondamentali di impiego di un liquido magnetoreologico: modo flusso (figura 3a), modo taglio (figura 3b) e modo schiacciamento (figura 3c). Nel modo flusso, il liquido scorre da un gradiente di pressione, all'interno di un condotto delimitato da pareti stazionarie. Nel modo taglio, il liquido viene trascinato da una superficie traslante parallelamente a una superficie stazionaria. Nel modo schiacciamento,

il liquido viene pompato radialmente nel mezzo compreso tra due superfici in accostamento parallelo. In tutti i casi, le linee di campo magnetico sono perpendicolari alle superfici di confine e ostacolano il moto del liquido parallelamente ad esse. Nelle applicazioni, il ricorso all'uno o all'altro dei tre modi fondamentali dipende dalla situazione. Il modo flusso è sfruttato nella costruzione di smorzatori e di deceleratori in cui la parte mobile viene usata per forzare il liquido lungo un canale immerso nel campo magnetico regolabile. La figura 4 mostra la sezione di uno smorzatore lineare funzionante secondo il modo flusso. Il modo taglio è utilizzato nella costruzione di freni e di frizioni per il controllo del moto angolare. La rotazione degli elementi di attrito (dischi) è usata per generare il moto di taglio nel liquido magnetoreologico che li bagna, attraversato dal campo magnetico ortogo-

nalmente alle superfici di lavoro. La figura 5 mostra la sezione di un freno rotativo nel quale il liquido magnetoreologico (in giallo) funziona secondo il modo taglio. Il modo compressione è particolarmente adatto per il controllo di piccoli spostamenti (qualche millimetro) sotto l'azione di forze rilevanti (centinaia di Newton). Dei tre modi fondamentali di funzionamento, il modo compressione è quello finora meno studiato.

I settori dove i liquidi magnetoreologici vantano applicazioni commerciali comprendono l'industria meccanica (smorzatori, deceleratori), l'industria automobilistica e aerospaziale (sospensioni, freni, frizioni), l'industria biomedica (smorzatori per protesi) e l'industria delle costruzioni (supporti antisismici).

La diffusione pratica dei liquidi magnetoreologici è limitata principalmente da tre attributi negativi: il peso elevato (densità circa tripla rispetto all'acqua), la tendenza all'addensamento dopo uso prolungato (usura e frantumazione delle particelle) e il costo considerevole (pochi i produttori di qua-

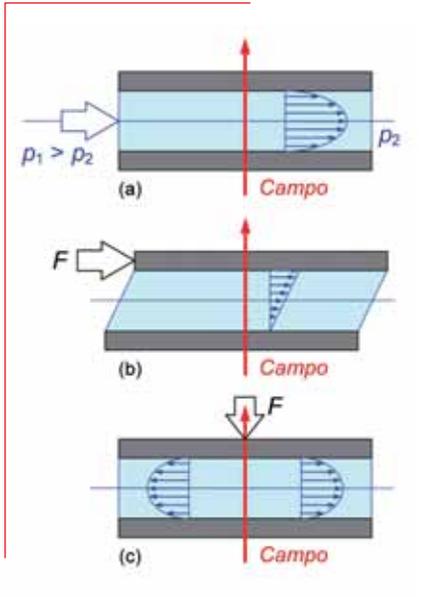


2. Legame tra tensione meccanica e velocità di deformazione in un liquido magnetoreologico in funzione del campo magnetico applicato.

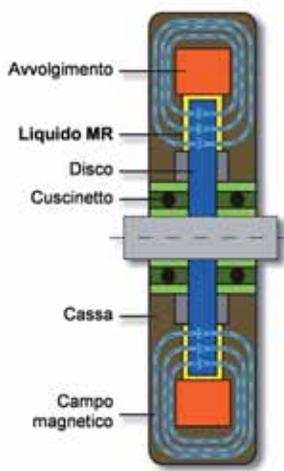
Liquido magnetoreologico	Natura particolato	Contenuto volumetrico particolato (%)	Liquido portatore	Densità apparente (kg/dm ³)
MRX-126PD	Fe	26	Idrocarburo	2,66
MRX-140NDLD	Fe	40	Idrocarburo	3,64
MRX-242AS	Fe	42	Acqua	3,88
MRX-336AG	Fe	36	Olio silconico	3,47

Tabella 2. Composizione e caratteristiche di liquidi magnetoreologici commerciali (Lord Corporation).

3. Modi fondamentali di impiego di un liquido magnetoreologico:
(a) modo flusso, (b) modo taglio, (c) modo schiacciamento.

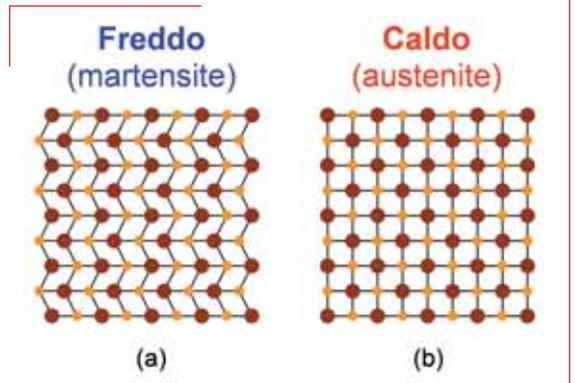


5. Sezione di freno angolare magnetoreologico.



li di diametro compreso tra pochi centesimi di millimetro e qualche millimetro. La forma caratteristica, stabile ad alta temperatura, viene conferita al pezzo attraverso un opportuno trattamento termomeccanico. Dopo vincolamento su specifico supporto, riprodotto la geometria desiderata (esempio filo avvolto ad elica su un mandrino), il semilavorato viene dapprima riscaldato a temperature di circa 500 °C per tempi compresi tra 5 e 30 minuti ed infine raffreddato rapidamente in aria o in acqua. Per l'impiego delle leghe a memoria di forma nella costruzione di attuatori è necessario prevedere, a

6. Strutture cristalline stabili a freddo
(a) ed a caldo (b) di leghe a memoria di forma.



lità). Il primo e il terzo difetto sono mitigabili con una sapiente progettazione che richieda, a parità di funzione da svolgere, piccole quantità di liquido.

Leghe a memoria di forma

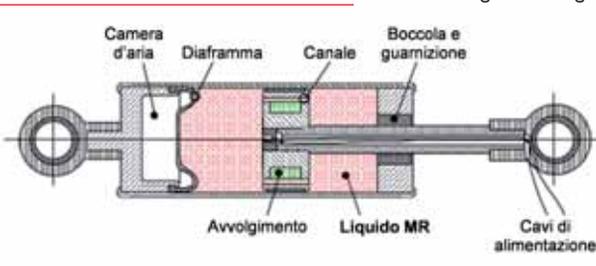
Le leghe a memoria di forma sono leghe metalliche binarie (esempio nichel e titanio) o ternarie (esempio rame, alluminio e nichel) dotate di due strutture cristalline caratteristiche, stabili a temperature differenti [3]. La figura 6 illustra il concetto, con la struttura di figura 6a (martensite) stabile a bassa temperatura e la struttura di figura 6b (austenite) stabile ad alta temperatura. Gli intervalli termici di stabilità delle due strutture sono separati da un preciso valore di temperatura, dipendente dalla composizione della lega, chiamato temperatura di trasformazione. Il materiale ha un comportamento plastico e si lascia deformare duttilmente alle basse

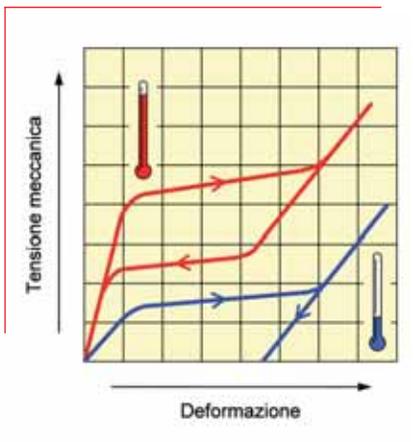
temperature (curva blu di figura 7), salvo poi riacquistare un comportamento (pseudo) elastico se riscaldato sopra la temperatura di trasformazione (curva rossa di figura 7). Oltre la temperatura di trasformazione, la lega è contraddistinta da una forma caratteristica alla quale essa desidera ritornare (effetto memoria) anche se contrastata da forze esterne. Di qui nasce la possibilità di sfruttare questi materiali come attuatori. La deformazione che il metallo può recuperare termicamente senza subire danni permanenti varia tra il 5% e l'8%, a seconda del tipo di lega. La tabella 3 riporta la composizione e le proprietà termiche delle principali leghe a memoria di forma. Le leghe di gran lunga più diffuse sono quelle binarie a base di Nichel e Titanio.

La produzione delle leghe a memoria di forma comincia con uno stadio di fonderia in cui, da un bagno contenente l'esatta proporzione degli elementi costitutivi, si perviene a piccoli lingotti. I lingotti sono poi trasformati per deformazione plastica (laminazione, estrusione, trafilatura e stampaggio) fino a ottenere i semilavorati voluti. Si possono realizzare le forme più disparate come lamiere, anelli, tubi, nastri ma la geometria più comune è rappresentata da fi-

contrasto del componente attivo munito di memoria di forma, anche un elemento antagonista. La funzione dell'elemento antagonista è quella di allontanare il componente attivo dalla forma caratteristica quando questo viene raffreddato. In assenza di forze di contrasto, infatti, il semplice abbassamento della temperatura lascerebbe il materiale nella forma memorizzata, propria della temperatura elevata. La forza di contrasto può essere fornita in tre modi (figura 8): con carico costante (figura 8a), con molla elastica convenzionale (figura 8b) e con molla a memoria di forma (figura 8c). Nel caso di contrasto con carico costante, la forza può essere fornita da un peso (come in figura 8a) o da un attuttore pneumatico alimentato a pressione costante. Nel caso di figura 8c, la molla primaria e la molla antagonista, entrambe a memoria di forma, vengono attivate alternativamente per massimizzare la corsa "c" dell'attuatore. In generale, a parità di componente attivo a memoria di forma e di forza esterna da vincere, le corse più grandi si ottengono trami-

4. Sezione di smorzatore lineare magnetoreologico.





7. Curve di trazione a freddo (blu) ed a caldo (rosso) di leghe a memoria di forma.

Elementi di lega	Temperatura di trasformazione (°C)	
	da	a
Cu, Al, Ni	-140	+100
Cu, Zn, Si	-180	+200
Cu, Sn	-120	+30
In, Ti	+60	+100
Mn, Cu	-250	+180
Ni, Al	-180	+100
Ni, Ti	-50	+110

Tabella 3. Composizione e proprietà termiche delle principali leghe a memoria di forma.

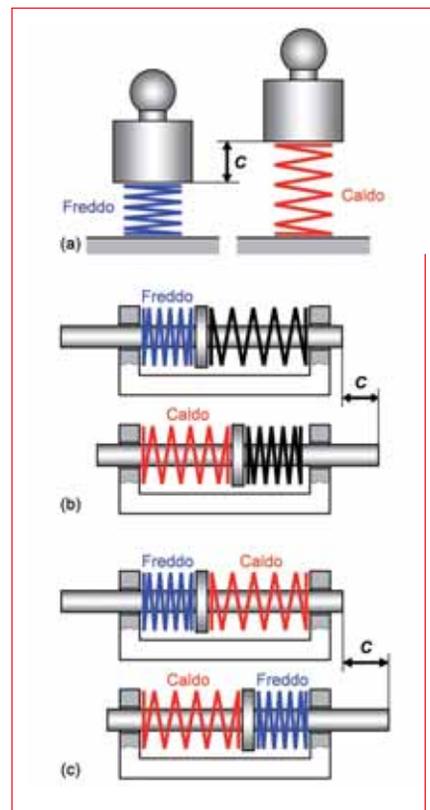
te contrasto con elemento a memoria di forma [4]. Seguono, in ordine di efficacia decrescente, il caso di contrasto con forza costante e quello con molla convenzionale. Nei dispositivi meccatronici, il riscaldamento di componenti a memoria di forma è effettuato per dissipazione di corrente elettrica (effetto Joule). Questo tipo di alimentazione è ben controllabile elettronicamente e facilmente integrabile nel sistema complessivo. Il raffreddamento avviene per convezione naturale, eventualmente integrata da scambio conduttivo effettuato con moduli termoelettrici (celle di Peltier).

Vale la pena citare anche la possibilità di alimentare termicamente, sia in riscaldamento che in raffreddamento, i componenti a memoria di forma attraverso l'ambiente in cui sono immersi. Si parla in questo caso di funzionamento come sensore intrinseco perché l'elemento attivo assume la temperatura dell'ambiente che lo avvolge, traendo da questo anche l'energia di attuazione. Un esempio è rap-

presentato dai sensori-attuatori a memoria di forma usati per regolare la temperatura di uscita nei miscelatori di acqua calda e fredda.

In ambito industriale, i materiali a memoria di forma hanno raggiunto un grado di diffusione abbastanza elevato. Il settore più maturo è rappresentato dall'industria biomedica dove i metalli a memoria di forma sono apprezzati anche per le proprietà pseudoelastiche. Cateteri arteriosi, protesi ortopediche, apparecchi ortodontici, fabbricati con leghe di questo tipo, sono ormai componenti di uso corrente. In campo automobilistico, le leghe a memoria di forma si vanno affermando per la costruzione di attuatori secondari. Sono esempi i sistemi per l'orientamento dei retrovisori interno ed esterno, per lo sblocco dei sedili e per l'apertura del portellone posteriore. La figura 9 mostra un attuatore

8. Tre sistemi di contrasto per azionamenti a memoria di forma:
(a) carico costante, (b) molla convenzionale, (c) molla a memoria di forma.



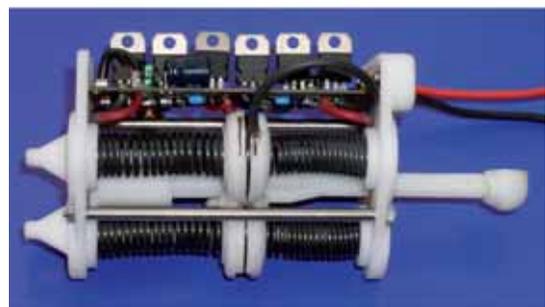
re prototipale sviluppato da Mectron per il movimento dell'albero di tumble di un condotto di aspirazione di un motore a combustione interna [5]. Lo stelo si muove sotto la spinta di due gruppi antagonisti di molle a memoria di forma, agenti secondo il principio di figura 8c. L'attuatore è corredato di scheda elettronica di alimentazione e controllo, integrabile con il sistema di bordo. I limiti principali della tecnologia a memoria di forma per la costruzione di attuatori sono il basso rendimento energetico (alimentazione dissipativa), la lentezza di funzionamento (banda passante fino a pochi Hertz) e la non-linearità di risposta (difficoltà di controllo in posizione).

Polimeri elettroattivi

I polimeri elettroattivi sono polimeri capaci di dilatarsi, nel modo illustrato in figura 10, se sottoposti a un campo elettrico. Possono essere usati come attuatori o come sensori [6]. Nel

funzionamento come attuatori, esibiscono deformazioni significative (fino al 300%) accompagnate da forze medio-basse. Grazie alla similitudine con i tessuti biologici per i valori di sollecitazione e di deformazione esprimibili, i polimeri elettroattivi sono anche chiamati muscoli artificiali. Il principale campo di impiego è la robotica, che spesso richiede grandi spostamenti lineari. I polimeri elettroattivi si dividono in due classi: dielettrici e ionici. Nei polimeri dielettrici, la deformazione di figura 10 è prodotta dalle forze di compressione esercitata dalle cariche elettriche indotte dal campo sulle facce inferiore e superiore del solido. Questi polimeri so-

9. Attuatore lineare a memoria di forma per applicazioni automobilistiche.



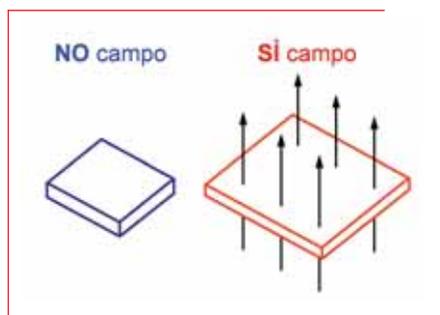
no caratterizzati da elevate tensioni di attivazione (alcuni kilovolt) ma da potenze di alimentazione molto basse e possono mantenere una deformazione costante senza consumo energetico. Tipici polimeri dielettrici con proprietà elettroattive sono alcune plastiche acriliche e gli elastomeri siliconici. Il nastro biadesivo 3M della serie VHB è un prodotto acrilico commerciale con ottime proprietà elettroattive. Gli elastomeri siliconici sono normalmente prodotti in laboratorio e trasformati in fogli di piccolo spessore con tecniche di spalatura o di centrifugazione.

Nei polimeri ionici, l'attuazione è causata dallo spostamento di cariche all'interno del materiale. Le tensioni richieste per produrre deformazioni significative sono basse (pochi volt) ma, contrariamente ai po-

limeri dielettrici, occorrono potenze di alimentazione non trascurabili anche in caso di deformazione costante.

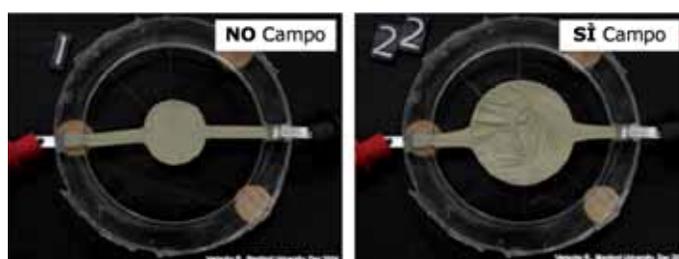
Polimeri ionici con proprietà elettroattive sono tutte le plastiche conduttrici.

Il laboratorio Mectron studia la categoria dei polimeri elettroattivi dielettrici, per i quali si intravedono le maggiori potenzialità nel campo degli attuatori ad alto spostamento e buona capacità di carico. Per funzionare come attuatori, anche i polimeri dielettrici necessitano di un elemento antagonista che eserciti una forza di contrasto. L'elemento antagonista ha lo scopo di recuperare la dilatazione del polimero attivato, mantenendolo teso su tutta la superficie di lavoro. Come per gli attuatori a memoria di forma, l'antagonista può essere un carico costante, un sistema elastico [7] oppure un secondo componente dielettrico elettroattivo. La figura 11 presenta il principio del contrasto di forze per una membrana circolare, realizzata interamente in polimero elettroattivo. La membrana, tesa sulla cornice periferica, è divisa in due zone. La zona centrale (cerchio color nocciola) è rivestita sulle due facce da un grasso conduttore che ha il compito di generare il campo elettrico di attivazione. La zona esterna, (corona circolare trasparente) serve da elemento antagonista. Rispetto alla configurazione naturale (figura 11a), nel dispositivo attivato la zona centrale si allarga (figura 11b), richiamata verso la cornice dalla zona an-



10. Principio di funzionamento di un polimero elettroattivo:

(a) stato naturale, (b) deformazione indotta dal campo elettrico.



11. Membrana in polimero elettroattivo con area centrale

attivata da campo elettrico: (a) campo assente, (b) campo presente.

tagonista circostante. Lo stesso principio è sfruttato nell'attuatore lineare di figura 12, costruito presso il laboratorio Mectron. L'attuatore è formato da due parti tronco-coniche, aventi le basi fissate al telaio e i vertici convergenti centralmente. Entrambi i tronchi di cono sono realizzati con polimero elettroattivo, ma solo la parte superiore, rivestita di grasso conduttore sulle due facce, viene alimentata. La parte inferiore, trasparente, agisce da antagonista. All'intersezione dei due coni è collocato un peso che rappresenta il carico utile, mobile verticalmente.

Le applicazioni industriali dei polimeri elettroatti-



12. Attuatore lineare a doppio tronco di cono realizzato con pellicola polimerica elettroattiva.

vi sono ancora agli albori. La robotica e l'industria spaziale offrono le prospettive migliori, con riferimento soprattutto ai sistemi di attuazione. In campo meccanico, un'applicazione interessante riguarda lo smorzamento attivo delle vibrazioni. Applicata alle facce di un pannello vibrante, una pellicola elettroattiva può essere usata per controllarne l'ampiezza di oscillazione grazie allo smorzamento intrinseco del polimero (viscoelasticità) e alla capacità di esercitare adattativamente forze sul sistema (attuazione distribuita). A questi fini, torna utile l'ottimo comportamento in frequenza di questi materiali, contraddistinti da tempi di risposta dell'ordine del millisecondo.

I limiti principali di questa tecnologia sono la necessità di elevate tensioni (circa 150 kilovolt per ogni millimetro di spessore), la limitata capacità di carico assoluta (decine di Newton) e la sensibilità agli estremi di temperatura (fragilità e irrigidimento in ambienti freddi, creep e fatica statica in ambienti caldi).

Prof. E. Dragoni, Dipartimento di Scienze e Metodi dell'Ingegneria, Università di Modena e Reggio Emilia (eugenio.dragoni@unimore.it).

readerservice.it n. 65

Bibliografia

- [1] M. Schwartz, "Encyclopedia of smart materials", Wiley-Interscience, 2001.
- [2] J.D. Carlson, M.R. Jolly, "Magneto-rheological fluid, foam and elastomer devices", *Mechatronics*, Vol. 10, 2000, pp. 555-569.
- [3] D.C. Lagoudas, "Shape memory alloys: modeling and engineering applications", Springer, 2008.
- [4] I. Spinella, E. Dragoni, "Design equations for binary shape memory actuators under dissipative forces", *Proc. Instn Mech. Engrs, Part C, J. Mech. Engng Science*, (in stampa).
- [5] M. Colli, E. Dragoni, N. Bellato, "System Design of a Shape Memory Alloy Actuator for Automotive Tumble Flaps", *SAE 2006 Powertrain & Fluid Systems Conference, Toronto, 16-19 October 2006*.
- [6] K.J. Kim, S. Tadokoro, "Electroactive Polymers for Robotic Applications: Artificial Muscles and Sensors", Springer, 2007.
- [7] G. Berselli, R. Vertechy, G. Vassura, V. Parenti Castelli, "A compound-structure frame for improving the performance of a dielectric elastomer actuator", *ARK 2008, Advances in Robot Kinematics, Bats-sur-Mer, 22-26 June 2008*.