

35° Convegno AIM

Progettazione e realizzazione di un attuatore ibrido SMA-SMP

G. Costanza, F. Quadrini, L. Santo, M.E. Tata

Università di Roma "Tor Vergata" – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Via del Politecnico, 1 - 00133 Roma

1. Abstract

Nel presente lavoro si è voluto effettuare uno studio relativo a leghe e polimeri a memoria di forma (SMA, SMP), con lo scopo di realizzare un attuatore ibrido lineare e valutarne la possibilità di una concreta applicazione. Il primo passo è stata la definizione dei componenti: un set di molle SMA, ognuna caratterizzata da diversi parametri geometrici, ed una schiuma SMP. Dopo la fase di produzione si è passati alla caratterizzazione termo-meccanica dei due elementi, svolgendo per entrambi delle prove di compressione. Confrontando le curve ottenute è stato così possibile valutare la possibilità di realizzare un attuatore ibrido lineare che sfruttasse le proprietà di entrambi i materiali studiati. Sulla base dell'analisi del comportamento meccanico dei materiali coinvolti si è passati alla realizzazione di un prototipo di attuatore. Le prove eseguite sul prototipo hanno confermato i valori delle corse ottenuti analiticamente. Di contro, però, si osserva che la corsa è limitata a poco più di 1 mm.

In questo studio è stata quindi confermata la possibilità di poter realizzare un attuatore a due vie caratterizzato da una lenta e graduale cinetica d'attuazione e recupero che sfrutta elementi caratterizzati da memoria di forma ad una sola via. Si pensa in futuro di incrementare la corsa operando adeguatamente sulle metodologie di produzione dei SMP, realizzando provini SMP in grado di esplicare forze superiori e fili SMA di diametro maggiore con la conseguente possibilità di poter aumentare numero e diametro delle spire.

2. Introduzione

Nell'era dei materiali funzionali le leghe a memoria di forma (Shape Memory Alloys) possiedono le prerogative sia di sensore che di attuatore, consentono cioè di attuare uno spostamento e/o di compiere lavoro, rendendo intelligente un dispositivo o una struttura [1]. La loro particolare peculiarità risiede nella trasformazione martensitica termoelastica non diffusiva in cui gli atomi si muovono mediante un movimento cooperativo. La caratteristica principale di queste leghe risiede nel recupero completo della forma originaria, impressa in fase di produzione a seguito di un adeguato trattamento termico. Portando la lega ad una temperatura superiore a quella di attivazione, quindi passando da fase martensitica a fase austenitica, si ripristina la configurazione originaria. Tale comportamento è definito memoria di forma ad una via (OWSME) [2]. Le più importanti leghe SMA sono quelle costituite da Ni-Ti che, grazie all'elevata resistenza alla corrosione e all'elevato recupero di deformazioni imposte (fino all'8%), trovano ormai larga diffusione in molti settori [3]. Mediante training termo-meccanico è possibile anche conferire a tali leghe un comportamento di memoria di forma a due vie (TWSME) [4], ovvero si ha recupero della forma anche quando si passa da fase austenitica a fase martensitica, e si fissano quindi due configurazioni, una ad alta e una a bassa temperatura. Purtroppo tale effetto è riproducibile solo per un limitato numero di cicli [5-7], rendendo quindi questa tipologia di leghe SMA poco convenienti su scala industriale poiché necessiterebbero di continuo monitoraggio e di un frequente ricambio, con una conseguente lievitazione dei costi.

Una classe di materiali di più recente sviluppo aventi caratteristiche per molti versi analoghe è costituita dai polimeri a memoria di forma anche in forma di schiuma (Shape Memory Polymers) [8-9]. A differenza delle leghe SMA, la memoria di forma non è intrinseca degli elementi che li costituiscono, ma è funzione principalmente delle metodologie di produzione e della composizione. Tale prerogativa consente di operare in un range di soluzioni molto più ampio ma di contro si

complica notevolmente il controllo di tutti i parametri in gioco. Il loro utilizzo è ancora molto limitato e per lo più ristretto al campo bio-medico, dove hanno riscosso molto successo grazie alla loro elevata bio-compatibilità. Il recupero della forma non è indotto da trasformazioni della struttura cristallina, ma da una transizione vetrosa [10-11]: al di sotto di un dato valore della temperatura il polimero è in uno stato vetroso, quando invece viene attivato termicamente assume un comportamento gommoso, tendendo a ripristinare la forma originaria proprio come avviene per le leghe SMA. Tuttavia, a differenza di queste ultime, non c'è possibilità alcuna di far assumere ai polimeri un effetto di memoria di forma a due vie.

Obiettivo di questo lavoro è quello di combinare le proprietà dei due materiali appena descritti, nel nostro caso entrambi aventi memoria di forma ad una sola via, per poter realizzare un prototipo di attuatore lineare ibrido che sia invece caratterizzato da un comportamento autonomo a due vie: operando un riscaldamento differenziato per i due componenti, si ha la possibilità di attivarli separatamente e quindi di ottenere un dispositivo intelligente che può recuperare due configurazioni imposte in fase di realizzazione.

Dopo aver studiato i metodi di produzione per le leghe SMA e per le schiume SMP, e dopo averle caratterizzate, si è passati alla realizzazione dell'attuatore. Lo scopo è stato quello di realizzare un attuatore SMP a due vie: il polimero, che come caratteristica intrinseca possiede memoria di forma ad una sola via, "congela" una determinata forma, imposta dall'applicazione di un carico esterno in fase di programming e dal seguente raffreddamento. Quando viene riscaldato sopra la temperatura di attivazione, il polimero si dilata restituendo così una certa spinta. Il comportamento a due vie è reso possibile grazie all'utilizzo di una contro-molla SMA che applica il carico esterno necessario per comprimere nuovamente la schiuma.

3. Materiali e tecniche sperimentali

L'idea di base per il funzionamento del prototipo è la seguente. La schiuma polimerica (SMP) viene portata ad una temperatura leggermente superiore a quella di attivazione. In questo modo assume un comportamento gommoso, e restituisce immediatamente parte del carico pre-impresso, tendendo a ripristinare così la propria forma originaria. La molla SMA, opportunamente dimensionata, viene compressa per effetto della spinta esercitata dalla schiuma SMP, impedendone quindi il completo recupero della forma imposta in fase di produzione. In seguito, riscaldando la molla SMA per effetto Joule, ed attivando così la trasformazione di fase martensite-austenite, questa genera un carico con il quale riesce a comprimere la schiuma di una certa quantità; lo spostamento registrato sarà pari alla corsa effettiva dell'attuatore. Facendo raffreddare il polimero, questo memorizzerà la nuova forma imposta; una volta che quest'ultimo è tornato nella fase rigida, viene interrotto il flusso di corrente che attraversa la molla SMA, e di conseguenza quest'ultima si scarica tornando a temperatura ambiente. Si è tornati così alla configurazione iniziale. Fornendo nuovamente calore al polimero si può iniziare nuovamente il ciclo di attuazione con le stesse modalità sopra elencate. La schiuma SMP è stata realizzata con l'innovativa tecnologia della schiumatura allo stato solido: mediante la compattazione di polvere epossidica ed il seguente trattamento termico, è stato possibile realizzare la schiuma SMP senza l'aggiunta di agenti schiumanti che, oltre ad essere tossici, innalzano sensibilmente i costi di produzione.

Nella Tab. 1 sono elencati i valori dei parametri caratterizzanti la fase di produzione delle schiume SMP:

p_c	v_c	t	T
125 MPa	10 mm/min	8 minuti	320 °C

Tabella 1: Parametri utilizzati per la produzione delle schiume SMP

p_c : pressione massima di compattazione delle polveri

v_c : velocità di compattazione delle polveri

t: tempo di permanenza in forno

T: temperatura del forno

I precursori da schiumare sono stati ottenuti a partire da 4 g di polveri, che dopo la compattazione hanno assunto una forma cilindrica avente altezza e diametro pari rispettivamente a 10 e 20 mm. In seguito alla schiumatura in forno, è stata eliminata la parte esterna del prodotto finale, con l'aiuto di una troncatrice e di un tornio parallelo, ed è stato ricavato un provino cilindrico di altezza pari a 57 mm e con un diametro di 15 mm (Fig. 1).



Fig. 1 - Schiuma SMP appena prodotta (a sinistra), schiuma SMP compressa del 40% (a destra).

Le molle SMA sono state realizzate a mano partendo da fili in Ni-Ti di vari diametri, avendo così la possibilità di agire su tutti i parametri caratterizzanti (diametro interno delle spire, numero delle spire, passo, diametro del filo) con lo scopo di variare la costante elastica in un ampio range di valori.

La durata del ciclo di attuazione richiede alcuni minuti, quindi il valore della tensione da applicare ai morsetti collegati alla molla SMA è stata mantenuta su valori più bassi di quelli che consentono una rapida attuazione. Infatti, con la tensione di 3 V applicata, la molla raggiunge rapidamente la temperatura di attivazione, ed altrettanto rapidamente arriva a temperature troppo elevate che compromettono la sua funzionalità, facendole perdere così l'effetto di memoria di forma ad una via dopo pochi cicli. Sperimentalmente sono stati quindi determinati valori di tensione e d'intensità di corrente tali da portare la molla SMA alla sua temperatura di attivazione in tempi più lunghi, con lo scopo di riuscire a mantenere la molla ad una temperatura più o meno costante e di poco superiore a quella di attivazione per lunghi intervalli di tempo. Tali valori corrispondono a 1,3 V e 4 A per i fili da 0,8 mm e da 1,1 V e 1,8 A per fili da 0,636 mm.

La configurazione scelta per l'assemblaggio dell'attuatore è quella verticale. Per quanto riguarda la molla l'unico problema era quello di evitare che si riscaldasse per convezione, raggiungendo così la temperatura di attivazione in un momento indesiderato, andando così in conflitto con la schiuma SMP. Tale problema è stato risolto schermando termicamente la molla con uno scudo ceramico e disponendola al di sotto della fonte di calore, eliminando così la convezione. Invece per quanto riguarda la schiuma, il problema era di più difficile risoluzione: è stato necessario individuare un modo per portare il polimero velocemente in temperatura, e raffreddarlo altrettanto rapidamente. Avendo una bassa conducibilità termica, e quindi tempi relativamente lunghi di risposta a sollecitazioni termiche, la questione è tutt'altro che banale. L'idea di riscaldare il tutto con l'utilizzo di una piastra è stato scartato a priori in quanto non si sarebbe garantita uniformità di temperatura su

tutto il pezzo. Si è allora deciso di utilizzare due fasce riscaldanti da 125 W l'una, da fissare intorno ad un cilindro in alluminio contenente il polimero. In questo modo i tempi necessari per il riscaldamento del polimero sono sensibilmente diminuiti rispetto a quelli registrati durante il riscaldamento in aria avvenuto nella camera termostatica (5-6 minuti invece di 1 ora). Per la fase di raffreddamento è stata invece utilizzata un'apposita ventola che, una volta interrotto il flusso di corrente attraverso le fasce riscaldanti, porta la temperatura della schiuma SMP al di sotto di quella di attivazione nel giro di pochi minuti. La temperatura del polimero è stata misurata mediante una termocoppia inserita all'interno della schiuma stessa e, con l'aiuto di un apposito dispositivo di controllo, è stata mantenuta intorno al valore desiderato. La schiuma è stata fissata al cilindro con un semplice perno applicato in prossimità della sua estremità superiore al fine di garantire che questa non gravasse con il proprio peso sulla molla e che spingesse in maniera corretta (Fig. 2).



Fig. 2 – L'attuatore a due vie realizzato combinando SMA e SMP.

Per rendere operativo l'attuatore è stata necessaria la realizzazione di un pistone cavo in alluminio, con l'aggiunta di due piattelli alle estremità; le due basi forniscono l'appoggio per la schiuma e per la molla (il piattello che si trova a contatto con la molla SMA è costituito da materiale isolante e forato al centro per permettere lo scorrimento della guida ceramica), mentre la cavità interna consente lo scorrimento relativo tra il pistone e la guida ceramica posta lungo l'asse della molla (necessaria per evitare che nella molla si verificano fenomeni di instabilità). La funzione del pistone è quella di mantenere la molla SMA e la schiuma SMP a debita distanza, per evitare il riscaldamento indesiderato della molla per convezione, ed allo stesso tempo, grazie alla sua geometria e alla configurazione dell'assieme, garantisce gli scorrimenti relativi minimizzando gli attriti. La scelta del materiale, alluminio, è stata fatta in base alla sua bassa densità: il pistone grava sulla molla SMA, ma grazie al suo peso contenuto ha un'influenza irrilevante rispetto alle forze in gioco.

Per completare il prototipo sono stati realizzati i due supporti: quello superiore, a forma di L, è composto da una barra verticale, filettata alla base per permetterne il fissaggio al supporto inferiore,

e da una staffa posta in orizzontale, fornita di un'asola che consente lo spostamento relativo tra il cilindro e la staffa stessa; il tutto servirà per sorreggere il cilindro contenente la schiuma SMP e per registrarne la sua posizione, grazie all'asola già citata ed al possibile scorrimento relativo che si ha tra la staffa e la barra verticale. Il supporto inferiore invece avrà il compito di sorreggere la guida ceramica in posizione verticale e di fornire un appoggio al supporto superiore.

Una volta risolti i problemi di centraggio tra l'asse del cilindro e l'asse della guida ceramica, il prototipo di attuatore ibrido è finalmente operativo.

4. Risultati e discussione

Caratterizzazione delle molle SMA

I parametri che caratterizzano le molle sono: diametro interno delle spire, diametro del filo, numero di spire, passo delle spire, costante elastica teorica e costante elastica reale.

La costante elastica teorica è stata calcolata in base alle relazioni:

$$1) \quad \tau = \frac{T \cdot r}{J}$$

$$2) \quad \theta = \frac{T \cdot L}{G \cdot J}$$

$$3) \quad K = \frac{G \cdot J}{L}$$

Dove T è la coppia applicata, J il momento d'inerzia polare della sezione e G il modulo di elasticità tangenziale. Per solidi a sezione circolare di diametro d il momento d'inerzia polare è pari a

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \text{ e quindi:}$$

$$4) \quad K = \frac{\pi d^4 G}{32 L}$$

La costante elastica reale è stata calcolata sperimentalmente durante le prove di compressione. Si è partiti dalla configurazione a riposo delle molle e si è registrato il carico F necessario a portarle nella configurazione a pacco. Supponendo un andamento lineare, dal rapporto $F/\Delta l$ (dove Δl è la differenza di lunghezza tra la configurazione a riposo e quella a pacco), è stata ricavata la costante elastica reale. E' doveroso aggiungere che il Δl non è pari a quello teorico [$\Delta l_{\text{teorico}} = N(p - d)$] poiché, trattandosi di molle realizzate manualmente, le spire non sono state realizzate perfettamente quindi si raggiunge la configurazione a pacco per Δl minori di quelli teorici.

Confrontando le costanti elastiche teoriche con quelle ricavate sperimentalmente si è notato che, al diminuire del numero di spire e del diametro interno delle spire stesse, ci si allontana sempre di più dall'andamento teorico. Ciò è dovuto al fatto che quando diminuisce D_{int} si ha una maggiore difficoltà nel fare aderire il filo alla filettatura interna della vite, con conseguente aumento del diametro reale. Invece quando si ha un piccolo numero di spire N, si trova una maggiore difficoltà nel mantenere in trazione il filo; ciò porta ad un complicato afferraggio delle estremità mediante l'utilizzo di morsetti e, specialmente durante il trattamento termico, si verifica un allentamento del filo e quindi un indesiderato aumento del diametro D delle spire, che porta ad un'inevitabile diminuzione della rigidità della molla SMA.

Dopo ciò si è passati alla caratterizzazione meccanica delle molle SMA con le modalità descritte nel capitolo precedente. Per ogni molla sono state eseguite almeno 5 misurazioni, a seconda del Δl disponibile, ad intervalli regolari (pari ad un innalzamento della traversa della macchina di trazione di 1,5 mm ad ogni step, con eccezione per le molle 5, 10 e 11 in cui l'intervallo è stato scelto pari ad 1 mm a causa del piccolo Δl); per approssimare i punti all'andamento di una retta è stato effettuato un fit lineare. I risultati sono riportati in Tab. 2.

Molla n°	D _{int} [mm]	d [mm]	N	p [mm]	F [N]	Δl [mm]	K _{teorica} [N/m]	K _{reale} [N/m]
1	4,2	0,636	6	2,5	1,7	9	301,4	188,9
2	4,6	0,636	5	2,5	1,2	6,5	284,9	184,6
3	4,2	0,636	7	2	1,7	8	258,3	212,5
4	4,3	0,636	5	2,5	1,4	6,5	340,1	215,4
5	4,6	0,636	4	2,5	1,1	5	356,2	220,0
6	4,2	0,8	7	2	3,3	8	585,1	412,5
7	4,2	0,8	6	2,5	4,4	9	682,7	488,8
8	4,6	0,8	5	2,5	2,8	6,5	650,3	430,8
9	4,3	0,8	5	2,5	3,6	6,5	771,9	553,8
10	4,6	0,8	4	2,5	3,0	5	812,9	600,0
11	4,2	0,8	4	2,5	3,5	5	1024	700,0
12	3,2	0,8	5	2,5	4,8	6,5	1600	738,5

Tabella 2: Parametri delle molle SMA

Caratterizzazione delle schiume SMP

Tutte le prove di compressione sulle schiume SMP sono state svolte alla temperatura di 130 °C; la temperatura di attivazione del polimero è di circa 110 °C e quindi la scelta è ricaduta su di una temperatura leggermente superiore per essere sicuri di operare in campo gommoso. Le prime quattro prove eseguite sono state ottenute imponendo la stessa velocità del pistone nelle due fasi di carico e scarico; ad ogni prova corrisponde una variazione della velocità (rispettivamente 1, 2, 4 e 8 mm/min). La deformazione imposta, invece, è pari a 8 mm in tutti e quattro i casi (~ 15 %). Queste misurazioni non prevedono intervalli di tempo in cui il sistema è fermo ma sono state eseguite in continuo, con lo scopo di ricavare un semplice andamento qualitativo delle curve di carico e scarico del polimero (Fig. 3).

Confronto curve SMA-SMP

Poiché le forze esplicate dalle molle SMA realizzate sono assai inferiori a quelle necessarie per comprimere la schiuma SMP, il confronto tra le curve caratterizzanti il comportamento delle molle SMA e delle schiume SMP avverrà solo per una di esse, ossia quella che ha fornito di fatto la spinta maggiore; infatti tutte le molle SMA da noi prodotte riescono a esplicitare una spinta massima inferiore ai 20 N, che corrisponde ad una compressione del provino SMP di circa 15 mm.

La costruzione del grafico illustrato in Fig. 3 avviene con le seguenti modalità: per prima cosa si trova un punto d'incontro tra la curva di scarico della schiuma SMP e quella di carico della molla SMA. Per far variare la posizione del suddetto punto d'incontro basterà far traslare le curve relative alle molle SMA rispetto l'asse delle ascisse, mantenendo invece fissa la curva relativa al provino SMP; questa operazione è l'equivalente di allontanare o avvicinare la molla SMA al provino SMP, operando sulla regolazione della distanza tra supporto superiore e supporto inferiore del prototipo. Analogamente bisognerà trovare il punto d'incontro tra la curva di scarico SMA e la curva di carico SMP; la distanza tra i due punti d'incontro, proiettata sull'asse delle ascisse, corrisponde alla corsa effettiva dell'attuatore. Lo scopo del lavoro è stato quindi quello di variare iterativamente la distanza SMP-SMA col fine di massimizzare la corsa.

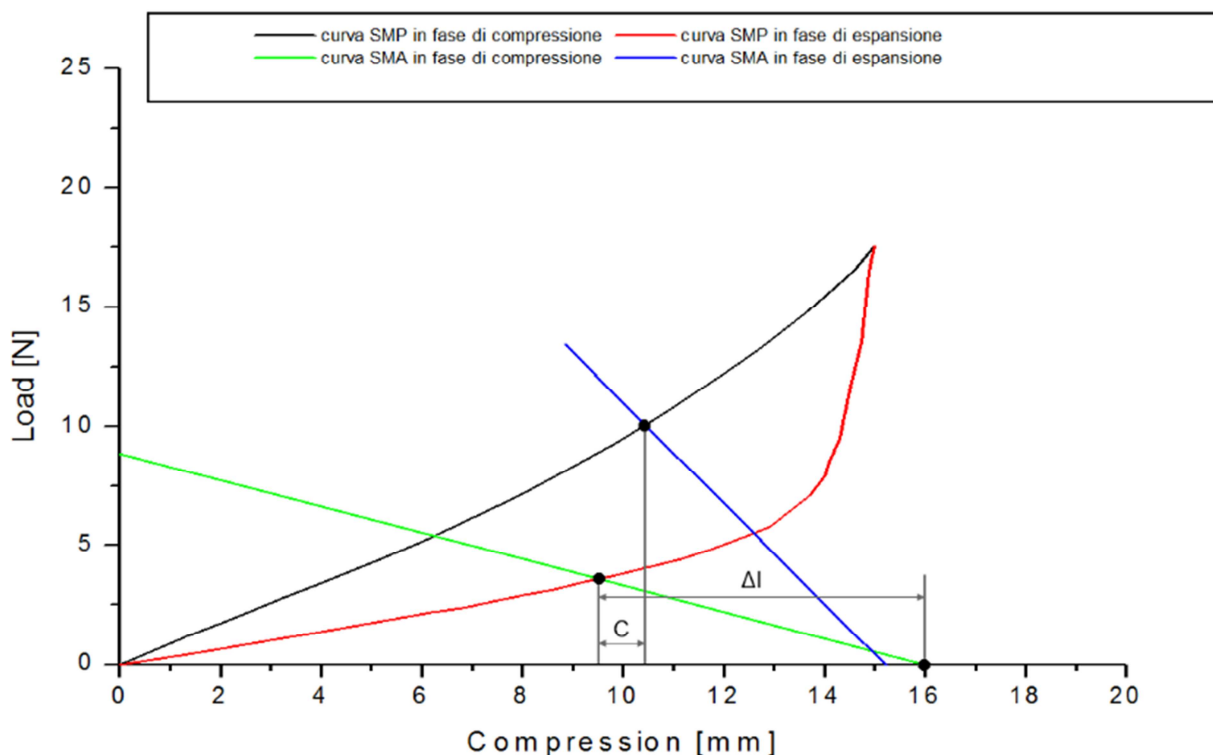


Fig. 3 - Confronto schiuma SMP - molla SMA.

Le curve nel grafico di Fig. 3 sono relative al comportamento delle molle SMA in fase martensitica e austenitica, rispettivamente corrispondenti a fase di compressione e di espansione, ed al comportamento del polimero in fase di compressione e di espansione quando ci troviamo al di sopra della temperatura di attivazione della schiuma SMP. Per prima cosa si è cercato di far coincidere il punto d'incontro tra la curva di carico SMA e quella di scarico SMP con la configurazione a pacco della molla, ovvero la distanza tra il punto d'incontro tra le due curve sopra citate e il punto in cui ha origine il sistema di curve relative alle molle SMA, il tutto proiettato sull'asse delle ascisse, è pari esattamente al Δl relativo alle singole molle (nel caso delle due molle SMA prese sotto esame i due Δl sono uguali e pari a 6,5 mm). In questo modo quando le due molle SMA vengono attivate termicamente si trovano nella condizione in cui esplicano la forza maggiore, massimizzando così la possibile corsa dell'attuatore, indicata con la lettera C in Fig. 3.

Le corse ottenute sono pari a circa 1 mm per la molla n° 9 (Fig. 4) e circa 1,5 mm per la molla n° 12 (Fig. 5), mentre la forza esplicita dall'attuatore nella sua fase attiva, ovvero quando si espande la schiuma SMP con la conseguente compressione delle molle SMA, ha un punto di massimo pari rispettivamente a circa 4 N e 6,5 N.

Dalle prove eseguite in laboratorio sul prototipo realizzato è stato verificato che i valori della corsa per i due casi appena illustrati sono molto vicini a quelli reali.



Fig. 4 - Estremi della corsa utile per l'attuatore configurato con la molla SMA n. 9

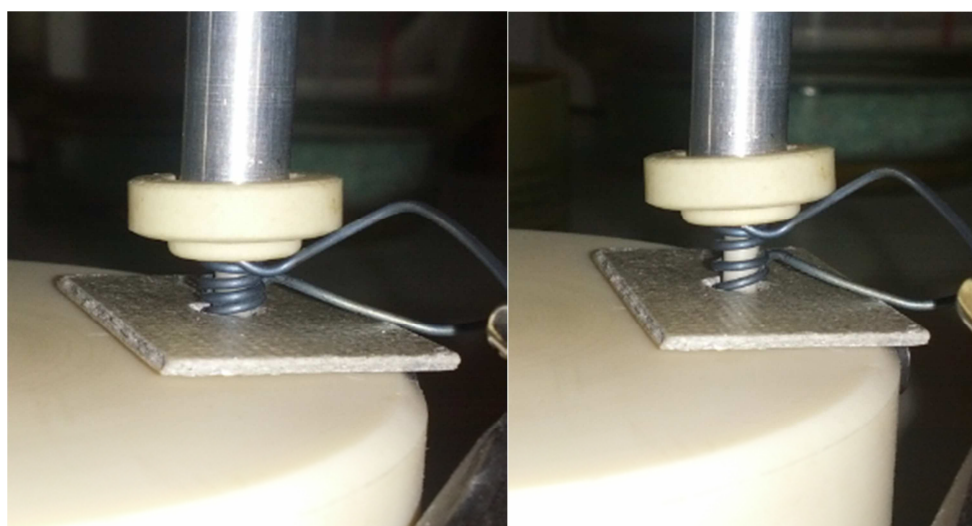


Fig. 5 - Estremi della corsa utile per l'attuatore configurato con la molla SMA n° 12

5. Conclusioni

Lo studio relativo a leghe e polimeri a memoria di forma condotto nel corso di questo lavoro è stato finalizzato alla progettazione e costruzione di un attuatore ibrido lineare a memoria di forma a due vie. Si è prodotto un set di dodici molle SMA, ognuna caratterizzata da diversi parametri, ed una schiuma SMP. Dopo la fase di produzione si è passati alla caratterizzazione termo-meccanica dei due elementi, svolgendo per entrambi delle prove di compressione: in ambo i casi sono state tracciate sperimentalmente le curve di carico e scarico nelle quali è stata espressa la forza, quella necessaria per comprimere il materiale e quella esplicita in seguito all'attivazione termica, in funzione dell'estensione. Confrontando le curve ottenute è stato così possibile valutare la possibilità di realizzare un attuatore ibrido lineare che sfruttasse le proprietà di entrambi i materiali studiati.

Per quanto riguarda le molle è stato verificato che i valori delle costanti elastiche reali sono abbastanza lontani da quelli teorici che erano stati preventivati. Le metodologie sperimentali utilizzate, combinate alle piccole dimensioni delle molle SMA realizzate, hanno influenzato notevolmente i risultati finali. Comunque si osserva che quando le molle vengono attivate termicamente, inducendo la variazione di fase, si registrano curve di scarico con pendenze 3-5 volte superiori rispetto a quelle che sono state misurate nella precedente fase di carico.

La caratterizzazione delle schiume SMP, una nuova tipologia di materiali che presenta molte analogie con le SMA, ha portato a risultati incoraggianti: anche dopo molti cicli di attuazione le

forze esplicate sono all'incirca costanti, ed il recupero della forma è sempre totale. Sperimentalmente si è osservato che durante la fase di espansione si ha un rapido decremento della spinta restituita dal polimero: infatti dopo essersi esteso di 1 mm, indipendentemente dalla deformazione percentuale imposta, la forza restituita corrisponde a meno del 50% di quella invece necessaria per portarla in quella data configurazione. Dopo questa fase in cui la curva ha pendenza molto accentuata, si ha una stabilizzazione del comportamento del polimero e la curva di scarico assume una pendenza molto meno elevata con andamento asintotico. Il comportamento appena descritto rende le schiume SMP adatte a questo tipo di applicazione, soprattutto per deformazioni percentuali di bassa entità: è stato infatti osservato che l'andamento della curva di scarico non è funzione solamente della deformazione imposta, ma anche del tempo. La schiuma, nelle prime fasi di espansione, avanza con velocità maggiori, rendendo così più grandi anche le spinte registrate; in seguito, per effetto viscoso, e quindi in funzione del tempo, la velocità diminuisce e con essa anche la forza esercitata verso l'esterno dal polimero. Invece nella fase di carico l'andamento della curva è all'incirca lineare per piccole deformazioni, parabolico per deformazioni superiori al 10%; ciò è sicuramente da imputare, oltre alla natura viscosa del materiale, anche all'espansione laterale impedita del provino SMP, a causa delle pareti del cilindro in cui è contenuto. Le osservazioni appena fatte riguardo il comportamento del polimero nelle fasi di carico e scarico mettono in evidenza il fatto che all'aumentare della deformazione le due curve tendono a divergere, facendo diminuire le possibilità dell'attuatore di ottenere una corsa di entità rilevante.

Confrontando le curve ottenute dalla caratterizzazione termo-meccanica dei due materiali è stata quindi verificata la presenza di una corsa di attuazione. Le prove eseguite sul prototipo hanno confermato i valori delle corse ottenuti analiticamente. Di contro però si osserva che la corsa è limitata a poco più di 1,5 mm. In questo studio è stata quindi confermata la possibilità di poter realizzare un attuatore a due vie che sfrutta elementi caratterizzati da memoria di forma ad una sola via. In futuro si potrà migliorare il lavoro svolto operando adeguatamente sulle metodologie di produzione dei SMP, ottimizzandone i parametri di produzione, ed aumentando le scale di realizzazione dei vari componenti, utilizzando cioè provini SMP caratterizzati da dimensioni e forze maggiori, e fili SMA di diametro più grande con la conseguente possibilità di poter aumentare numero e diametro delle spire, e quindi aumentare anche la corsa.

Per gli SMP si potranno ad esempio aggiungere cariche per rendere conduttivo il materiale e quindi velocizzare la fase di riscaldamento, studiare soluzioni per ottimizzare lo scambio termico o intervenire sulla geometria e livello di compattazione per aumentare la forza di attuazione.

Si può pertanto concludere che la combinazione di SMA e SMP ha permesso la realizzazione di un primo prototipo di attuatore a due vie. Sviluppi futuri potrebbero riguardarne l'applicazione in settori in cui si richiede una attuazione di precisione, viste le modalità di attuazione ottenute.

6. Riferimenti Bibliografici

- [1] W. Huang W. On the selection of shape memory alloys for actuators. *Mater Des* 2002; 23: 11-9.
- [2] K. Otsuka, X. Ren, "Physical Metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys", *Progress in Materials Science*, Vol. 50, pp. 511-678, (2005).
- [3] W. Huang, "On the selection of shape memory alloys for actuators", *Materials and Design*, Vol. 23, pp. 11-19, (2002).
- [4] R. Lahoz, J.A. Puertolas, Training and two-way shape memory in NiTi alloys: influence on thermal parameters, *Engineering Structures* 39 (2004) 434-459.
- [5] Z. Wang, X. Zu, X. Feng, J. Dai, Effect of thermomechanical treatment on the two-way shape memory effect of NiTi alloy spring, *Sensor and Actuators A* 157 (2010) 112-119.
- [6] G. Costanza, M. E. Tata, C. Calisti, Nitinol one-way shape memory springs: Thermomechanical characterization and actuator design, *Sensor and Actuators A* 157 (2010) 113-117.
- [7] G. Costanza, S. Paoloni, M.E. Tata, IR thermography and resistivity investigations on Ni-Ti Shape Memory Alloy, *Key Engineering Materials*, Vol. 605 (2014) pp.23-26, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.605.23.

- [8] A. Lendlein A. and S. Kelch, Shape-memory polymers *Angew, Chem. Int. Edn* 41, (2002) 2034–57.
- [9] M.A. Di Prima, M. Lesniewski, K. Gall, D.L. McDowell, T. Sanderson and D. Campbell, Thermo-mechanical behavior of epoxy shape memory polymer foams, *Smart Mater. Struct.* 16 (2007) 2330–40.
- [10] F. Quadrini, E.A. Squeo, Solid state foaming of epoxy resin, *Journal of Cellular Plastics* 44 (2008) 161-173.
- [11] L. Santo, F. Quadrini, E.A. Squeo, F. Dolce, G. Mascetti, D. Bertolotto, W. Villadei, P.L. Ganga, V. Zolesi, Behavior of Shape Memory Epoxy Foams in Microgravity: Experimental Results of STS-134 Mission, 24 (2012) 287-296.