



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

SMART MATERIALS
**PER APPLICAZIONI AEROSPAZIALI,
TIPOLOGIE E PROPRIETÀ**

Relatore: Prof. Mirco Zaccariotto

Laureanda: Alessia Mosele

Anno Accademico 2013/2014

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Prof. Mirco Zaccariotto per la professionalità e la disponibilità dimostratami durante la stesura del presente elaborato.

Il Grazie più grande è rivolto ai miei genitori che, come sempre, mi hanno sostenuto e incoraggiato durante questi anni di Università. Hanno dimostrato comprensione, pazienza e amore, soprattutto nei momenti più difficili e di fronte alle scelte più importanti.

Un Grazie speciale a Mauro, capace sempre di spronarmi e motivarmi, sostenendomi con la sua preziosa Amicizia.

Un affettuoso ringraziamento a Giulia, Chiara e Sara che sono state per me punti di riferimento e amiche su cui poter sempre contare. La loro presenza è stata fondamentale per il raggiungimento di questo traguardo.

Non posso non ringraziare tutte le mie ex-coinquiline, che in questi anni hanno condiviso con me non tanto una casa, quanto un'esperienza di vita.

Infine, un Grazie per i suoi pensieri e le sue preghiere, e per essermi sempre stata accanto con immenso affetto. Non ce l'hai fatta ad aspettare, ma è come se fossi qui... Grazie Nonna.

A Daniele e Anna

*When everything seems to be going against you,
remember that the airplane takes off against the wind,
not with it.*

(Henry Ford)

INDICE

ELENCO FIGURE.....	1
ELENCO TABELLE	5
ABBREVIAZIONI.....	7
SIMBOLI	8
SOMMARIO	11
1. INTRODUZIONE.....	13
2. LEGHE A MEMORIA DI FORMA	17
2.1. Storia dello sviluppo delle SMAs	17
2.2. Caratteristiche e proprietà.....	20
2.3. Il Nitinol e le altre leghe	31
2.4. Progettazione con SMAs: vantaggi e sfide.....	34
2.5. Altre tipologie di leghe a memoria di forma	37
2.5.1. Leghe a memoria di forma a elevate temperature	37
2.5.2. Leghe a memoria di forma magnetiche.....	38
2.6. Applicazioni.....	39
2.6.1. Applicazioni nei settori aerospaziale ed aeronautico	42
2.6.2. Applicazioni nel settore automobilistico.....	54
2.6.3. Applicazioni robotiche	57
2.6.4. Applicazioni biomediche.....	59
2.6.5. Applicazioni per l'ingegneria civile.....	66
2.6.6. Applicazioni in dispositivi elettrici e di fissaggio	68
2.6.7. Attuatori	70
2.6.8. Applicazioni sportive	72
2.6.9. Altre applicazioni	73
2.7. Modellazione	73
2.7.1. Introduzione	73
2.7.2. Modello costitutivo di Turner	76
2.7.3. Modelli costitutivi di Auricchio	78
2.7.3.1. Modello termomeccanico	79
2.7.3.2. Modello meccanico.....	83
3. POLIMERI A MEMORIA DI FORMA	87

3.1.	Introduzione e confronto con le leghe a memoria di forma	87
3.2.	Caratteristiche e proprietà.....	89
3.3.	Classificazioni e tipologie	94
3.4.	Applicazioni.....	98
3.4.1.	Applicazioni aeronautiche e aerospaziali	100
3.4.2.	Applicazioni mediche.....	105
3.4.3.	Applicazioni per la modellazione di superfici.....	107
3.4.4.	Applicazioni nell'assemblaggio attivo	107
3.4.5.	Attuazione	108
3.4.6.	Altre applicazioni	108
3.5.	Modellazione	109
4.	MATERIALI IBRIDI A MEMORIA DI FORMA.....	111
4.1.	Ibridi a memoria di forma.....	112
4.2.	Compositi ibridi con elementi in SMAs	115
4.3.	Compositi di SMAs e SMPs	117
5.	ALTRE TIPOLOGIE DI MATERIALI <i>SMART</i>	121
5.1.	Polimeri elettroattivi	121
5.1.1.	Caratteristiche e proprietà	121
5.1.2.	In particolare: elastomeri a cristalli liquidi	123
5.1.3.	Applicazioni	125
5.2.	Gel a memoria di forma.....	128
5.3.	Ceramiche a memoria di forma	129
5.4.	Metamateriali.....	133
6.	ESEMPIO APPLICATIVO: TAPE SPRING.....	137
6.1.	Tape spring	137
6.1.1.	Introduzione	137
6.1.2.	Caratteristiche e proprietà	138
6.1.3.	Configurazioni.....	142
6.1.4.	Applicazioni	146
6.2.	Analisi agli elementi finiti	147
6.2.1.	Tape spring in CFRP	147
6.2.1.1.	Modellazione <i>tape spring</i>	147
6.2.1.2.	Risultati	152

6.2.2.	Tape spring in CFRP con SMA.....	158
6.2.2.1.	Introduzione	158
6.2.2.2.	Modello <i>tape spring</i>	160
6.2.2.2.1.	Tape spring in SMA.....	160
6.2.2.2.2.	Tape spring in CFRP con SMA	163
6.2.3.	Effetti di imperfezioni geometriche e carichi asimmetrici.....	175
6.2.4.	Geometrie alternative	180
6.2.5.	Osservazioni	182
6.3.	Conclusioni.....	183
7.	CONCLUSIONI	187
8.	BIBLIOGRAFIA	189

ELENCO FIGURE

Fig. 2-1 Pubblicazioni sulle SMAs e brevetti US dal gennaio 1990 al giugno 2013 [1].	18
Fig. 2-2 Numero di articoli e brevetti riguardanti le SMAs, raggruppate per anno [1].	19
Fig. 2-3 Mercato globale previsto per il periodo 2010-2016 [1].	20
Fig. 2-4 Fasi e strutture cristalline delle SMAs [1].	21
Fig. 2-5 (a) Struttura cubica a corpo centrato B2. (b) Struttura monoclinica	22
Fig. 2-6 Schema di trasformazione del Nitinol [13].	23
Fig. 2-2-7 Comportamento a memoria di forma e superelastico in funzione della temperatura [13].	23
Fig. 2-2-8 . Effetto a memoria di forma ad una via in funzione della temperatura [13].	24
Fig. 2-9 Effetto a memoria di forma a una via: percorso di carico-scarico [13].	24
Fig. 2-10 Memoria di forma a due vie in funzione della temperatura [13].	24
Fig. 2-11 Comportamento superelastico: (a) recupero totale di	25
Fig. 2-12 Schema comportamentale di una SMA [13].	27
Fig. 2-13 Curve stress-strain per acciaio e SMA, per differenti condizioni di temperatura. ...	28
Fig. 2-14 Effetto a memoria di temperatura in un ciclo DSC.	29
Fig. 2-15 Diagramma di stato del Nitinol [13].	31
Fig. 2-16 Massima deformazione e massima energia specifica versus massima larghezza di banda per diverse classi di materiali attivi [1].	39
Fig. 2-17 Giunto in SMA [16].	42
Fig. 2-18 Applicazioni, esistenti e potenziali, delle SMAs nei velivoli [1].	43
Fig. 2-19 Esempi di sistemi per il dispiegamento di un'antenna [16].	44
Fig. 2-20 Sistema per la rotazione di una copertura in vetro [16].	44
Fig. 2-21 Esempio di modello di supporto costituito da vertebre flessibili [13].	45
Fig. 2-22 Modello SMART wing e particolare del tubo di torsione [14].	46
Fig. 2-23 Morphing dell'ala con attuatori SMA antagonisti [1].	46
Fig. 2-24 Movimenti di un'ala artificiale con strisce di SMA [2].	47
Fig. 2-25 Chevron a geometria variabile [1].	47
Fig. 2-26 Dispositivi low-shock [20].	48
Fig. 2-27 Dispositivo SMART [21].	49
Fig. 2-28 Sequenza di comandi per SMART [21].	50
Fig. 2-29 Controllo di posizione di un pannello: (a) torsione del filo SMA. (b) riscaldamento per il recupero della forma. (c) foto del prototipo [2].	50
Fig. 2-30 (a) LFSA. (b) cerniera con SMA, piegata e dispiegata [17].	51
Fig. 2-31 Pannello in PFC [22].	51
Fig. 2-32 Andamento della temperatura a causa del passaggio di corrente elettrica [22].	52
Fig. 2-33 Motore solare [2].	53
Fig. 2-34 Potenziali applicazioni delle SMAs nel settore automotive [1].	55
Fig. 2-35 Applicazioni emergenti delle SMAs [1].	56
Fig. 2-36 Intervalli delle temperature operative per dispositivi nel campo automobilistico [1].	56
Fig. 2-37 BioniOpter del Festo Group, ispirata al volo della libellula [1].	58

Fig. 2-38 Micro-veicolo [2].....	58
Fig. 2-39 Veicolo rotante [2].....	59
Fig. 2-40 Relazione stress-strain per tessuti ossei, tendinei, in acciaio o in Nitinol superelastico [1].	62
Fig. 2-41 Filtro vascolare in SMA: (a) configurazione piegata. (b) configurazione dispiegata [14].	62
Fig. 2-42 (a) Modello di uno stent tagliato al laser. (b) Forza di resistenza radiale e forza che punta verso l'esterno in funzione del ciclo d'isteresi [1].	63
Fig. 2-43 Tipologie di stent.	63
Fig. 2-44 Catetere attivo in SMA [1].	64
Fig. 2-45 Dispositivi artificiali di supporto per il cuore, realizzati con SMAs [1].	64
Fig. 2-46 Muscoli artificiali in SMA [1].	65
Fig. 2-47 Distanziatore vertebrale in SMA [14].	65
Fig. 2-48 Impianto "a rigidità alterabile" [1].	66
Fig. 2-49 Motore elettrico con due molle in SMA [2].	68
Fig. 2-50 Capacità di fissaggio delle SMAs [2].	69
Fig. 2-51 Piattaforma con gradi di libertà multipli, con SMAs [2].	70
Fig. 2-52 Differenza tra CTE tangente e secante [13].	78
Fig. 2-53 Trasformazioni austenite-martensite e martensite-austenite [26, vol. A].	79
Fig. 2-54 Funzione $g(\sigma_{eq})$ [26, vol. A].	82
Fig. 2-55 Tipica curva stress-strain per un provino 100% martensite testato sotto Mf_0 [26, vol. A].	83
Fig. 2-56 Formule di conversione tra i due modelli [26, vol. A].	86
Fig. 3-1 Illustrazione schematica di uno SMP: (a) configurazione originale. (b) sistema allungato ad elevate temperature. (c) forma temporanea a bassa temperatura. (d) recupero di forma dopo riscaldamento [2].	89
Fig. 3-2 Architettura generale di un polimero a memoria di forma [28].	90
Fig. 3-3 Percentuale di acqua nel polimero vs tempo di immersione [25].	91
Fig. 3-4 Recupero controllato di forma in uno SMP con CNTs [26].	94
Fig. 3-5 Sequenza di fotogrammi del recupero di forma di uno SMP immerso in acqua [25].	96
Fig. 3-6 Micrografia di un laminato in EMC, lato in compressione [30].	100
Fig. 3-7 Pannello solare RAPDAR: (a) struttura completa. (b) longherone primario [31]. ...	101
Fig. 3-8 Ciclo per la tecnologia CHEM [33].	102
Fig. 3-9 Trave con concetto CCSL [33].	104
Fig. 3-10 Morphing di un'ala in SMP [2].	105
Fig. 3-11 Esempio di filo per sutura in SMP capace di auto-serrarsi se immerso in acqua a temperatura ambiente [2].	105
Fig. 3-12 Foro che si allarga automaticamente se riscaldato [2].	108
Fig. 3-13 Posate con manici in SMP [25].	109
Fig. 4-1 Schema generale per la progettazione di un materiale ibrido a memoria di forma [46].	112
Fig. 4-2 Matrice e inclusioni per SMHs [2].	113
Fig. 4-3 Auto-riparazione in uno SMH [2].	114

Fig. 4-4 Influenza del numero di fibre NiTi inserite sulla deformazione generata dalle forze di recupero per un composito TiNi/CFRP: (a) fibra singola. (b) 2 fibre . (c) 4 fibre (d) 6 fibre [46].	116
Fig. 4-5 Riparazione di una cricca trasversale [46].	116
Fig. 4-6 Confronto tra i moduli di SMA e SMP rispetto le temperature di trasformazione [46].	118
Fig. 5-1 Principio di funzionamento di un EAP dielettrico [48].	122
Fig. 5-2 Transizione reversibile tra gli stati isotropo e nematico di un LCE [50].	124
Fig. 5-3 Prototipo del tergcristallo in EAP.	125
Fig. 5-4 Mano robotica dimostrativa degli attuatori in EAP (Jet Propulsion Laboratory, JPL) [49].	127
Fig. 5-5 Ciclo di recupero della forma di uno SMGs [34].	129
Fig. 5-6 Diagramma stress-strain per una SMC [35].	130
Fig. 5-7 Dimostrazione dell'effetto a memoria di forma [35].	131
Fig. 5-8 Curve stress-strain per SMCs in zirconia, leghe NiTi e leghe CuNiAl [35].	132
Fig. 5-9 Curva tensione di attuazione-deformazione di attuazione per diverse categorie di materiali [35].	132
Fig. 5-10 Temperature di fine martensite M_f per diversi SMMs [35].	133
Fig. 6-1 Geometria di una tape spring [14-15].	139
Fig. 6-2 Piegatura di una tape spring: (a) opposite sense. (b) equal sense [14].	139
Fig. 6-3 Curva momento-rotazione di una tape spring [15].	140
Fig. 6-4 iagrammi $M-\theta$ "ribaltati": (a) equal sense. (b) opposite sense [15].	142
Fig. 6-5 Configurazioni per le tape spring: (a) in parallelo. (b) Tubo [15].	143
Fig. 6-6 Dispositivi con tape spring: (a) in serie; (b) in parallelo [20].	143
Fig. 6-7 Configurazioni di tape hinges [19].	144
Fig. 6-8 Esempio di diagrammi momento-rotazione [19].	144
Fig. 6-9 MAEVA tape spring [31].	145
Fig. 6-10 Tape spring a stabilità neutra: (a) dispiegata. (b) completamente arrotolata. (c) parzialmente arrotolata [22].	145
Fig. 6-11 Filo di SMA all'interno della tape spring [22].	146
Fig. 6-12 Modello geometrico della tape spring.	148
Fig. 6-13 Confronto dei risultati tra la mesh di base (Mesh 1) ed una più fine (Mesh 2).	149
Fig. 6-14 Rappresentazione dell'elemento MPC.	149
Fig. 6-15 Asse neutro della tape spring [17].	150
Fig. 6-16 Confronto fra metodo Fixed e arc length method.	151
Fig. 6-17 Diagramma $M-\theta$ per il caso opposite sense.	154
Fig. 6-18 Snapshot della deformata: (a) appiattimento sezione. (b) posizione generica.	154
Fig. 6-19 Diagramma $M-\theta$ per il caso equal sense.	156
Fig. 6-20 Diagramma $M-\theta$ incompleto.	157
Fig. 6-21 Doppia piegatura nel caso equal sense.	157
Fig. 6-22 Sistema di tape spring più smorzatore in SMA [23].	158
Fig. 6-23 Cerniera in SMA per il dispiegamento di un LFSA [24].	159
Fig. 6-24 Processo delle trasformazioni di fase per una tape spring in SMA.	161

Fig. 6-25 Impostazione parametro Matrix Solver.	161
Fig. 6-26 Confronto fra diagrammi M- θ di SMAs con differenti moduli elastici.....	162
Fig. 6-27 Snapshot della deformata.....	163
Fig. 6-28 Proprietà materiali.	165
Fig. 6-29 Confronto tra curve M- θ di tape spring in CFRP e CFRP+SMA.....	166
Fig. 6-30 Sezione per la determinazione dei parametri equivalenti.	167
Fig. 6-31 Diagramma M- θ per due diversi spessori dell'elemento in SMA.	169
Fig. 6-32 Confronto.....	170
Fig. 6-33 Confronto tra spessori differenti.....	172
Fig. 6-34 Proprietà del laminato.....	173
Fig. 6-35 Confronto tra il laminato e la tape spring in CFRP con la striscia di SMA.	174
Fig. 6-36 Deformata del laminato, con appiattimento della sezione trasversale.....	174
Fig. 6-37 Diagramma M- θ per il laminato.	175
Fig. 6-38 Zoom sui nodi modificati.	176
Fig. 6-39 Posizione decentrata della zona di piega causata dalla presenza delle imperfezioni.	177
Fig. 6-40 Confronto tra il modello con e senza imperfezioni.	177
Fig. 6-41 Snapshot della deformata.....	178
Fig. 6-42 Confronto tra il caso di carico simmetrico e quello di carico asimmetrico.	178
Fig. 6-43 Confronto tra il caso con i momenti simmetrici e quello con momenti asimmetrici.	179
Fig. 6-44 Deformata (carico di torsione ad una estremità).	180
Fig. 6-45 Geometria sciancrata.	181
Fig. 6-46 Deformata.	182
Fig. 6-47 Andamento della temperatura a causa del passaggio di corrente elettrica [22].....	183
Fig. 6-48 Spettri di risposta con riferimento di soglia [23].....	185

ELENCO TABELLE

Tab. 1-1 Materiali che manifestano l'effetto a memoria di forma [1].	15
Tab. 2-1 Valori di M_s al variare della composizione.	25
Tab. 2-2 Proprietà fisiche di una lega commerciale NiTi [1].	26
Tab. 2-3 Proprietà del Nitinol.	32
Tab. 2-4 Proprietà di varie tipologie di SMA.	34
Tab. 2-5 Proprietà delle SMAs e loro effetti [15].	35
Tab. 2-6 Gruppi di HTSMAs e loro proprietà [1].	37
Tab. 2-7 Temperature di trasformazione per leghe a base NiTi [14].	38
Tab. 2-8 Categorie di applicazioni delle SMAs [1].	41
Tab. 2-9 Potenziali applicazioni delle SMAs [1].	41
Tab. 2-10 Confronto fra attuatori tradizionali e in SMA [1].	55
Tab. 2-11 Applicazioni delle SMAs nel settore della robotica [1].	57
Tab. 2-12 Applicazione delle SMAs in campo biomedico [1].	60
Tab. 2-13 Sviluppo degli SMMs nel settore chirurgico [2].	61
Tab. 2-14 Confronto tra attuatori [1].	71
Tab. 2-15 Confronto tra i parametri dei due modelli di Auricchio [26, vol. A].	86
Tab. 3-1 Confronto SMAs vs SMPs [46].	88
Tab. 3-2 Proprietà di una schiuma CHEM [33].	97
Tab. 3-3 Applicazioni degli SMPs [26].	99
Tab. 3-4 Applicazioni della tecnologia CHEM (CCSL: CFRF/CHEM Spring Lock) [33].	103
Tab. 5-1 Confronto per le proprietà di EAC ed EAP [48].	121
Tab. 6-1 Parametri geometrici della tape spring.	147
Tab. 6-2 Proprietà del materiale CFRP.	148
Tab. 6-3 Parametri di controllo del loadcase.	152
Tab. 6-4 Parametri di controllo del job.	152
Tab. 6-5 Scarti riferiti ai valori ricavati in [15].	153
Tab. 6-6 Scarti.	155
Tab. 6-7 Confronto delle prestazioni di alcuni dispositivi di dispiegamento [23].	159
Tab. 6-8 Valori caratteristici del grafico $M-\theta$ per SMA con differenti moduli elastici.	163
Tab. 6-9 Caratteristiche della SMA considerata.	164
Tab. 6-10 Rigidezze di deployment.	166
Tab. 6-11 Valori ottenuti dalle formule e relativi scarti.	168
Tab. 6-12 Valori caratteristici per carichi simmetrici e asimmetrici.	179

ABBREVIAZIONI

AFRL	<i>Air Force Research Laboratory</i>
CAD	<i>Computing-Aided Drafting</i>
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CCSL	<i>CFRF/CHEM Spring Lock</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Plastic</i>
CHEM	<i>Cold Hibernated Elastic Memory</i>
CNT	<i>Carbon Nanotube</i>
DARPA	<i>Defence Advanced Research Projects Agency</i>
DSC	<i>Differential Scanning Calorimeter</i>
EAC	<i>Electroactive Ceramic</i>
EAP	<i>Electro-Active Polymer</i>
ECTE	<i>Effective Coefficient of Thermal Expansion</i>
EMC	<i>Elastic Memory Composites</i>
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
FSMA	<i>Ferromagnetic Shape Memory Alloy</i>
GM	<i>General Motors</i>
HTSMA	<i>High Temperature Shape Memory Alloy</i>
IPMC	<i>Ionic Polymer-Metal Composite</i>
ISS	<i>International Space Station</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LDPE	<i>Low-Density Polyethylene</i>
LFSA	<i>Lightweight Flexible Solar Array</i>
MSMA	<i>Magnetic Shape Memory Alloy</i>
MPC	<i>Multi Point Constraint</i>
OWSME	<i>One-Way Shape Memory Effect</i>
PE	<i>Pseudoelasticity</i>
PFC	<i>Partially Flexible Composite</i>
RAPDAR	<i>Roll Out and Passively Deployed Array</i>
SCM	<i>Shape Change Materials</i>
SE	<i>Superelasticity</i>
SIM	<i>Stress Induced Martensite</i>
SMA	<i>Shape Memory Alloys</i>
SMAHC	<i>Shape Memory Alloy Hybrid Composite</i>
SMc	<i>Shape Memory Composite</i>
SMC	<i>Shape Memory Ceramics</i>
SME	<i>Shape Memory Effect</i>
SMG	<i>Shape Memory Gel</i>
SMH	<i>Shape Memory Hybrid</i>
SMM	<i>Shape Memory Material</i>
SMP	<i>Shape Memory Polymer</i>
SRM	<i>Stimuli-Responsive Material</i>

TWSME	<i>Two-Way Shape Memory Effect</i>
SAMPSON	<i>Smart Aircraft and Marine Propulsion System Demonstration</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SIM	<i>Stress Induced Martensite</i>
SMT	<i>Shape Memory Technology</i>
TME	<i>Temperature Memory Effect</i>
VGC	<i>Variable Geometry Chevron</i>

SIMBOLI

A_f	<i>Austenite-finish-temperature</i>
A_s	<i>Austenite-start-temperature</i>
Al	Alluminio
Au	Oro
C	Carbonio
Cd	Cadmio
Ce	Cerio
Co	Cobalto
Cu	Rame
Fe	Ferro
Ga	Gallio
GaAs	Arseniuro di gallio
Hf	Afnio
In	Indio
M_+	Momento di propagazione nel caso <i>opposite sense</i>
M_+^{\max}	Momento massimo per prova <i>opposite sense</i>
M_-^{\max}	Momento massimo per una prova <i>equal sense</i>
M_-	Momento di propagazione nel caso <i>equal sense</i>
M_f	<i>Martensite-finish-temperature</i>
M_s	<i>Martensite-start-temperature</i>
Mn	Manganese
N	Azoto
Nb	Niobio
Nd	Neodimio
Ni	Nichel
O	Ossigeno
PE	Polietilene
PU	Poliuretano
SiC	Carburo di silicio
T_g	Temperatura di transizione vetrosa
T_i	Temperatura isotropica
T_m	Temperatura di fusione
Ti	Titanio

TPI	Trans-poliisoprene
Pd	Palladio
Pt	Platino
Sn	Stagno
Zn	Zinco
Zr	Zirconio
θ_{heel}	Angolo a cui avviene il ritorno al tratto lineare durante il percorso di scarico
θ_{+}^{max}	Angolo di dispiegamento relativo a M_{+}^{max}
θ_{-}^{max}	Angolo di dispiegamento relativo a M_{-}^{max}
θ_{ramp}	Angolo di dispiegamento per cui la prima volta si annulla il gradiente del momento nel caso <i>equal</i>

Unità di misura

[°]	grado sessagesimale
[°C]	grado centigrado
[cm]	centimetro
[g]	grammo
[GPa]	gigapascal
[J]	joule
[kg]	chilogrammo
[m]	metro
[mm]	millimetro
[N]	newton
[MPa]	megapascal
[Pa]	pascal
[rad]	radianti
[s]	secondo
[W]	watt

SOMMARIO

Nel presente lavoro di tesi si prenderanno in considerazione le categorie di *SMART materials* più rilevanti per il settore aerospaziale, presentandone proprietà e applicazioni.

In particolare, si analizzerà il comportamento di membrane a sezione trasversale curva, definite *tape spring*, che sono impiegate nei sistemi di dispiegamento a bordo di satelliti.

Nel capitolo 1 si introducono gli *SMART materials*, proponendone una classificazione, mentre nei capitoli successivi si approfondiscono gli aspetti caratteristici di ogni singola categoria.

Il capitolo 2 riguarda le leghe a memoria di forma (*shape memory alloys*, SMAs), tipologia più diffusa tra i materiali *SMART*. Se ne discutono le proprietà, le applicazioni e la modellazione. Viene posta inoltre l'attenzione sulla lega più conosciuta e impiegata, il Nitinol.

Nel capitolo 3 si presentano i polimeri a memoria di forma (*shape memory polymers*, SMPs), mettendoli a confronto con le leghe a memoria di forma e analizzandone peculiarità e settori applicativi.

Il capitolo 4 considera una categoria di materiali *SMART* chiamati materiali ibridi a memoria di forma che comprendono: ibridi a memoria di forma, compositi ibridi con SMAs e compositi di SMAs e SMPs.

Nel capitolo 5 si raggruppano quelle classi di materiali *SMART* meno diffuse e conosciute, tra le quali rientrano i polimeri elettroattivi, i gel a memoria di forma, le ceramiche a memoria di forma ed i metamateriali.

Infine, nel capitolo 6 viene studiato il comportamento di una *tape spring* mediante l'utilizzo di software per l'analisi agli elementi finiti (MSC Patran, MSC Nastran e MSC Marc Mentat). Si considerano due modelli di base: uno in composito polimerico rinforzato con fibre di carbonio (CFRP), mentre nell'altro, sempre in CFRP, sono stati aggiunti elementi in lega a memoria di forma (Nitinol). Per ognuno verranno analizzati diversi parametri di influenza e diverse configurazioni.

1. INTRODUZIONE

Le recenti applicazioni ingegneristiche hanno richiesto lo sviluppo di nuovi materiali per poter migliorare le prestazioni e implementare in essi funzioni sempre più complesse.

La spinta tecnologica nei confronti dei sistemi *smart* con funzioni e caratteristiche adattabili richiede un uso sempre maggiore di sensori, attuatori o *micro-controllers* [1]; ciò comporterebbe un indesiderato aumento di massa e volume dei relativi componenti. Inoltre, si ricercano applicazioni che devono far fronte a restrizioni tecniche e commerciali, quali lo spazio disponibile, l'ambiente operativo e il budget disponibile. In questo scenario, la scienza e l'ingegneria dei materiali hanno un ruolo di fondamentale importanza dovendo rispondere a queste esigenze attraverso lo sviluppo di materiali capaci di adempiere più funzioni, senza l'impiego di ulteriori dispositivi e meccanismi.

Negli ultimi decenni si è osservato un crescente sviluppo dei materiali compositi, che hanno trovato applicazione in diversi settori, andando ad affiancare o addirittura sostituire i materiali strutturali tradizionali (acciaio, leghe leggere, ecc.). A questa categoria se n'è aggiunta un'altra, molto ampia, che comprende gli **SMART materials** (materiali intelligenti), capaci sia di essere sensibili all'ambiente che li circonda, sia di reagire ad esso per adattarsi nel modo migliore. In molti casi, tali materiali vengono anche denominati *multifunctional materials* poiché è richiesto loro di compiere funzioni multiple (di sensori, di attuazione, e di controllo). Nello specifico, questi materiali sono in grado di riconoscere e valutare l'entità di uno stimolo esterno, e di reagire in modo reversibile con un'opportuna risposta cambiando sia le proprietà fisiche sia quelle meccaniche. Essi sono quindi capaci di unire proprietà meccaniche e funzionali in un unico sistema.

In letteratura [2] viene presentata una classificazione che definisce come *stimuli-responsive materials* (SRMs) quei materiali capaci di rispondere a particolari stimoli, attraverso la modifica delle loro proprietà fisiche e/o chimiche, e li suddivide in base alla tipologia di stimolo:

- calore (*thermo-responsive materials*);
- tensione/pressione (*mechano-responsive materials*);
- corrente/tensione elettrica (*electro-responsive materials*);
- campo magnetico (*magneto-responsive materials*);
- variazioni del PH, solventi, umidità (*chemo-responsive materials*);
- luce (*photo-responsive materials*).

Gli SRMs e i rispettivi compositi hanno richiamato un'attenzione particolare nella comunità ingegneristica in quanto si adattano a molteplici applicazioni, con potenziali proprietà che rispondono efficacemente a molti dei requisiti e delle esigenze imposte.

In questa categoria generale ne ricadono numerose altre che si andranno ora ad analizzare (Fig. 1-1).

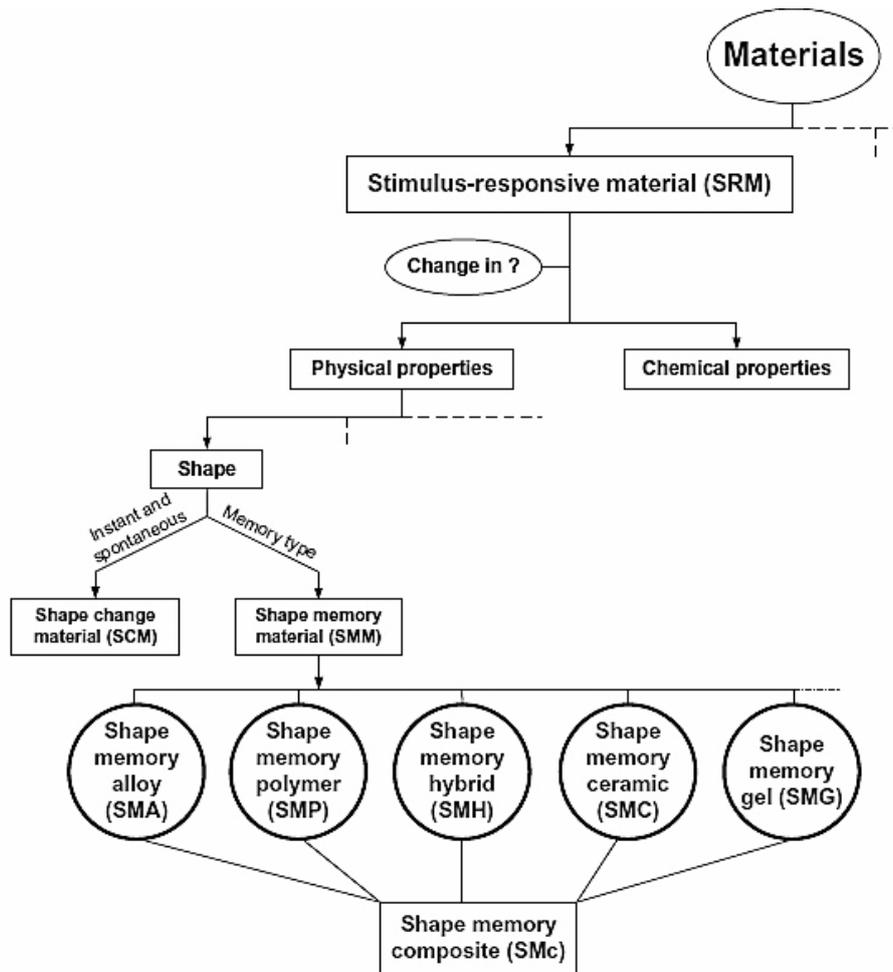


Fig. 1-1 Classificazione degli stimuli-responsive materials [2].

Una prima distinzione è fatta a seconda della tipologia di proprietà che varia a fronte dello stimolo, fisica o chimica. Nel primo caso si distinguono poi i materiali a cambio di forma (*shape change materials*, SCMs) e quelli a memoria di forma (*shape memory materials*, SMMs). Gli SCMs reagiscono alla presenza dello stimolo con un cambio di forma spontaneo e istantaneo. A questo gruppo appartengono:

- i polimeri elettroattivi (*electro-active polymers*, EAPs);
- i materiali piezoelettrici;
- i cristalli liquidi (ad esempio i cristalli liquidi nematici).

Nel caso invece degli SMMs la forma temporanea può essere virtualmente mantenuta finché non si applichi uno stimolo che inneschi il recupero della forma.

In generale, tutti gli SMMs sono caratterizzati dall'effetto a memoria di forma (*shape memory effect*, SME), definito come la capacità di recuperare la forma originale, dopo essere stati deformati quasi-plasticamente. A questa categoria appartengono (Fig. 1-1):

- leghe a memoria di forma (*shape memory alloys*, SMAs);
- polimeri a memoria di forma (*shape memory polymers*, SMPs);
- ibridi a memoria di forma (*shape memory hybrid*, SMHs);
- ceramiche a memoria di forma (*shape memory ceramics*, SMCs);
- gel a memoria di forma (*shape memory gels*, SMGs).

Inoltre si definiscono come compositi a memoria di forma (*shape memory composites*, SMCs) quei materiali costituiti almeno da un SMM (SMA o SMP).

In Tab. 1-1 è riportato un elenco dei principali materiali a memoria di forma esistenti che saranno poi oggetto dei successivi capitoli.

Materials	Examples	Notes
Metals	SMA: <ul style="list-style-type: none"> • NiTi-based alloys: NiTi, NiTiCu, NiTiPd, NiTiFe, NiTiNb, NiFeGa, NiTiCo • Cu-based alloys: CuZn, CuZnAl, CuAlNi, CuAlNiMn, CuSn... • Fe-based alloys: FePt, FeMnSi, FeNiC ... • Ag-based alloys: AgCd ... • Au-based alloys: AuCd ... • Co-based alloys: CoNiAl... 	The best choice is NiTi SMA. <u>E.g. NiTi-based:</u> Frequency: ≤ 3 Hz, dia. 100 μ m with natural cooling (Very Slow). Strain: max. 10% (High), Recommended: 4%. Stress: up to 500 MPa (High), Recommended: 100 MPa. Max. operating temp: ca. 100°C (Low).
	MSMA/FSMA: NiMnGa, FePd, NiMnAl, FePt, Dy, Tb, LaSrCuO, ReCu, NiMnIn, CoNiGa...	NiMnGa was first discovered in 1984 and have received increasing interest since the principle of the MSMA was presented by Ullakko <i>et al.</i> <u>E.g. NiMnGa:</u> Frequency: max. 2kHz (High), Recommended: 500 Hz Strain: max. 10% (High), Typical: 6% Stress: max. 9MPa (Low), Typical: 3.4MPa Young modulus: 0.5GPa (Very Low) Max. operating temp: 72°C. (Low), full austenite transition at 48°C.
	HTSMA: TiNiPd, TiNiPt, NiTiHf, NiTiZr, ZrRh, ZrCu, ZrCuNiCo, ZrCuNiCoTi, TiMo, TiNb, TiTa, TiAu, UNb, TaRu, NbRu, FeMnSi and etc.	So far, TiNiPd and TiNiPt produced the best results and commercially ready. <u>E.g. TiNiPd [411]:</u> Frequency: < 1 Hz with natural cooling (Very Slow) Strain: 1.5 - 4.0% (Med) Stress: max. 295 MPa (High) Max. operating temp: 83 - 513°C (Very high)
Polymers	PTFE, PU, Poly-caprolactone, EVA + nitrilo rubber, PE, Poly-cyclooctene, PCO-CPE blend, PCL-BA copolymer, Poly(ODVE)-co-BA, EVA + CSM, PMMA, Copolyesters, PET-PEG ...	First publication described SME in polymers was in 1941 that is much earlier than SMA. <u>E.g. PU based:</u> Frequency: max 1 Hz (Very Slow) Strain: >800% (Very High) Stress: 3 MPa (Low)
Ceramics	ZrO ₂ (PSZ), MgO, CeO ₂ , PLZT, PNZST ...	Shape memory ceramics has limited shape memory effect (below 0.5 %). <u>E.g. PNZST:</u> Frequency: ca. 1 kHz (High) Strain: < 1 % (Very low) Stress: max.100 MPa (High), Typically: 35 MPa. Operating temp: 200 - 500°C (Very high).
Others	SMM thin film: NiTi, SMP and etc.	This technology is based on smart materials applied to a thin film to produce SME for MEMS applications <u>E.g. NiTi-based:</u> Frequency: <100 Hz (Med) Strain: max. 10% (High), Typically: 7%. Stress: up to 500 MPa (High), Recommended: 100-350MPa. Max. operating temp: ca. 100°C (Low).

Tab. 1-1 Materiali che manifestano l'effetto a memoria di forma [1].

Numerosi sono a oggi gli studi e le ricerche che hanno riguardato questi materiali, ma molte conoscenze devono essere ancora approfondite e perfezionate. Sicuramente è necessario sviluppare nuovi modelli costitutivi che siano in grado di rappresentare efficacemente il comportamento di ogni materiale *SMART*. Ciò è indispensabile nell'ambito delle simulazioni agli elementi finiti (*finite element analysis*, FEA) dove è necessario avere a disposizione dei modelli adeguati, per cogliere tutti gli aspetti caratteristici e critici del materiale in esame. Oltre alla teoria e ai dati forniti dalle prove sperimentali quindi, questi sono strumenti indispensabili per velocizzare e ottimizzare il processo di sviluppo, soprattutto nelle fasi preliminari e di validazione di un progetto.

A causa del recente sviluppo di questi materiali e della grande varietà che li contraddistingue, la loro classificazione non è ancora precisa e uniformemente accettata, comportando alcune difficoltà nell'individuazione delle varie categorie. Nel presente lavoro di tesi si vuole proporre una panoramica sugli *SMART materials*, focalizzando l'attenzione su quelli di particolare interesse per le applicazioni aerospaziali.

2. LEGHE A MEMORIA DI FORMA

Nel presente lavoro si porrà l'attenzione sulle SMAs a base di NiTi [1-14], ma verranno anche presentate altre categorie di leghe a memoria di forma, quali:

- leghe a memoria di forma ad elevate temperature (*high temperature shape memory alloys*, HTSMAs);
- leghe magnetiche a memoria di forma (*magnetic shape memory alloys*, MSMAs).

Dopo una breve introduzione storica, saranno presentate le proprietà, le maggiori applicazioni e i metodi di modellazione.

2.1. Storia dello sviluppo delle SMAs

Le leghe a memoria di forma (*shape memory alloys*, SMAs) furono scoperte nel 1932 da un fisico svedese, Arne Ölander [3], che dimostrò che le leghe oro-cadmio (Au-Cd) potevano essere deformate plasticamente quando fredde, e ritornare alla configurazione iniziale se riscaldate. Nel 1938, Greninger e Mooradian [4] osservarono per primi l'effetto a memoria di forma nelle leghe rame-zinco (Cu-Zn) e rame-stagno (Cu-Sn). Il termine "*shape memory*" fu descritto per la prima volta da Vernon [5] nel 1941, riferendosi ad un materiale polimerico ad uso dentistico. Negli anni successivi s'intensificarono gli studi riguardanti le trasformazioni di fase di queste particolari leghe e tra questi si ricordano quelli condotti da Kurdjumov e Khandros [6], e Chang e Read [7]. Effetti simili si riscontrarono, negli anni '50, anche per le leghe indio-titanio (In-Ti) e rame-alluminio-nichel (Cu-Al-Ni). Tutte queste ricerche attrassero l'interesse di molti studiosi, ma non furono mai applicate nell'ambito industriale a causa degli elevati costi dei materiali costituenti e dei processi di lavorazione. Sebbene le leghe nichel-titanio (NiTi) furono scoperte nel 1959 da William Buehler [8], l'importanza dei materiali a memoria di forma non venne riconosciuta fino a quando, nel 1962, William Buehler e Frederick Wang [8] non scoprirono l'effetto a memoria di forma (SME) in una lega NiTi. Quest'ultima è più comunemente nota come Nitinol, acronimo derivante dalla sua composizione e dal luogo della scoperta: combinazione di NiTi e *Naval Ordnance Laboratory*. Dagli anni '70 poi, lo sviluppo delle SMAs aumentò notevolmente coprendo molteplici campi: industriale, dei compositi, strutturale, civile, automobilistico, aerospaziale, dei mini-attuatori e dei sistemi micro-elettromeccanici (*micro-electromechanical systems*, MEMS), della robotica, biomedicale e anche della moda. Negli anni '90 fu introdotto nella comunità dei materiali a memoria di forma il termine "tecnologia a memoria di forma" (*shape memory technology*, SMT) e le SMAs continuarono con il loro forte sviluppo (Fig. 2-1 e Fig. 2-2) [1].

Ad oggi, più di 10000 brevetti americani e 20000 su scala mondiale riguardano le leghe a memoria di forma e le loro applicazioni; a confronto, le realizzazioni pratiche sono ridotte a causa della scarsa conoscenza di molti scienziati ed ingegneri rispetto alle limitazioni delle SMAs e al loro corretto utilizzo, che possa garantire stabilità e durata. A fronte di ciò, una ricerca intensa e specializzata deve continuare a svilupparsi con l'obiettivo di aumentare le performance di tali materiali e fornirne un ricco database di informazioni.

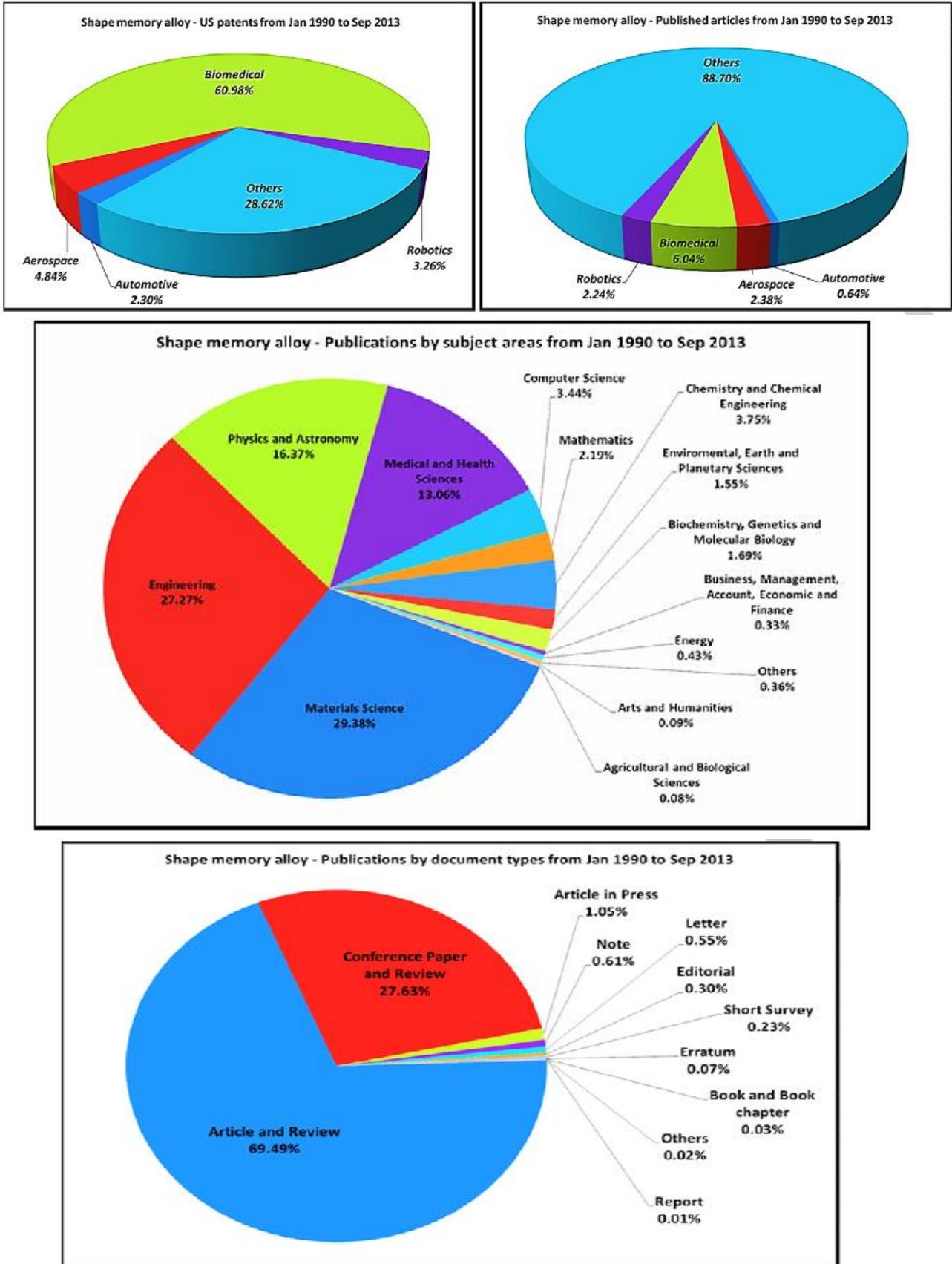


Fig. 2-1 Pubblicazioni sulle SMAs e brevetti US dal gennaio 1990 al giugno 2013 [1].

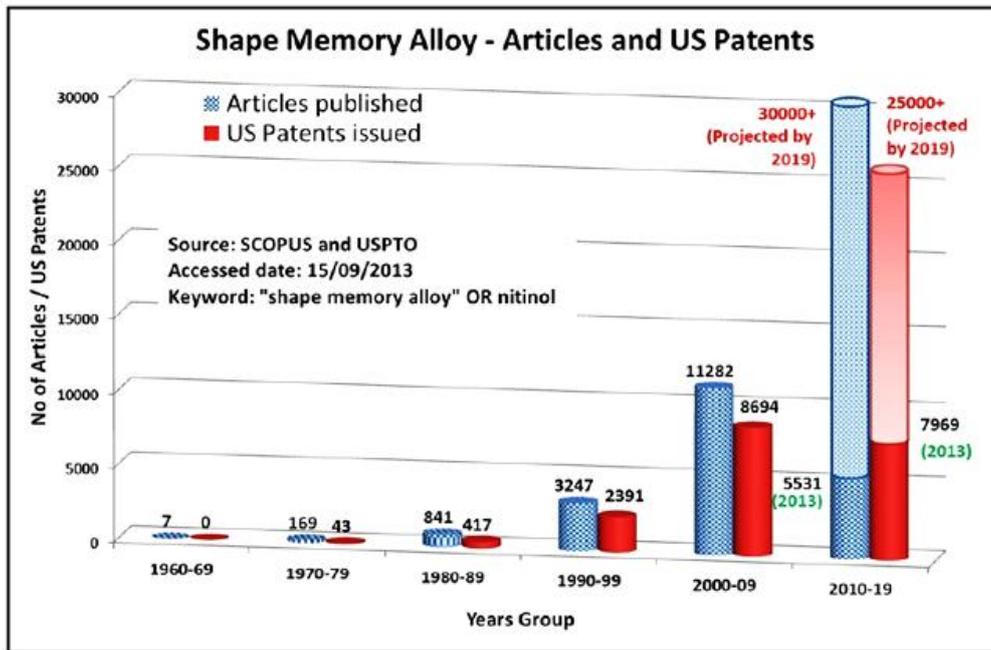


Fig. 2-2 Numero di articoli e brevetti riguardanti le SMAs, raggruppate per anno [1].

Una ricerca della BCC [9] ha rilevato che il mercato globale dei materiali *SMART* era di 19,6 miliardi di dollari nel 2010, stimato di 22 miliardi di dollari per il 2011 e ha previsto che raggiungerà i 40 miliardi di dollari nel 2016, con un tasso di crescita composto (*compound annual growth rate*, CAGR) del 12,8% tra il 2011 e il 2016. Come si può osservare dalla Fig. 2-3, il maggiore segmento di mercato per le SMAs comprende attuatori e motori, con vendite di quasi 10,8 miliardi di dollari (55% del mercato globale) nel 2010 e di 25,4 miliardi di dollari previsti per il 2016 (circa il 64% del mercato globale) con un CAGR del 15,4% tra il 2011 ed il 2016.

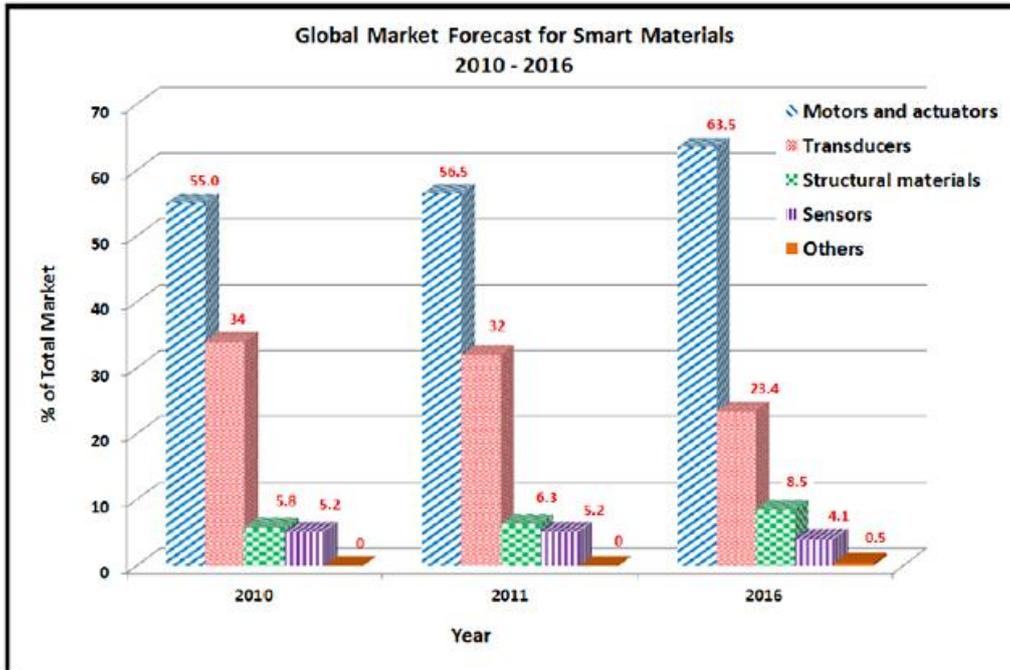


Fig. 2-3 Mercato globale previsto per il periodo 2010-2016 [1].

2.2. Caratteristiche e proprietà

Le leghe a memoria di forma appartengono a un gruppo di leghe metalliche capaci di ritornare alla forma originale quando sottoposte ad un processo di memorizzazione (*trainig*) tra due fasi di trasformazione, che possono dipendere dalla temperatura o dal campo magnetico [10]. Questo fenomeno di trasformazione è noto come effetto a memoria di forma (SME).

Vi sono tre principali tipologie di sistemi SMA [10]:

- a base rame: CuAlNi e CuZnAl;
- a base nichel titanio: NiTi;
- a base ferro: FeMnSi, FeNiC e FeNiCoTi.

Le prime due sono quelle più adatte alle applicazioni ingegneristiche, mentre l'ultima viene impiegata meno frequentemente. Nel seguito si tratteranno le varie categorie in modo più approfondito.

La caratteristica fondamentale che distingue questo genere di materiali dai comuni metalli è la capacità di cambiare fase per effetto della temperatura con annessa capacità di recuperare la forma originale.

Le SMAs possono esistere in due differenti fasi (austenite e martensite), con tre diverse strutture cristalline (martensite *twinned*, martensite *detwinned* e austenite) e sei possibili trasformazioni (Fig. 2-4).

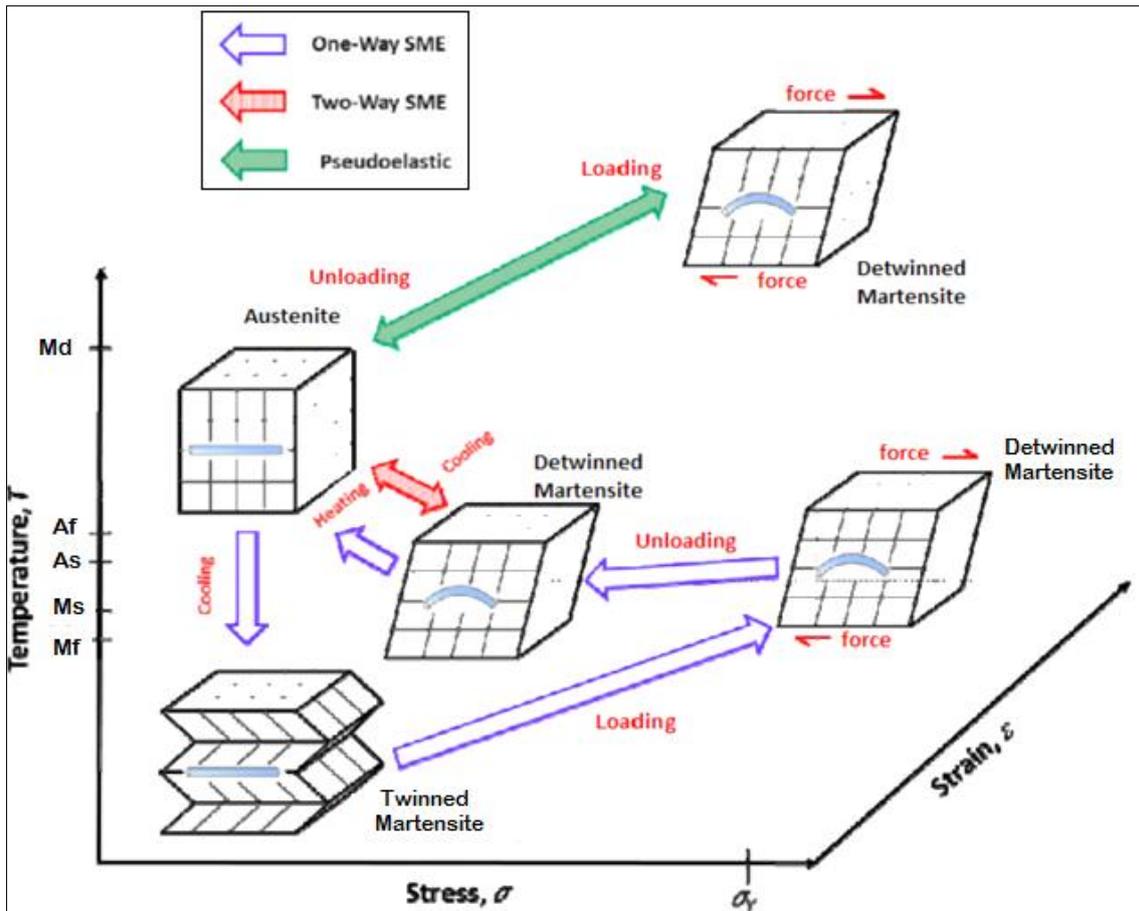


Fig. 2-4 Fasi e strutture cristalline delle SMAs [1].

Prendendo come riferimento il Nitinol, si vanno ad analizzare le caratteristiche di entrambe le fasi.

L'austenite è lo stato stabile ad alta temperatura ed è caratterizzata da una struttura cubica a corpo centrato B2 ad elevata simmetria e modulo elastico (Fig. 2-5 (a)); la martensite è il corrispondente stato presente alle basse temperature, con struttura monoclina B19' (Fig. 2-5 (b)). Poiché quest'ultima configurazione presenta minor simmetria, per essa possono essere presenti diverse orientazioni stabili dei cristalli, dette varianti (ventiquattro in totale), che si possono presentare tutte indistintamente in uno stato privo di sforzo; questa condizione è chiamata di martensite *twinned* poiché orientazioni dello stesso tipo sono accoppiate tra loro. Nel caso in cui sia invece presente uno stato di tensione, solo alcune delle varianti sono dominanti, a seconda della tipologia di sollecitazione applicata; in tal caso si parla di martensite *detwinned* o martensite indotta da sforzo (*stress induced martensite, SIM*). In alcune leghe arricchite al nichel, a seguito di alcuni trattamenti termici, può generarsi una terza fase, detta fase-R con orientazione cristallina romboedrica (Fig. 2-5 (c)) la quale risulta in competizione con lo stato martensitico.

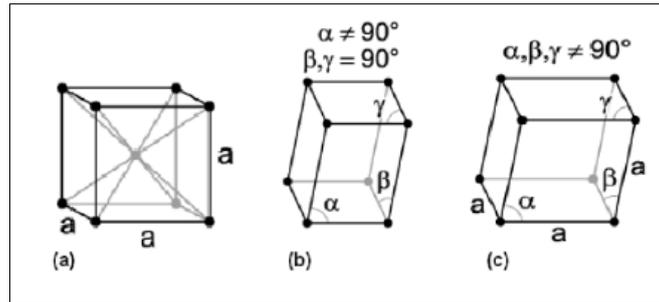


Fig. 2-5 (a) Struttura cubica a corpo centrato B2. (b) Struttura monoclina B19'. (c) Struttura romboedrica R [10].

Per la caratterizzazione del fenomeno a memoria di forma, si definiscono quattro temperature caratteristiche:

- *austenite-start-temperature*, A_s : temperatura alla quale inizia la trasformazione da martensite ad austenite;
- *austenite-finish-temperature*, A_f : temperatura alla quale termina la trasformazione martensite-austenite;
- *martensite-start-temperature*, M_s : temperatura alla quale ha inizio la trasformazione da martensite ad austenite;
- *martensite-finish-temperature*, M_f : temperatura alla quale ha fine la trasformazione da martensite ad austenite.

Quando una SMA viene riscaldata, inizia la trasformazione da martensite ad austenite. Una volta superata la A_s , la lega inizia a contrarsi (con un recupero di forma fino al 5-8%) e avviene la trasformazione nella struttura austenitica, recuperando la forma originale. Questa trasformazione è possibile anche nel caso in cui si applichino dei carichi elevati, causando un'elevata densità di energia di attivazione. Durante il processo di raffreddamento, alla M_s , inizia la trasformazione per ritornare alla fase martensitica che si conclude quando viene raggiunta la M_f . La temperatura più alta alla quale la martensite non può più essere indotta da stress è detta M_d , e sopra di essa la SMA viene deformata in modo permanente come un tradizionale materiale metallico.

A titolo di esempio, considerando ancora il Nitinol, si osservi la Fig. 2-6 dove viene presentato uno schema che chiarisce la dinamica delle fasi di trasformazione. La trasformazione diretta, tra austenite e martensite, può avvenire sia per raffreddamento sia per l'applicazione di uno sforzo; invece il fenomeno del *detwinning* è unicamente dipendente dal carico applicato. La trasformazione inversa (da martensite *detwinned* ad austenite) è invece possibile solamente per innalzamento della temperatura.

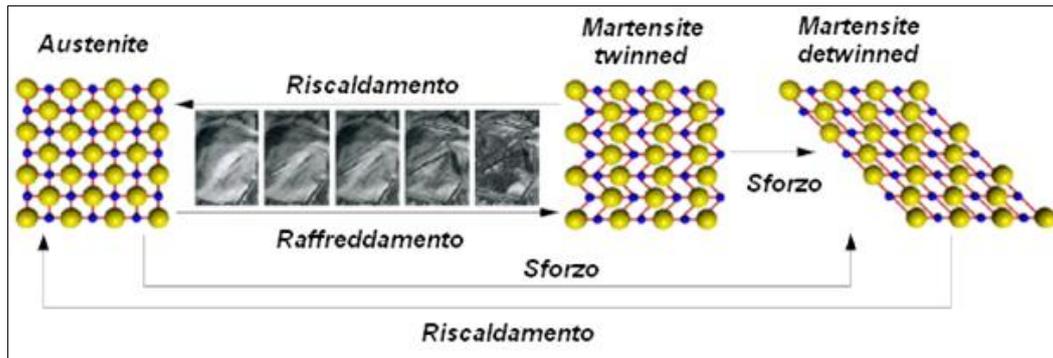


Fig. 2-6 Schema di trasformazione del Nitinol [10].

I citati fenomeni di variazione di forma sono conosciuti come effetto a memoria di forma (SME) e pseudoelasticità (o superelasticità) e possono essere classificati in tre caratteristiche di memoria di forma:

- effetto a memoria di forma ad una via (*one-way shape memory effect*, OWSME);
- effetto a memoria di forma a due vie (*two-way shape memory effect*, TWSME) o reversibile;
- pseudoelasticità (*pseudoelasticity*, PE) o superelasticità (*superelasticity*, SE).

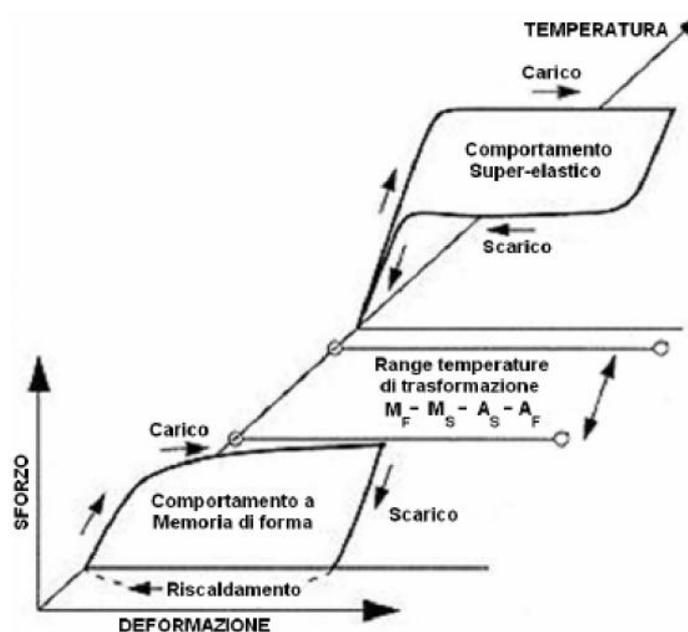


Fig. 2-7 Comportamento a memoria di forma e superelastico in funzione della temperatura [10].

Le leghe a memoria di forma a una via mantengono unicamente uno stato deformato dopo la rimozione di una forza esterna, e recuperano la loro forma originale dopo il riscaldamento; nelle Fig. 2-8 e Fig. 2-9 è possibile appunto notare come, a seguito di una deformazione meccanica imposta a bassa temperatura (che porta la lega nella fase martensite *detwinned*), un successivo riscaldamento riporta il materiale nella sua forma originaria austenitica.



Fig. 2-8 . Effetto a memoria di forma ad una via in funzione della temperatura [10].

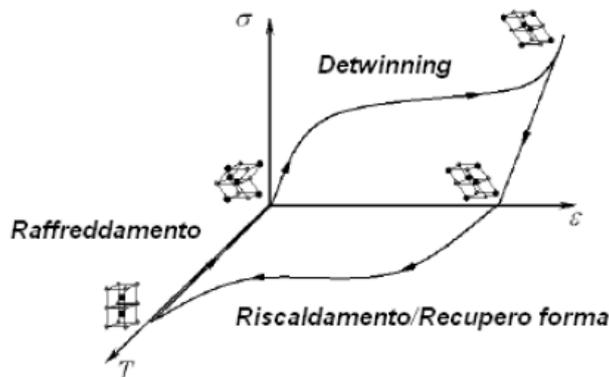


Fig. 2-9 Effetto a memoria di forma a una via: percorso di carico-scarico [10].

Se una lega manifesta effetto a memoria di forma a due vie, la forma viene ricordata sia alle basse che alle alte temperature (Fig. 2-10). La forma che il materiale deve assumere nella fase austenitica è indotta tramite un processo termico, mentre quella che deve essere ricordata in fase martensitica viene impressa tramite un ciclo termomeccanico denominato *training*.

Tuttavia, in ambito commerciale queste SMAs vengono impiegate in minor misura rispetto a quelle ad una via, in quanto richiedono uno specifico *training* e dimostrano una minore deformazione di recupero (la metà circa), che inoltre risulta peggiorare velocemente specialmente alle elevate temperature.

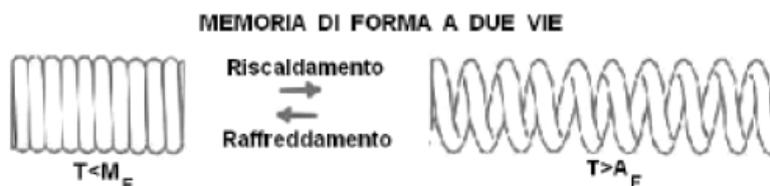


Fig. 2-10 Memoria di forma a due vie in funzione della temperatura [13].

Oltre ai noti effetti a memoria di forma appena citati, le SMAs presentano anche l'effetto superelastico che si riferisce alla capacità di recuperare, senza effetti pseudoplastici, la deformazione imposta una volta rimosso il carico applicato. Tale comportamento è associato a una trasformazione indotta da tensioni (*stress-induced*) e si manifesta unicamente in quelle leghe con temperatura massima M_d maggiore della temperatura A_f . Partendo da una temperatura maggiore di A_f e applicando uno sforzo si ha il passaggio alla fase martensitica. In questa condizione, al cessare del carico, la fase stabile è quella austenitica e di conseguenza la lega torna alla forma iniziale.

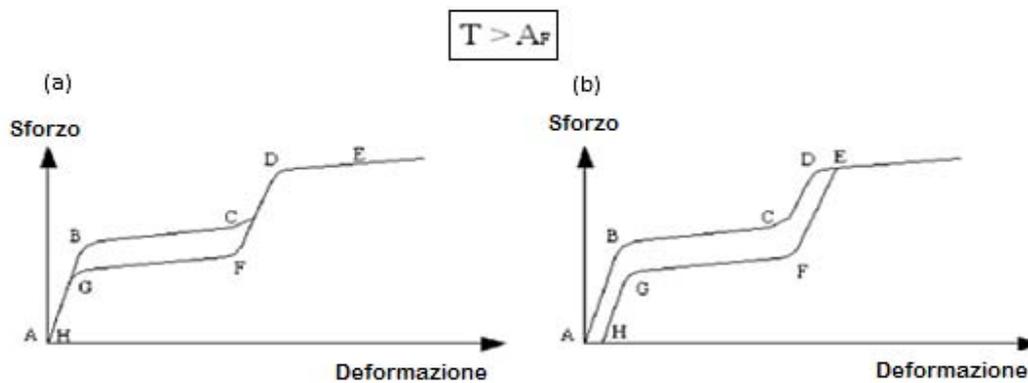


Fig. 2-11 Comportamento superelastico: (a) recupero totale di forma , (b) recupero della forma a meno della zona plasticizzata AH [10].

Un aspetto importante per le SMAs è l'isteresi, che rappresenta una misura della differenza nelle temperature di transizione tra riscaldamento e raffreddamento ($\Delta T = A_f - M_s$); essa è generalmente definita tra le temperature alle quali il materiale è trasformato al 50% in austenite per il riscaldamento e al 50% in martensite per il raffreddamento. L'isteresi diventa un parametro da tenere in considerazione per la scelta del materiale in fase di progettazione; per un'applicazione con un'attuazione veloce (ad esempio MEMSs) si sceglierà una lega con isteresi ridotta, mentre per un dispositivo che deve mantenere la forma in un ampio intervallo di temperature (ad esempio strutture *deployable*) se ne richiederà uno con un'isteresi rilevante.

Bisogna sottolineare come le proprietà dipendano fortemente dalla composizione chimica e dai trattamenti subiti in fase di lavorazione; a titolo di esempio si riportano in Tab. 2-1 i valori assunti dalla temperatura di inizio martensite, M_s , al variare della composizione.

Contenuto (in %)				M_s (°C)
Cu	Zn	Ni	Si	
58	40	2		-169
59.5	40	0.5		-128
60.5	39.5			-126
61.1	38.9			- 50
63.5	35		1.5	- 18

Tab. 2-1 Valori di M_s al variare della composizione.

Riferendosi nuovamente al Nitinol e osservando la Tab. 2-2, bisogna tener conto che le proprietà di questi materiali (modulo di Young, resistività elettrica, conducibilità termica e coefficiente di espansione termica) variano anche a seconda che essi si trovino in una o nell'altra fase.

Property	Symbol	Units	Value	
			Martensite	Austenite
Corrosion Resistance	-	-	Similar to 300 series SS or Ti-alloy	
Density	ρ_D	kg/m ³	6450 ~ 6500	
Electrical Resistivity (approx.)	ρ_R	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	76 ~ 80	82 ~ 100
Specific Heat Capacity	c	J/kg.K	836.8	836.8
Thermal Conductivity	k	W/m.K	8.6 ~ 10	18
Thermal Expansion Coefficient	α	m/m.K ⁻¹	6.6×10^{-6}	11.0×10^{-6}
Ultimate Tensile Strength	σ_{UTS}	MPa	895 (Fully annealed) / 1900 (Hardened)	
Young's Modulus (approx.)	E	GPa	28 ~ 41	75 ~ 83
Yield Strength	σ_Y	MPa	70 ~ 140	195 ~ 690
Poisson's Ratio	ν	-	0.33	
Magnetic Susceptibility	χ	$\mu\text{emu.g}$	2.5	3.8

Tab. 2-2 Proprietà fisiche di una lega commerciale NiTi [1].

In Fig. 2-12 è possibile avere un quadro generale circa il comportamento meccanico di una lega a memoria di forma; in particolare, la coordinata riferita alla temperatura fa da discriminante tra le due fasi. La fase martensitica a bassa temperatura presenta un primo tratto elastico lineare (martensite *twinned*) seguito da un tratto pseudoplastico nel quale avviene la riorientazione dei cristalli con conseguente deformazione. Terminata questa nuova struttura, essa si comporta come un normale metallo presentando una prima zona elastica, seguita da un tratto plastico che risulta irreversibile. La configurazione austenitica, raggiungibile per effetto di un incremento di temperatura, è caratterizzata da una curva elastoplastica in cui sia il modulo elastico che il valore di sforzo di snervamento risultano assai più elevati del caso precedente. In questo passaggio, l'aumento della resistenza meccanica favorisce la comparsa di sforzi di recupero nel caso in cui la lega sia vincolata. In conclusione, si può affermare che la struttura austenitica è la più resistente e con un maggior modulo elastico, mentre la martensite risulta più tenera e malleabile.

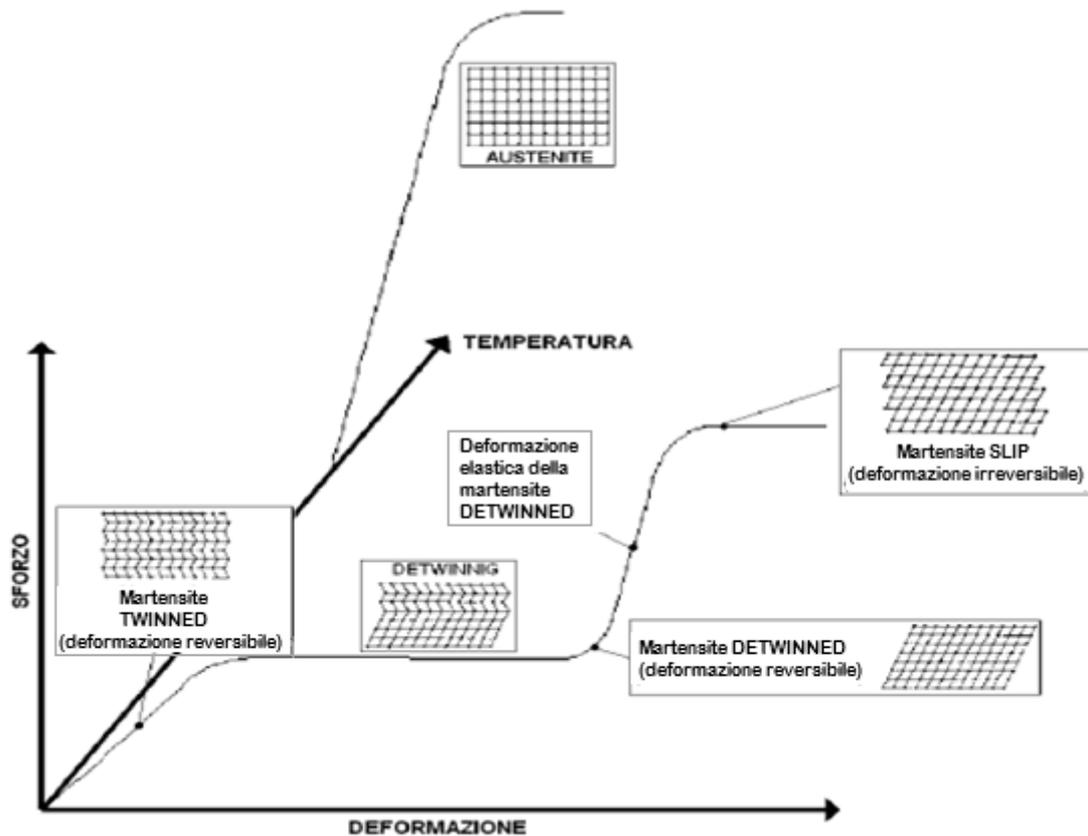


Fig. 2-12 Schema comportamentale di una SMA [10].

Si vuole fare ora un confronto tra il comportamento dell'acciaio e quello del Nitinol per rimarcare le differenze fra le due tipologie di materiali. In Fig. 2-13 (a), l'acciaio presenta un tratto elastico ed uno plastico; scaricando il materiale, nel tratto elastico si ripercorre la medesima curva di carico. Per la SMA invece, sopra la temperatura di trasformazione, viene ripercorso un tratto della curva di carico e alla fine della rimozione non vi sono deformazioni residue. Nel caso di Fig. 2-13 (b) ci si trova sotto la temperatura di trasformazione e si nota una deformazione plastica al termine dello scarico. Se da questa condizione si riscalda il pezzo, la deformazione residua può essere recuperata (Fig. 2-13 (c)).

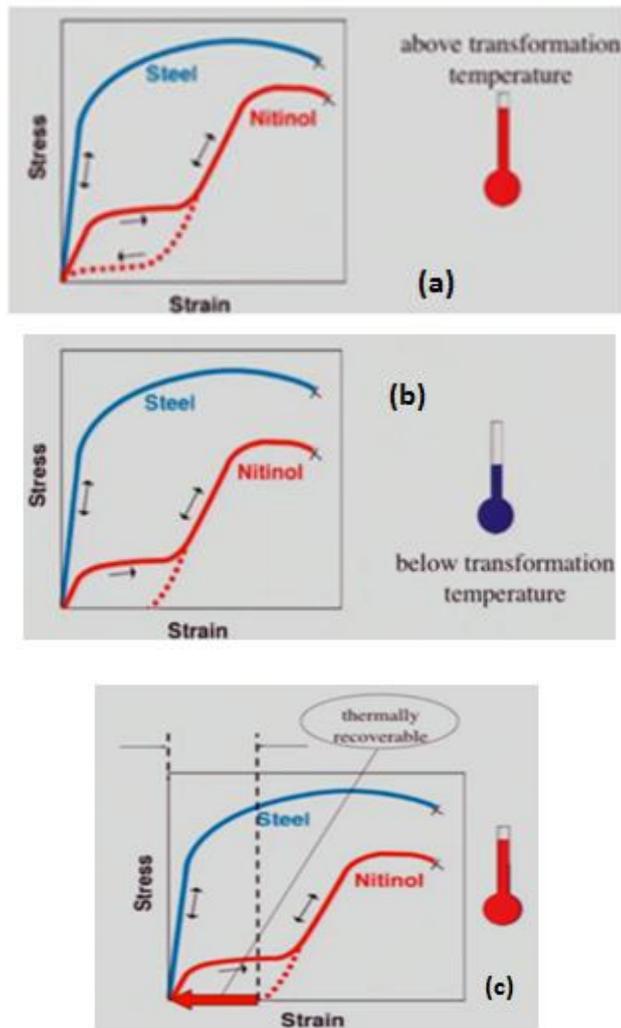


Fig. 2-13 Curve stress-strain per acciaio e SMA, per differenti condizioni di temperatura.

In aggiunta ai due fenomeni già descritti, è stato anche osservato l'effetto a memoria di temperatura (*temperature memory effect*, TME) [2]. Esso si riferisce a un fenomeno in cui, in una trasformazione incompleta, la precedente temperatura di interruzione (subito dopo il riscaldamento) può essere memorizzata e "ripresentata" nel successivo processo di riscaldamento. Come mostrato in Fig. 2-14, che rappresenta i risultati tipici di un calorimetro differenziale a scansione DSC (*differential scanning calorimeter*), una lega NiTi viene scaldata fino a circa 50 °C, temperatura che si trova nel mezzo della trasformazione, risultando una miscela di austenite e martensite. In seguito il campione viene raffreddato assumendo una struttura completamente martensitica. Nello step successivo, il pezzo viene gradualmente riscaldato. Dal grafico si osserva che invece di un unico avvallamento come in un ciclo completo DSC, ce ne sono due, significando che la trasformazione contraria è virtualmente suddivisa in due step.

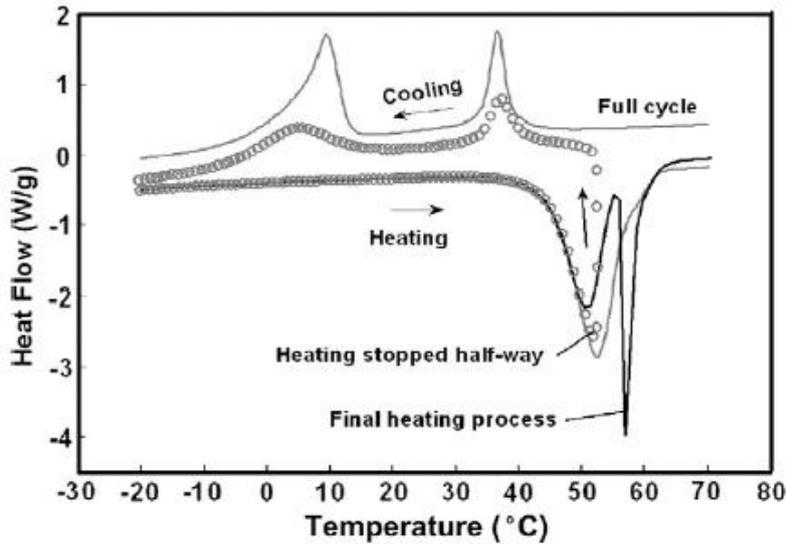


Fig. 2-14 Effetto a memoria di temperatura in un ciclo DSC.

Il discorso vale, anche se vengono effettuati riscaldamenti intermedi successivi, con la conseguente formazione di un numero di picchi equivalente al numero di riscaldamenti nel ciclo completo di DSC. È stato dimostrato che questo effetto è dovuto alla formazione, durante il riscaldamento, di nuove varianti di martensite (che si formano dopo il raffreddamento) al posto della crescita di quelle già presenti. Nonostante questo sia un fenomeno generale che si può riscontrare in diverse leghe a memoria di forma, l'interesse è per ora limitato alla comunità accademica. La reale applicazione di questo effetto non è ancora chiara dal momento che non vi sono variazioni di forma associate a esso.

Si vuole ora porre l'attenzione sull'influenza di uno stato di pre-deformazione su un campione di SMA. È stato osservato che ciò aumenta notevolmente la temperatura di transizione per il recupero di forma e che è dovuto alla richiesta di un'energia motrice aggiuntiva, a una maggior dissipazione di energia o a un meccanismo interno. Pre-deformando una striscia di SMA a un dato livello, viene introdotto un gradiente di temperatura di transizione. Di conseguenza, dopo il riscaldamento, la parte meno pre-deformata recupererà la forma prima e la parte più pre-deformata la recupererà solo alle alte temperature.

Sapendo che le applicazioni che riguardano le leghe a memoria di forma sono solitamente sottoposte a numerosi cicli di funzionamento, non si può non considerare il loro comportamento a fatica [11]. Esso dipende dalla lavorazione subita dalla lega (fabbricazione, trattamenti termici, ecc.), dalle condizioni di carico (deformazioni e tensioni imposte, variazioni di temperatura, ambiente operativo, ecc.), dalle imperfezioni microstrutturali (dimensioni dei precipitati) e dall'orientazione cristallografica. È noto come un carico ripetuto ciclicamente lungo un percorso termomeccanico causa dei graduali cambiamenti a livello microstrutturale, che a loro volta portano ad un peggioramento del comportamento delle SMA. Ciò comporta cicli di fatica bassi, al contrario di quelli elevati comunemente osservati nei percorsi di carico in regime elastico.

Il comportamento a fatica può essere indotto sia meccanicamente che termicamente [11].

Si sottolinea inoltre, come la vita a fatica dipenda dal livello di trasformazione raggiunto all'interno della lega: in condizioni di parziale trasformazione, si manifesta una maggiore vita a fatica.

Bisogna rilevare che, nonostante siano state condotte molte prove in differenti condizioni operative, non è possibile fornire un'accurata stima della vita a fatica di una lega a memoria di forma; ogni campione, con le sue proprietà e condizioni operative deve essere appositamente testato per ottenere una descrizione completa del suo comportamento a fatica.

Un'altra peculiarità delle SMAs è la loro capacità di smorzamento. I meccanismi che generano l'elevata capacità di smorzamento sono raggruppabili in tre principali tipologie:

- smorzamento per attrito interno nella fase martensitica: è sostanzialmente riconducibile a movimenti di interfacce nella struttura del materiale (tra varianti martensitiche e *twin boundaries*);
- smorzamento per attrito interno nel corso della trasformazione: un massimo nei fenomeni di attrito interno si verifica nel corso della trasformazione, sia in fase di aumento che di diminuzione della temperatura;
- smorzamento per attrito interno nella fase austenitica: la fase austenitica presenta, di per sé, limitate capacità di smorzamento, tuttavia un interessante comportamento agli effetti dello smorzamento si manifesta quando interviene il fenomeno di pseudoelasticità.

Le buone proprietà di smorzamento dimostrate dalle SMAs, associate alle buone caratteristiche di resistenza meccanica, hanno stimolato la ricerca di applicazioni con differenti finalità:

- riduzione del rumore;
- smorzamento di vibrazioni;
- aumento della resistenza ai carichi impulsivi.

I settori di applicazione comprendono:

- utensili;
- attrezzi sportivi;
- componenti per sistemi aerospaziali;
- protezioni antisismiche;
- protezioni balistiche.

Nei paragrafi che si riferiscono alle applicazioni si tratterà i vari casi in modo più approfondito.

Infine si riassumono le proprietà funzionali delle leghe a memoria di forma che sono di particolare interesse applicativo:

- effetto a memoria di forma a una via;
- effetto a memoria di forma a due vie;
- generazione di forza (impedendo il recupero di forma);
- effetto superelastico;
- capacità di smorzamento.

2.3. Il Nitinol e le altre leghe

Come già accennato, la lega a memoria di forma più diffusa e conosciuta è il Nitinol, a base nichel e titanio (solitamente 55% Ni e 45% Ti).

In Fig. 2-15 si riporta il diagramma di stato del Nitinol, mentre nella Tab. 2-3 sono elencate le sue proprietà; si prendano come indicativi i valori riportati, visto che essi dipendono molto dalla composizione e dai trattamenti subiti dal materiale.

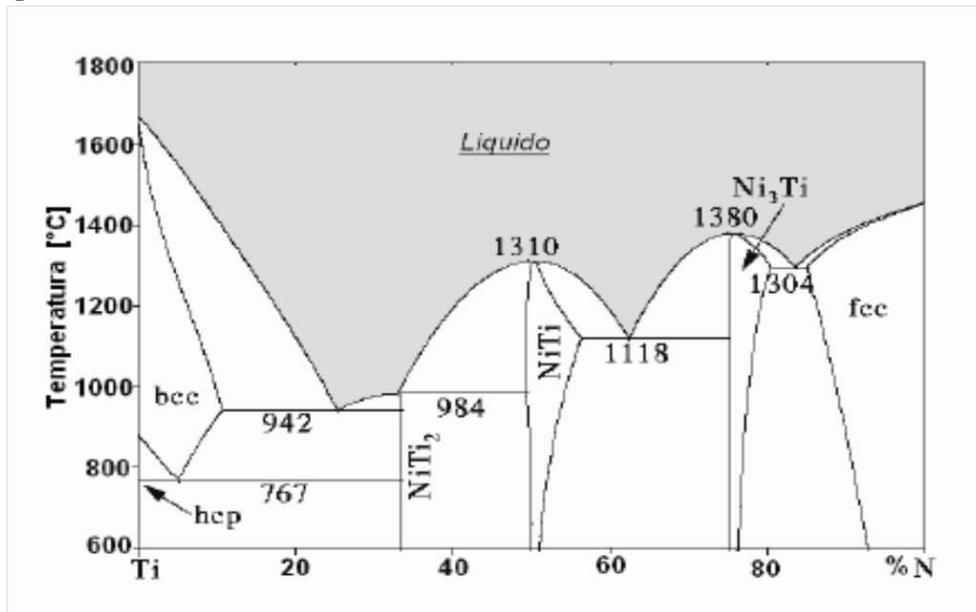


Fig. 2-15 Diagramma di stato del Nitinol [13].

Property	NiTi SMA	
	Austenite	Martensite
Physical Properties		
Melting Point	1240-1310°C	
Density	6.45 g/cm ³	
Thermal Coefficient	0.28 W/cm ² °C	0.14 W/cm ² °C
Thermal Expansion Coeff.	11.3 x 10 ⁻⁶ /°C	6.6 x 10 ⁻⁶ /°C
Mechanical Properties		
Recoverable Elongation	up to 8%	
Young's Modulus	30-83 GPa	21-41 GPa
Yield Strength	195-690 MPa	70-140 MPa
Ultimate Tensile Strength	895-1900 MPa	
Elongation at Failure	5-50% (typically 25%)	
Poisson's Ratio	0.33	
Hot Workability	Quite good	
Cold Workability	Difficult due to rapid work hardening	
Machinability	Difficult, abrasive techniques preferred	
Hardness	30-60 Rc	
Weldability	Quite Good	
Electrical Properties		
Resistivity	100 μΩcm	80 μΩcm
Chemical Properties		
Corrosion Performance	Excellent (similar to stainless steel)	

Tab. 2-3 Proprietà del Nitinol.

Il Nitinol ha buone proprietà elettriche e ciò lo rende particolarmente adatto al riscaldamento per effetto Joule (aumento di temperatura causato dal passaggio di corrente elettrica). Inoltre, mostrando anche un notevole sforzo di recupero in fase di contrazione (700-800 [MPa]) è un candidato ideale come attuatore. Mostra un forte effetto a memoria di forma, anche a due vie, e un buon comportamento pseudoelastico sotto le giuste condizioni [2]. Altre proprietà importanti sono la resistenza alla corrosione e la biocompatibilità, che lo rendono idoneo alle applicazioni biomediche.

Nelle tradizionali leghe Nitinol si possono trovare degli elementi extra che sono o volontariamente aggiunti (additivi) o indesiderati (impurità) [2]. Come anche per i materiali tradizionali, questi costituenti hanno degli effetti sulle proprietà e sul comportamento del Nitinol.

Sostituzioni con ferro (Fe) abbassano la temperatura di trasformazione.

Il rame (Cu) non modifica le proprietà di memoria di forma, ma causa una riduzione nell'isteresi ($A_s - M_s$) e influisce anche sulla resistenza a trazione aumentandola; inoltre diminuisce l'isteresi pseudoelastica ed ha effetti sulle trasformazioni di fase. La percentuale di Cu è solitamente compresa tra il 5% e il 10%; maggiori quantità infragiliscono il materiale.

Il niobio (Nb) ha la capacità di allargare l'isteresi termica e ciò favorisce la deformazione del materiale alle basse temperature. In queste leghe, la deformazione è suddivisa in una parte

recuperabile e una non recuperabile; questo fenomeno spiega perché non vi sia un completo recupero della forma, con presenza di deformazioni residue.

L'introduzione di carbonio (C) ha effetti sulla temperatura d'inizio martensite M_s . Si viene a formare il precipitato di TiC che causa una lieve degradazione delle proprietà a trazione, ma incrementa le proprietà di frattura comportando un aumento nella tensione e nella deformazione di frattura.

Un eccesso nell'aggiunta di Ni (fino all'1%) abbatta fortemente la temperatura di trasformazione e aumenta il limite di snervamento dell'austenite.

L'ossigeno (O), quando presente in quantità maggiori dello 0.61%, può causare una fase intermedia nel Nitinol.

L'aggiunta di azoto (N) aumenta la resistenza alla corrosione del NiTi, ma non intacca il comportamento a memoria di forma.

Ad oggi, tutta una serie di nuove leghe è stata sviluppata per soddisfare le sempre maggiori richieste provenienti dalla comunità ingegneristica.

Oltre alle leghe NiTi, si menzionano quelle a base rame [11]. Esse presentano buona conduttività termica ed elettrica, proponendosi come ottime alternative alle leghe NiTi, anche a fronte del loro minor costo. Generalmente esse mostrano un'isteresi minore rispetto alle NiTi, con temperature di trasformazione fortemente dipendenti dalla composizione; per questo motivo, particolare attenzione deve essere posta nel processo di fabbricazione. I sistemi più diffusi sono quelli Cu-Zn e Cu-Al.

Le leghe Cu-Zn sono molto duttili e hanno una buona resistenza alla frattura intergranulare. L'aggiunta di alluminio (Cu-Zn-Al) aumenta le temperature di trasformazione, ma il comportamento meccanico è limitato ad un livello di tensione di 200 [MPa]; in questo range operativo di tensioni, questi materiali hanno un perfetto comportamento sia a memoria di forma che di superelasticità.

Un'altra famiglia di leghe a base rame è quella Cu-Al-Ni [11]; anche in questo caso le temperature di trasformazione variano a seconda della concentrazione di alluminio e nichel. Presentando delle difficoltà nella produzione, di solito si inseriscono manganese per aumentare la duttilità e titanio per affinare il grano. La principale limitazione per questi materiali è rappresentata dalla scarsa duttilità dovuta al *cracking* intergranulare, che influenza anche il livello massimo di tensione, limitandolo a circa 280 [MPa].

In Tab. 2-4 si confrontano le proprietà delle leghe NiTi, CuZnAl e CuAlNi.

Proprietà	Ni-Ti	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Massima temperatura di recupero di forma	100 °C	120 °C	200 °C
Massima deformazione recuperabile	8 %	6%	5%
Isteresi	12-50 °C	10-25 °C	15-20 °C
Tensione di snervamento in fase austenitica	415 MPa (41.5 Kg/mm ²)	350 MPa (35 Kg/mm ²)	400 MPa (40 Kg/mm ²)
Tensione di snervamento in fase martensitica	70 MPa (7 Kg/mm ²)	80 MPa (8 Kg/mm ²)	130 MPa (13 Kg/mm ²)
Tensione a rottura	700 MPa (70 Kg/mm ²)	600 MPa (60 Kg/mm ²)	500-800 MPa (50-80 Kg/mm ²)
Densità (g/cm ³)	6.5	7.6-8.0	7.2
Resistività (micro-ohm-cm)	80-90	8.5-9.7	11-13
Capacità termica (J/Kg °K)	837	400	373-574
Conducibilità termica (J/m*sec*°K)	18	120	30-43

Tab. 2-4 Proprietà di varie tipologie di SMA.

Negli anni sono state sviluppate anche leghe Cu-Al-Be [11].

Si fa un breve accenno alle leghe a base ferro: Fe-Ni-Co-Ti e Fe-Mn-Si sono le più diffuse [11]. Questi materiali, dopo opportuni trattamenti termici, dimostrano l'effetto a memoria di forma. Il silicio viene aggiunto per migliorare questo effetto e aumentare la tensione critica per scorrimento nell'austenite.

Ad ogni modo, le leghe a memoria di forma a base NiTi rimangono le più diffuse e conosciute.

2.4. Progettazione con SMAs: vantaggi e sfide

Alcune recenti ricerche hanno dimostrato come gli attuatori in SMA siano un'ottima tecnologia alternativa a quelle convenzionali (motori elettrici, pneumatici e idraulici); ciò è dovuto alle loro caratteristiche uniche e alla capacità che hanno di reagire direttamente agli stimoli presenti nell'ambiente in cui si trovano in esercizio. I vantaggi sono in termini di una riduzione della complessità meccanica e delle dimensioni, con conseguente calo dei costi.

Altra vantaggiose caratteristiche delle SMAs sono rappresentate dalla biocompatibilità, dalla resistenza al logoramento e dal comportamento tribologico.

L'effetto a memoria di forma, soprattutto quando si applicano tensioni, viene sfruttato per l'attuazione, mentre l'effetto pseudoelastico offre due vantaggi: una non linearità che permette l'isolamento dalle vibrazioni e grandi deformazioni recuperabili (con associata isteresi) che permettono la dissipazione di energia [12]. In Tab. 2-5 sono riportate le proprietà delle SMAs e i loro effetti; si sottolinea che, mentre alcuni aspetti sono chiaramente positivi o negativi, altri potranno dipendere dai dettagli della particolare utilizzazione.

Un altro fattore importante è la densità di energia: le leghe a memoria di forma presentano un elevato valore di tale parametro e ciò dà la possibilità di ottenere un design molto compatto.

SMA traits	Consequences
Shape memory effect	Material can be used as an actuator, providing force during shape recovery
Pseudoelasticity	Material can be stressed to provide large, recoverable deformations at relatively constant stress levels
Hysteresis	Allows for dissipation of energy during pseudoelastic response
High actuation stress (400–700 MPa) [18, 74]	Small component cross-sections can provide substantial forces
High actuation strain (8%) [18, 74]	Small component lengths can provide large displacements
High energy density (~1200 J/kg) [69]	Small amount of material required to provide substantial actuation work
Three-dimensional actuation	Polycrystalline SMA components fabricated in a variety of shapes, providing a variety of useful geometric configurations
Actuation frequency	Difficulty of quickly cooling components limits use in high frequency applications
Energy efficiency (10–15%) [69]	Amount of thermal energy required for actuation is much larger than mechanical work output
Transformation-induced plasticity	Plastic accumulation during cyclic response eventually degrades material and leads to failure

Tab. 2-5 Proprietà delle SMAs e loro effetti [12].

Le sfide nella progettazione di applicazioni con SMAs riguardano maggiormente il superamento delle limitazioni di questi materiali, come le modeste deformazioni utilizzabili e le scarse proprietà in termini di frequenza di attivazione (bassa), controllabilità (limitata), accuratezza ed efficienza energetica.

L'ostacolo maggiore è rappresentato dalla bassa frequenza operativa e dalla stretta larghezza di banda; considerando che la capacità termica è relativamente elevata, vi sono delle difficoltà nel trasferimento rapido di calore dentro e soprattutto fuori dall'elemento attivo, comportando notevoli inconvenienti. In diversi studi viene dimostrato come il riscaldamento delle leghe a memoria di forma possa essere realizzato in diversi modi, ad esempio applicando una corrente elettrica (effetto Joule), sempre mantenendo il controllo attento del fenomeno onde evitare danneggiamenti del materiale. Tuttavia, lo svantaggio più grande dato dalla scarsa larghezza di banda è il lento processo di raffreddamento, dove la velocità di rimozione dell'energia termica è vincolata dai meccanismi di conduzione e convezione termica.

L'altra sfida da affrontare riguarda la bassa efficienza energetica. Teoricamente, in diversi studi si legge come essa possa essere del 10-15%, ma nei casi reali può scendere anche sotto l'1%. Anche quest'aspetto si ripercuote sulle scelte di progettazione degli attuatori e limita l'applicazione delle SMAs a quei casi in cui l'efficienza termica non sia un requisito stringente.

Infine, la durabilità e affidabilità delle SMAs sono anche esse due aspetti che richiedono una particolare attenzione in quanto i dispositivi sono solitamente sottoposti ad un elevato numero di cicli operativi. Molti sono i fattori che influenzano queste caratteristiche, tra cui i valori massimi di temperatura, tensione, deformazione e numero di cicli di trasformazione accumulati. Si è notato come gli effetti termici siano molto rilevanti sulla vita a fatica. Anche un aumento delle tensioni e delle deformazioni influisce negativamente su tale parametro.

In generale, si può concludere che per dispositivi che sfruttano le leghe a memoria di forma, bisogna porre particolare attenzione nell'evitare surriscaldamenti, sovratensioni e sovra-deformazioni per non incorrere in diminuzioni della vita a fatica. Per garantire che le applicazioni siano progettate in modo *safely* per un elevato numero di cicli (10^6) prima del raggiungimento della tensione di snervamento è necessario che non vengano surriscaldate e sottoposte ad eccessive deformazioni.

Un continuo lavoro di ricerca ha permesso di ottenere una resistenza a fatica migliore rispetto ai primi materiali sviluppati, garantendo un numero elevato di cicli senza il rischio di danneggiamento. Inoltre vi è tutta una serie di *controller* elettronici (sensori di temperatura, feedback di posizione e resistenza, ecc.) che permettono un controllo accurato della temperatura, delle tensioni e delle deformazioni durante le fasi operative.

Altri metodi per aumentare la vita a fatica delle leghe a memoria di forma riguardano il miglioramento dei materiali, i processi di fabbricazione, i trattamenti termomeccanici e l'ottimizzazione della progettazione meccanica.

In generale, i fattori di progetto più importanti da considerare per le applicazioni delle leghe a memoria di forma si possono riassumere come segue [1]:

- intervallo di temperature operative per gli attuatori: devono essere selezionati i materiali opportuni, come anche le tecniche di trasferimento di calore; la forte dipendenza del comportamento delle SMAs dalla temperatura comporta una particolare attenzione nella progettazione;
- forza richiesta per deformare l'attuatore: devono essere considerate la forma, le dimensioni e le condizioni di carico della lega, in aggiunta alle tecniche di progettazione;
- velocità richiesta dell'attuatore: si devono considerare il tipo di materiale, la forma, le dimensioni e la tecnica di raffreddamento della SMA;
- corsa richiesta: il materiale, la forma, le dimensioni, la configurazione di carico e le tecniche di progetto devono essere prese in considerazione;
- tipologie di sensori e *controller* da incorporare per assicurare una lunga durata e la stabilità (posizione, forza e resistenza);
- durata e affidabilità: si devono considerare il materiale, le dimensioni, la configurazione di carico ed il numero di cicli.

La ricerca inoltre, si propone di trovare delle alternative all'interno del vasto gruppo dei materiali a memoria di forma, quali le MSMAs, HTSMAs, SMPs, SMCs ed i film sottili di SMM o combinazioni di essi (SMc). Nei prossimi capitoli si farà una breve introduzione a queste categorie.

2.5. Altre tipologie di leghe a memoria di forma

Altri materiali sono stati studiati per colmare le limitazioni delle SMAs (elevati costi di fabbricazione, limitata deformazione recuperabile, limitato range delle temperature operative, stretta larghezza di banda e bassa efficienza energetica): leghe a memoria di forma a elevate temperature e leghe a memoria di forma magnetiche.

2.5.1. Leghe a memoria di forma a elevate temperature

Negli ultimi anni la richiesta di materiali che abbiano un buon comportamento meccanico anche alle alte temperature è cresciuta notevolmente, e ciò ha riguardato anche le leghe a memoria di forma. I ricercatori hanno avviato svariati studi a riguardo dell'aggiunta di un terzo elemento alle SMAs tradizionali: Au (oro), Hf (afnio), Pd (palladio), Pt (platino) e Zr (zirconio). Le HTSMAs sono quindi definite come leghe a memoria di forma che operano a temperature superiori a 100 °C e si possono classificare in tre categorie basate sugli intervalli di trasformazione della martensite [13] (Tab. 2-6).

Group	Alloy composition	Transformation temperature range [°C]	Thermal hysteresis [°C]	Strain [%]	Recovery [%]	Comments
100 - 400 °C	Ti-Ni-Pd Ti-Ni-Pt	100 – 530 110 – 1100	20 – 26 31 – 55	2.6 – 5.4 3 - 4	90 ^{PE} - 100 100	High work output, most commercial ready and high materials cost.
	Ni-Ti-Hf Ni-Ti-Zr	100 – 400 100 – 250	60 54	3 1.8	100 100	Reasonable SME, large hysteresis and relatively low materials cost.
	Cu-Al-Ni Cu-Al-Nb	100 – 400	21.5 59 - 170	3 – 5 ^{PE} 5.5 - 7.6	80 – 90 ^{PE} -	Low cost, poor to reasonable SME, and brittle in tension (Cu-Al-Ni).
	Co-Al Co-Ni-Al	100 – 400	121 15.5	2 5 ^{PE}	90 100 ^{PE}	Good workability, large hysteresis and high temperature PE (Co-Ni-Al)
	Ni-Al Ni-Mn Ni-Mn-Ga	100 – 300 100 – 670 100 – 400	- 20 85	- 3.9 10	- 90 70	Low materials cost, low hysteresis and poor tensile ductility.
	Zr-Cu	100 – 600	70	8	44	Good ductility and workability, but poor SME.
	Ti-Nb U-Nb	100 – 200 100 – 200	50 35	2 – 3 7	97 - 100	Good ductility and SME, but suspect to oxidation and contain Uranium (U-Nb).
400 - 700 °C	Ti-Pd Ti-Au	100 – 510 100 - 630	40 35	10 3	88 100	Good ductility (Ti-Pd), but high materials cost (Ti-Pt).
> 700 °C	Ti-Pt-Ir	990 – 1184	66.5	10 ^{PE}	40 ^{PE}	High yield strength.
	Ta-Ru Nb-Ru	900 – 1150 425 – 900	20	4 4.2	50 88	Stable microstructural, but poor oxidation resistance and small hysteresis.

Note: PE = Pseudoelastic

Tab. 2-6 Gruppi di HTSMAs e loro proprietà [1].

Le temperature di trasformazione di questa categoria sono superiori a quelle delle leghe standard e ciò permette il loro impiego a temperature maggiori (soprattutto le leghe NiTiPd e NiTiPt), rendendole molto interessanti dal punto di vista di molte applicazioni (aerospaziali, aeronautiche ed automobilistiche). In Tab. 2-7 si riportano i valori delle temperature di trasformazione e si ricorda come siano fortemente dipendenti dalla storia del materiale e dai trattamenti termici; a fronte di ciò, si prendano i valori come indicativi.

NiTi Based SMAs	M_f	M_s	A_s	A_f
Ti ₅₀ Ni ₅₀	15	55	80	89
Ti _{49.5} Ni _{50.5}	-78	-19	9	53
Ti ₄₉ Ni ₅₁	-153	-114	-89	-40
Ti ₄₉ Ni ₅₁ Cu ₁₀	8	30	35	50
Ti ₅₀ Ni ₄₀ Cu ₁₀	21	41	53	67
Ti ₄₄ Ni ₄₇ Nb ₉	-175	-90	-85	-35
Ti _{42.2} Ni _{49.8} Hf ₈	50	69	111	142
Ti _{40.7} Ni _{49.8} Hf _{9.5}	61	90	118	159
Ti _{40.2} Ni _{49.8} Hf ₁₀	103	128	182	198
Ti _{35.2} Ni _{49.8} Hf ₁₅	95	136	140	210
Ti _{30.2} Ni _{49.8} Hf ₂₀	127	174	200	276
Ti ₄₈ Ni ₄₇ Zr ₅	20	65	75	138
Ti ₄₃ Ni ₄₇ Zr ₁₀	45	100	113	165
Ti ₃₈ Ni ₄₇ Zr ₁₅	100	175	175	230
Ti ₃₃ Ni ₄₇ Zr ₂₀	205	275	265	330
Ti ₅₀ Pd ₅₀	550	563	580	591
Ti ₅₀ Ni ₂₀ Pd ₃₀	208	241	230	241
Ti ₅₀ Ni ₁₀ Pd ₄₀	387	403	419	427
Ti ₅₀ Ni ₅ Pd ₄₅	467	486	503	509
Ti ₅₀ Ni ₄₅ Pt ₅	10	29	36	49
Ti ₅₀ Ni ₄₀ Pt ₁₀	-8	18	-27	36
Ti ₅₀ Ni ₃₀ Pt ₂₀	241	300	263	300
Ti ₅₀ Ni ₂₀ Pt ₃₀	537	619	626	702

Tab. 2-7 Temperature di trasformazione per leghe a base NiTi [11].

Un fattore limitante per questi materiali è l'elevato costo degli elementi ternari che sono aggiunti e ciò riduce il loro impiego nei settori commerciali.

Queste leghe presentano limitate duttilità e resistenza a fatica a temperatura ambiente e quindi la fabbricazione risulta molto costosa, sia nel processo che nel *training*. Si vanno dunque a ricercare degli elementi costitutivi più economici, tra i quali il rame e il cobalto. Ad oggi, solo le leghe Ti-Ni-Pd, Ti-Ni-Pt, Ni-Ti-Hf e Cu-Al-Mn-Ni sono utilizzabili tra i 100 °C ed i 300 °C, mentre le altre richiedono ancora uno studio approfondito per cercare di superare le problematiche che ancora presentano.

2.5.2. Leghe a memoria di forma magnetiche

Queste leghe sono anche conosciute come leghe ferromagnetiche a memoria di forma (*ferromagnetic shape memory alloys*, FSMAs) e si attivano ad alte frequenze (oltre 1 [kHz]) in quanto l'energia di attivazione viene trasmessa attraverso dei campi magnetici e non è ostacolata dal lento meccanismo di trasferimento di calore. Come si può osservare dalla Fig. 2-16, le FSMAs possono raggiungere un livello di deformazione comparabile a quello delle SMAs, come anche per quanto concerne l'energia specifica, che però viene ceduta ad una maggiore frequenza rispetto alle SMAs.

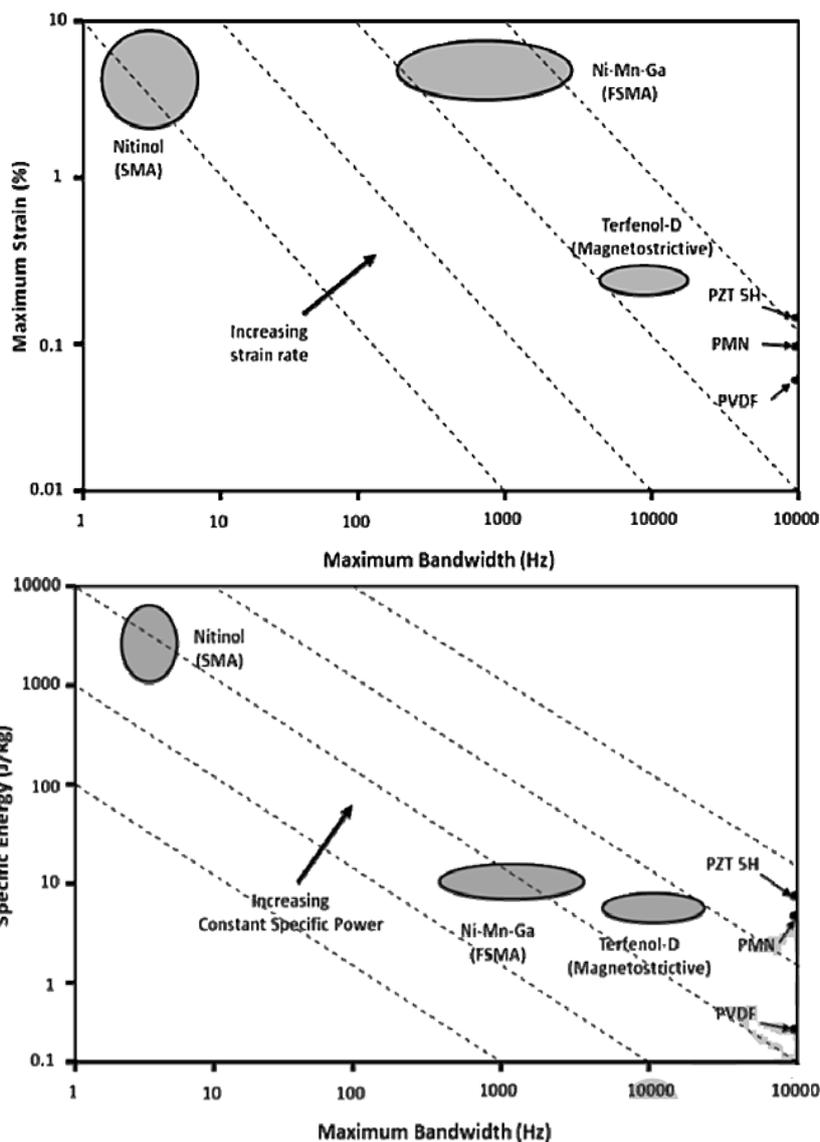


Fig. 2-16 Massima deformazione e massima energia specifica versus massima larghezza di banda per diverse classi di materiali attivi [1].

Di conseguenza, queste leghe possono riempire quel gap tecnologico tra le SMA e i materiali magnetostrittivi, potendo diventare una nicchia per applicazioni come valvole e motori, che richiedono grandi spostamenti a forze moderate.

Le FSMAs sono molto fragili e sono operative solo alle basse temperature, implicando una difficoltà nella loro formatura e fabbricazione. Risultano quindi inadeguate per applicazioni ad elevate temperature e forze.

A questa categoria appartengono le leghe Ni-Mn-Ga, Fe-Pd e Ni-Mn-Al, ad oggi ancora oggetto di ricerca per meglio comprendere il loro comportamento e le loro proprietà.

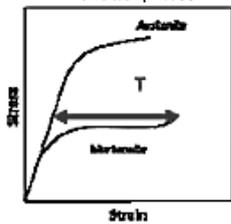
2.6. Applicazioni

In generale le applicazioni delle leghe a memoria di forma possono essere suddivise in quattro categorie, secondo la funzione primaria del loro elemento di memoria (Tab. 2-8) [1]:

- a recupero libero (*free recovery*): l'elemento di memoria viene deformato e poi rilasciato (senza l'applicazione di forze); esso rimane deformato fino ad un riscaldamento sopra la temperatura di trasformazione, che causa il ritorno alla forma iniziale. Vi è infine un raffreddamento che non va a cambiare la forma raggiunta;
- a recupero forzato (*constraint recovery*): il cambio di forma (dopo la deformazione) viene impedito ed una forza o tensione viene sviluppata dall'elemento SMA verso l'applicazione una volta che viene riscaldato: l'elemento di memoria compie lavoro verso l'applicazione;
- attuatori o per produzione di lavoro;
- superelasticità: si tratta di dispositivi che lavorano in condizioni isoterme.

Nei primi tre casi l'effetto a memoria di forma può essere sfruttato per generare moto e/o forze, mentre nell'ultimo caso la superelasticità permette l'immagazzinamento di energia di deformazione.

Category	Description	Examples
Free recovery	<p>The sole function of the memory element is to cause <i>motion or strain</i> on the applications.</p> <p>Working principle: The memory element is stretched and then released (no load applied). It remains in stretched condition until heated above the transition temperature and shrink back to its original form, and subsequent cooling below the transition temperature does not cause any macroscopic shape change (e.g. OWSMA).</p>	<p>NiTi eyeglass frames (TiFlex™, TITANFlex®) and Simon IVC filter.</p>
Constrained recovery	<p>The memory element is prevented from changing shape and thereby generates a <i>stress or force</i> on the applications.</p> <p>Working principle: The memory element is prevented from returning to its original form after being stretched and considerable force generated if heated above the transition temperature.</p>	<p>Hydraulic couplings, fasteners and connectors: CryoFit™, Cryocon®, UniLok®, CryOlive®, CryoFlare®, CryoTact®, Permacouple®, Tinel Lock® and BetaFlex™.</p>

<p>Actuator or work production</p> <p>(Force actuator, proportional control and two-way-effect with external reset force)</p>	<p>There is <i>motion</i> against a <i>stress</i> and thus work is being done by the memory element on the applications.</p> <p>Most of applications fall in this category. Can be either OWSMA or TWSMA. Three types of actuators:</p> <p><u>Force actuator:</u> The memory element exerts force over a considerable range of motion, and often for many cycles.</p> <p><u>Proportional control:</u> The memory element used only part of its selected portion of shape recovery to accurately position the mechanism, because the transformation occurs over a range of temperatures rather than at a single temperature.</p> <p><u>Two-way-effect with external reset force:</u> The memory element generates motion to overcome the opposing force, and thus do work. The memory element contracts upon heating to lift a load, and the load will stretch the heating element and reset the mechanism upon cooling (e.g. TWSMA).</p>	<p>Electrical actuators (VEASE™, SMARt Clamp™), thermal actuators (Memrysafe®, circuit breaker, window or louvre opener, valves), and heat engines.</p> <div style="text-align: center;">  </div>
<p>Superelasticity</p>	<p>The applications are isothermal in nature and involve the storage of potential energy.</p>	<p>Eyeglass frame, orthodontic archwire, Mammelok® breast hook, guidewires, anchors and underwire brassiere.</p>

Tab. 2-8 Categorie di applicazioni delle SMAs [1].

Il comportamento unico delle leghe NiTi ha portato a un loro ampio utilizzo in diversi settori dell'industria: aerospaziale, automotive, automazione e controllo, sicurezza ed elettronica (dispositivi MEMS).

I concetti e i metodi utilizzati possono essere comuni a diversi settori. Un esempio può essere quello delle molle *thermovariable rate* al NiTi che sono impiegate per il controllo di apertura della porta di un forno auto-pulente, per garantire un uniforme cambio di marcia per la trasmissione automatica della Mercedes-Benz, per componenti domestici di sicurezza che controllano il flusso di acqua calda e infine per le valvole di sicurezza industriali per prevenire flussi di gas dannosi ed infiammabili.

In Tab. 2-9 è riportato uno schema generale delle potenziali applicazioni delle leghe a memoria di forma.

<i>Configuration</i>	<i>Potential Applications</i>
SMA tendons, wires and cylinders	Adaptive control and actuation of aircraft flight surfaces
Embedded SMA wires	Shape-adaptive composite materials
SMA actuators	Transmission line sag control and ice removal from overhead power lines
SMA energy absorbers and tendons	Earthquake-resistant building and bridges, bridge and structural repairs
SMA dampers	Engine mountings, structural supports
SMA wires, wings, legs, actuators, etc.	Mobile micro-robots, robot arms and grippers
SMA wires, composites, etc.	Prosthetics, artificial muscles

Tab. 2-9 Potenziali applicazioni delle SMAs [1].

2.6.1. Applicazioni nei settori aerospaziale ed aeronautico

Nei settori aerospaziale ed aeronautico, le leghe a memoria di forma hanno trovato largo impiego e tuttora si punta ad esse con l'obiettivo di ridurre le masse e gli ingombri dei vari sottosistemi. In tali ambiti è noto come gli spazi e i volumi siano ridotti, e la necessità di avere masse piccole sia volta all'ottenimento dei minimi consumi.

Il dispositivo che aprì la strada alle SMA in questi campi è rappresentato dall'accoppiamento per linee idrauliche impiegato negli aerei F-14 negli anni '70 (Fig. 2-17).

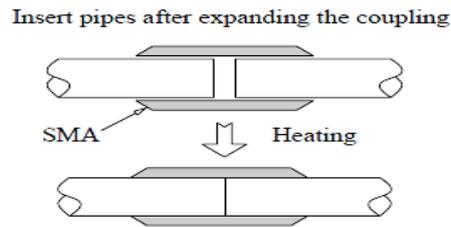
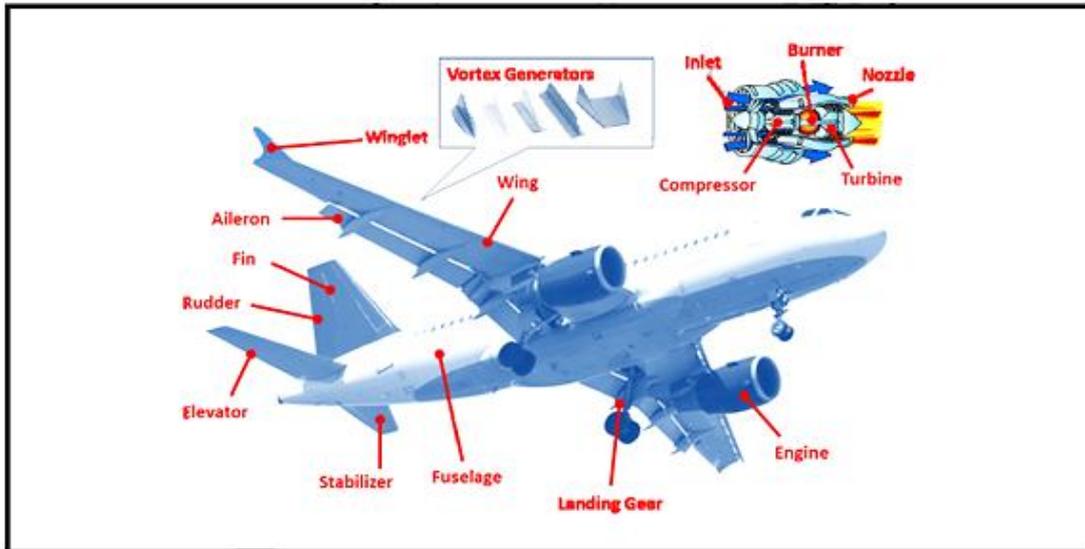


Fig. 2-17 Giunto in SMA [14].

In generale, le applicazioni più frequenti in campo aeronautico sono [1]:

- attuatori;
- connettori strutturali;
- sigillanti;
- smorzatori di vibrazioni;
- dispositivi per la ricognizione;
- superfici *morphing*.



Parts	Parts
FUSELAGE	ENGINE
<i>Aerostructure / Composite body</i>	<i>Inlet</i>
<i>Skin / Panel</i>	<i>Nozzle</i>
WING / FIN / STABILIZER	<i>Rotor</i>
<i>Wing</i>	LANDING GEAR
<i>Winglet</i>	ELECTRO-MECHANICAL CONTROL
<i>Vortex generator</i>	<i>Hydraulic lines</i>
<i>Flap edge</i>	
<i>Structure / Spars</i>	

Fig. 2-18 Applicazioni, esistenti e potenziali, delle SMAs nei velivoli [1].

Le applicazioni aerospaziali sono simili a quelle aeronautiche, ma se ne aggiungono di altre. Si riportano alcuni esempi d'impiego delle SMAs:

- dispiegamento di antenne (Fig. 2-19);
- innescio del sistema di *off-landing* del pannello solare dell'*Hubble Space Telescope*;
- meccanismo no-shock di separazione per il rilascio di un satellite;
- sistema di apertura della copertura di una cella solare sul *NASA's Mars Pathfinder Rover* (Fig. 2-20);
- strutture gonfiabili;
- *tape spring*;
- molle di torsione in SMA per il dispiegamento di pannelli solari;
- attuatori lineari.

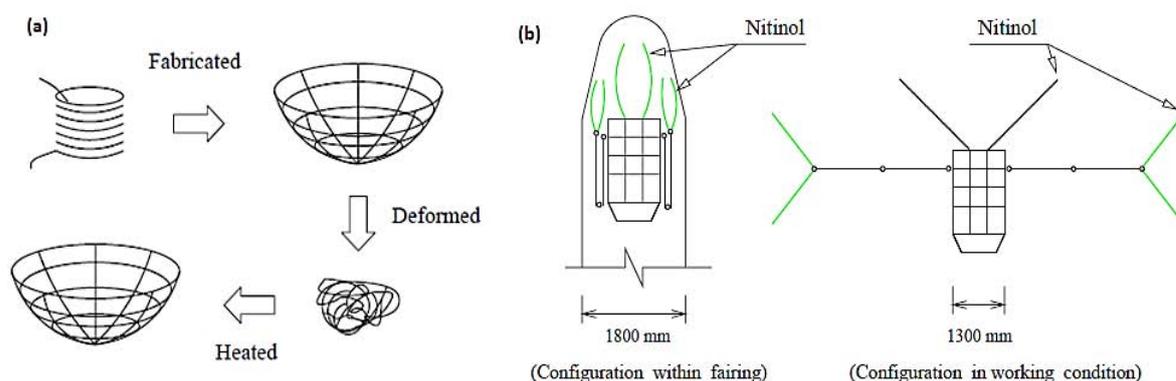


Fig. 2-19 Esempi di sistemi per il dispiegamento di un'antenna [14].

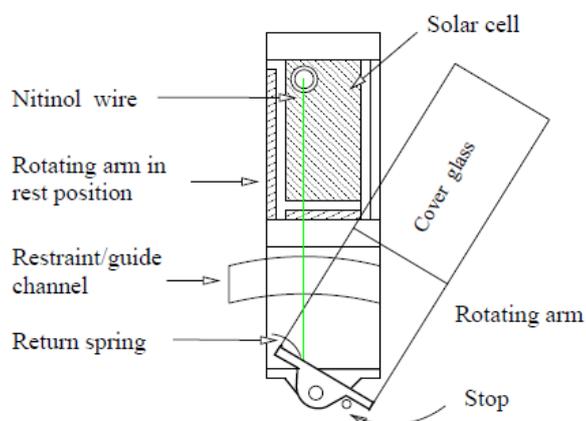


Fig. 2-20 Sistema per la rotazione di una copertura in vetro [14].

Negli anni '90 i ricercatori cominciarono a sviluppare l'idea di utilizzare le leghe a memoria di forma per realizzare strutture attive e adattabili, sfruttando la capacità di *morphing*. L'idea è stata quella di sviluppare delle superfici che, essendo "sensibili" alle diverse condizioni di volo, riuscissero a modificare la propria forma per ottimizzare la struttura alla specifica condizione operativa. La possibilità di intervenire sul cambiamento della curva di portanza è un nodo centrale nella progettazione di un velivolo, perciò un profilo con la capacità di modificare la curvatura grazie alla deformabilità lungo la corda, garantisce l'obiettivo senza dover coinvolgere le usuali superfici di controllo, le quali hanno lo svantaggio di modificare le proprietà aerodinamiche intervenendo solamente in punti locali della struttura. Queste strutture sostengono rivestimenti costituiti da compositi corrugati ed elastomeri in grado di consentire le deformazioni volute senza snervamenti locali. Le soluzioni studiate sono state di tipo passivo, dove la deformazione era indotta direttamente dai carichi aerodinamici agenti sul profilo. Tuttavia è possibile sfruttare le medesime soluzioni strutturali per un funzionamento attivo: le leghe a memoria di forma rientrano tra i materiali candidati a tale fine.

Questa importante filosofia porta con sé, oltre agli innumerevoli vantaggi, anche una serie di problematiche; prima fra tutte l'elevata complessità dovuta all'obbligo di dover ripensare da capo il progetto strutturale di un velivolo, non essendo, infatti, le strutture convenzionali che lo compongono adatte ai nuovi propositi. Oltre a tutta una serie di accorgimenti che devono essere presi in considerazione nella "nuova" progettazione di tali strutture (particolari sistemi

di vincolo alla fusoliera, giunti opportuni che consentano la deformazione dell'ala), si deve porre attenzione nell'adottare un rivestimento flessibile che si adegui alle elevate deformazioni senza rotture o snervamenti. Gli studi finora condotti suggeriscono l'impiego degli elastomeri quali candidati ideali allo scopo ma, avendo essi una rigidità flessionale molto limitata, devono essere inglobati in una struttura di supporto, appositamente progettata che sopperisca alle mancanze strutturali. Una possibile soluzione è costituita da un rivestimento in materiale composito che possa presentare rigidità anche molto differenti in apertura e in corda, andando ad abbracciare il concetto della *stiffness tailoring*: ovvero la realizzazione di strutture molto deformabili unicamente nelle direzioni volute (corda) e rigide laddove la resistenza ai carichi diviene un'esigenza (apertura). Alcuni studi [10] hanno dimostrato l'applicazione di una struttura flessibile al cui interno sono inserite strisce di Nitinol, in grado di modificare con continuità la propria forma. Le strutture di supporto sono costituite da anelli chiusi in grado di muoversi ruotando rispetto agli altri, riconducibili per morfologia e funzione alle vertebre (Fig. 2-21).

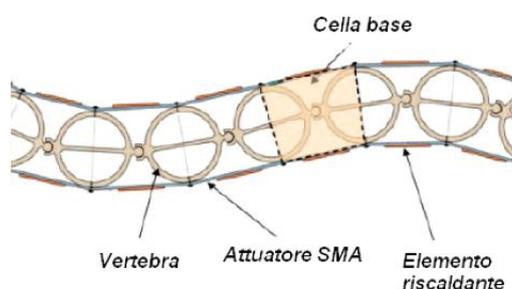


Fig. 2-21 Esempio di modello di supporto costituito da vertebre flessibili [10].

I pannelli superiori e inferiori della cella base evidenziata in Fig. 2-21 si comportano come attuatori antagonisti, mostrando la capacità di assumere quattro differenti configurazioni. La soluzione studiata presenta diversi vantaggi in termini di ottimizzazione delle prestazioni, primo fra tutti il fatto di non richiedere un continuo apporto di calore (e dunque di energia) al sistema per mantenere la forma ottenuta. Non mancano, però aspetti che introducono complicazioni nel progetto. La soluzione adottata, una volta applicata per riprodurre un profilo *morphing*, prevede infatti che gli stessi elementi in Nitinol fungano anche da pannelli di rivestimento i quali, in una reale struttura aeronautica, devono raccogliere i carichi aerodinamici e garantire la rigidità torsionale e a taglio dell'intera superficie aerodinamica. Non sono inoltre da trascurare problemi legati al trasferimento di carico dai pannelli alla struttura interna e all'ottenimento di un'adeguata rigidità flessionale in apertura. Per soluzioni realistiche, quindi, è opportuno pensare a rivestimenti che integrino gli attuatori in soluzioni strutturali adeguatamente pensate per il *morphing*.

Nel settore delle strutture *morphing*, diversi altri progetti furono realizzati, tra i quali il programma della *Defence Advanced Research Projects Agency* (DARPA) sulle "ali smart" (*Smart wing*) e quello *Smart Aircraft and Marine Propulsion System Demonstration* (SAMPSON) per un motore a getto [11]. Nel primo caso sfruttarono le leghe a memoria di forma come materiali attivi per ottimizzare le prestazioni di portanza; furono impiegate sotto forma di fili per l'attivazione degli alettoni, senza l'uso di cerniere. Realizzati come barre di

torsione furono impiegate in un modello ridotto dell'ala del velivolo F-18 (Fig. 2-22). Dimostrarono che il meccanismo di attuazione era efficiente per il modello in scala ridotta, ma non per l'ala nelle dimensioni reali.

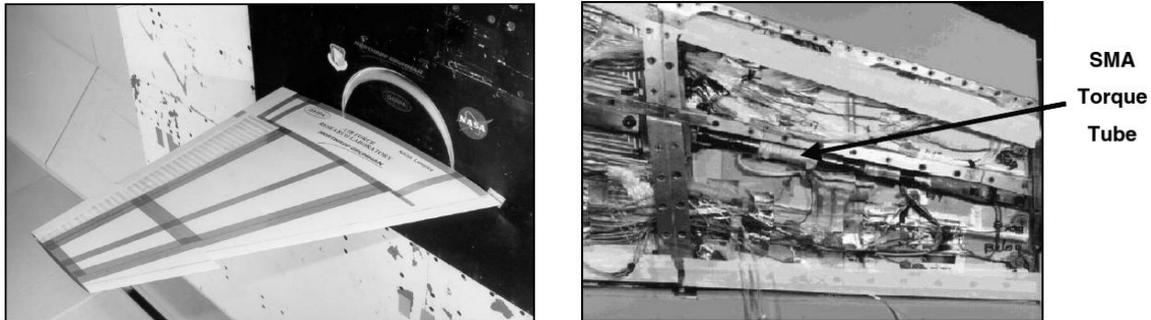


Fig. 2-22 Modello SMART wing e particolare del tubo di torsione [11].

Nel programma SAMPSON fu dimostrata la capacità delle SMAs di agire come materiali attivi nei sistemi propulsivi; furono impiegate per modificare la geometria nel sistema di aspirazione dell'aereo F-15. Le prove sperimentali furono condotte su un modello a scala reale [11].

Un altro importante esempio di applicazione delle SMAs per il *morphing* di superfici alari viene presentato da Sofla et al. [15]. Hanno sviluppato un'ala con questa tecnologia per piccoli velivoli (Fig. 2-23). Hanno utilizzato dei moduli flessionali, attuati da SMA, che agiscono in modo antagonista e consentono il cambiamento del profilo dell'ala, incrementando le prestazioni aerodinamiche.

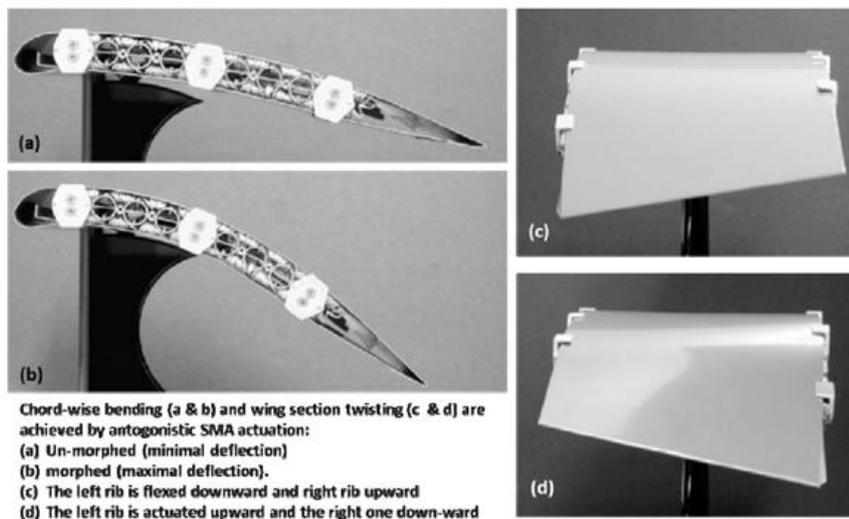


Fig. 2-23 Morphing dell'ala con attuatori SMA antagonisti [1].

Si riporta anche l'esempio di un prototipo dimostrativo che imita l'ala di un pipistrello [2] (Fig. 2-24). All'interno di membrane di silicone sono state inserite delle strisce di NiTi (0.2 [mm] di spessore e 2 [mm] di larghezza) "pre-addestrate" in una forma a zig-zag, ma raddrizzate prima dell'inserimento. In seguito, dopo un riscaldamento per effetto Joule,

riprendono la configurazione a zig-zag. Quando termina la potenza fornita, l'ala si apre automaticamente.

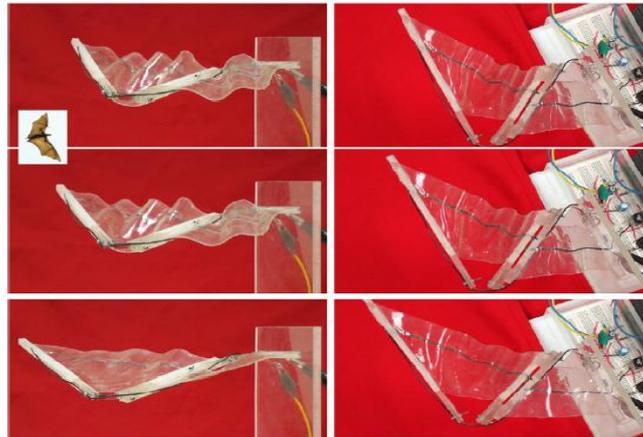


Fig. 2-24 Movimenti di un'ala artificiale con strisce di SMA [2].

La Boeing, invece, sviluppò un dispositivo aerodinamico seghettato, con attuatori in SMA, conosciuto con il nome di *chevron* a geometria variabile (*variable geometry chevron*, VGC) (Fig. 2-25) e installato su un motore a getto GE90-115B per il Boeing 777-300 EG. Questo congegno fu impiegato con una duplice funzione: quella di ridurre il rumore durante la fase di decollo (fattore importante nell'ambito civile, soprattutto per quegli aeroporti che si trovano nelle vicinanze di centri abitati), andando a rendere massima l'apertura del *chevron* e quella di aumentare l'efficienza in fase di crociera, minimizzando la deflessione dello stesso.

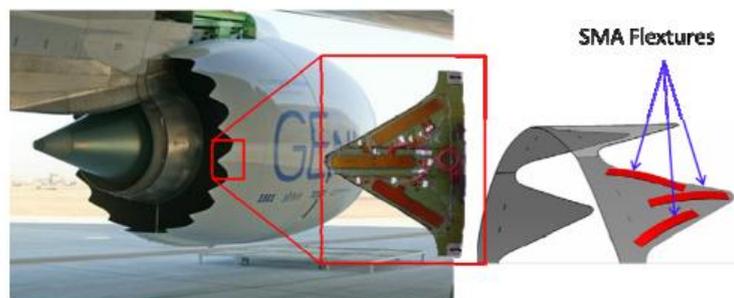


Fig. 2-25 Chevron a geometria variabile [1].

La richiesta di un materiale che lavori alle elevate temperature (caso di un *chevron* a contatto con i gas di scarico caldi) ha fatto ricadere la scelta del materiale sulla HTSMA Ti-Ni-Pt. A fronte del successo di questa tecnologia, NASA, DARPA e Boeing hanno intensificato la ricerca e aumentato i dispositivi brevettati: dispositivi *smart* per l'aspirazione (adattabili), pale riconfigurabili di rotori e, più recentemente, un ugello a ventaglio a geometria variabile.

Anche nel campo dei velivoli ad ala rotante la ricerca ha progredito, con riferimento alle leghe a memoria di forma. Gli elementi SMA sono utilizzati per modificare la superficie dei rotori e renderli più efficienti nelle diverse condizioni di volo.

Un'applicazione simile si ha nelle pale delle turbine eoliche: i componenti in SMA vengono inseriti sulla superficie delle pale per migliorarne l'aerodinamica.

Per maggiori dettagli e informazioni si faccia riferimento a [12].

Un ruolo importante è stato svolto dalle leghe a memoria di forma anche come meccanismo di rilascio *low-shock* [16], poiché esse possono essere attivate lentamente attraverso un graduale riscaldamento e sono capaci di assorbire vibrazioni. I dispositivi di rilascio hanno un duplice scopo: il primo è quello di proteggere il *payload* dai carichi di lancio ed il secondo è quello di rilasciarlo una volta in orbita nel modo meno brusco possibile, all'istante richiesto e minimizzando i dannosi effetti. Se poi i dispositivi da rilasciare sono più di uno, il sincronismo è un altro dei requisiti da soddisfare.

Tali dispositivi sostituiscono quelli di tipo pirotecnico diffusamente impiegati e risolvono diverse delle problematiche che essi presentano. Infatti, quest'ultimi inducono un alto shock, sono alquanto invasivi nei confronti dei sistemi circostanti (lenti e sistemi ottici) e hanno un elevato costo (dovuto a requisiti di sicurezza). L'*Air Force Research Laboratory* (AFRL) [16] ha sviluppato dei dispositivi *low-shock*, non pirotecnici con leghe a memoria di forma. Hanno eseguito molteplici prove sperimentali per valutarne le proprietà e le caratteristiche, e diversi prototipi sono stati sviluppati. Alcuni esempi sono riportati in Fig. 2-26 e per maggiori dettagli si faccia riferimento a [17].

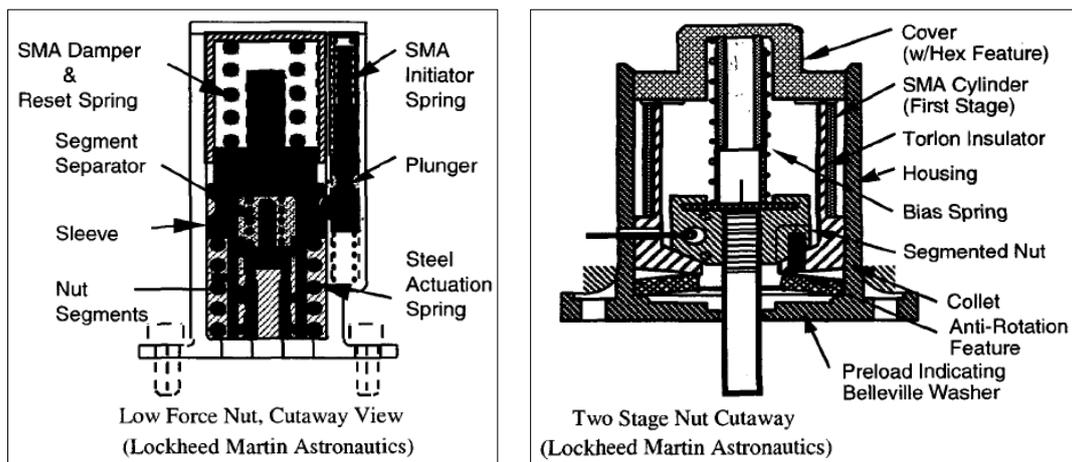


Fig. 2-26 Dispositivi *low-shock* [17].

Sfruttando la capacità di recuperare la forma delle SMAs, l'idea è stata quella di realizzare degli attuatori in lega a memoria di forma per innescare il meccanismo di rilascio. Nei dispositivi in Fig. 2-26 i bulloni permettono al *payload* di rimanere agganciato al lanciatore; quando gli attuatori in SMA vengono attivati (per effetto Joule), il sistema permette il rilascio, sganciando i bulloni. Si può notare come, per ovvi motivi di sicurezza, vi sia una ridondanza nelle molle SMA. A fronte dei dati ricavati (sia da test a terra che in volo), hanno dimostrato che questi due dispositivi incontrano molti dei requisiti necessari per poter sostituire quelli pirotecnici: sono non-pirotecnici, ripristinabili, non danno contaminazioni ai sottosistemi circostanti, sono confrontabili in termini di dimensioni con quelli pirotecnici ed infine provvedono un rilascio veloce e sincrono. Il loro svantaggio maggiore riguarda il *pyro pulse*, inteso come fornitura di potenza del veicolo di lancio (compatibilità di potenza). Infatti, entrambe le applicazioni non sono compatibili con il *pyro pulse*: esse richiedono un'energia molto maggiore rispetto a quelle pirotecniche (90 [Ws] per le prime, 0,05 [Ws] per le

seconde). Particolare attenzione venne posta per la progettazione dell'interfaccia tra il veicolo di lancio ed il *payload*.

Altri progetti furono sviluppati e si rimanda al riferimento bibliografico [17] per i dettagli. In generale, furono migliorate le caratteristiche interne per ridurre gli attriti e quindi diminuire la corrente richiesta per l'attuazione, garantendo così la compatibilità con il *pyro impulse*. Gli obiettivi successivi furono anche quelli di diminuire ancor di più lo shock provocato e quello di passare da una progettazione su scala nano e micro-metrica a una compatibile con i satelliti di dimensioni maggiori.

Un'applicazione, SMART, sempre in termini di rilascio e *deployment* viene proposta da Fragnito e Vetrella [18], per appendici di micro e mini-satelliti. Lo studio è stato condotto da gruppi di ricerca delle Università di Napoli e riguarda una multi-missione scientifica lanciata dal lanciatore indiano PSLV in orbita sunsincrona (400-1000 [km]). Il satellite ha dimensioni 45x45x45 [cm] e una massa di 50 [kg]. Il pannello solare da dispiegare è formato da un pannello superiore *body-mounted* e da quattro laterali dispiegati a coppie, con inclinazioni di 90° e 16° per garantire l'adeguata potenza (Fig. 2-27). Ogni pannello è costituito da 5 stringhe di celle solari in arseniuro di gallio (GaAs) montate su un substrato sandwich in CFRP (spessore totale 6 mm).

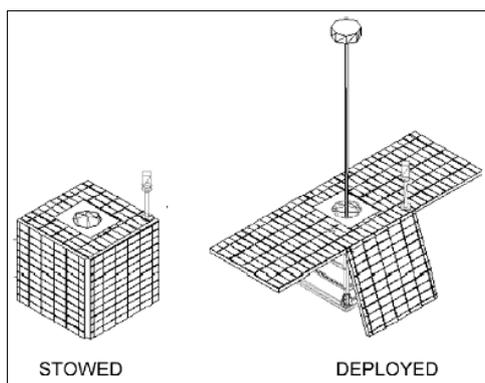


Fig. 2-27 Dispositivo SMART [18].

Il comando per il dispiegamento è dato da terra e manipolato dalla CPU a bordo del satellite in modo che i fili di Nitinol vengano attivati dalla corrente elettrica che li attraversa e permettano un rilascio simmetrico e sincrono delle quattro ali in un breve lasso di tempo. Il meccanismo atto a mantenere la piegatura è precaricato in modo da evitare vibrazioni non lineari o un indesiderato dispiegamento durante il lancio. La sequenza dei comandi (Fig. 2-27) è molto più complessa di quella descritta ed inoltre sono presenti molti altri sottosistemi (di controllo e sicurezza) per il corretto funzionamento del dispositivo.

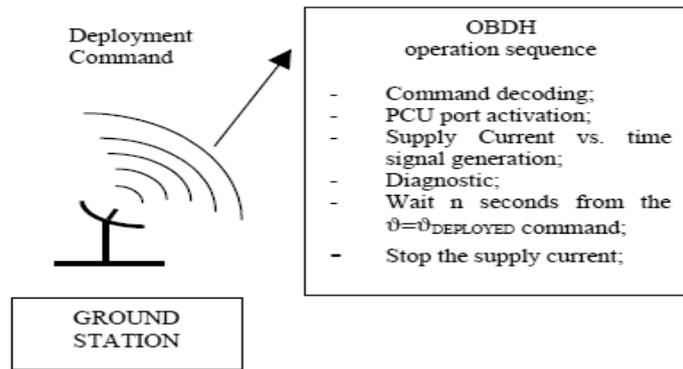


Fig. 2-28 Sequenza di comandi per SMART [18].

A livello d'idea progettuale, un filo o una piccola barra in SMA possono essere usate come meccanismo guida per ruotare un piccolo pannello [2], come mostrato in Fig. 2-29. Dopo la pre-torsione del filo, a fronte di un riscaldamento il pannello ritorna alla posizione originale. Se sono utilizzate le leghe a memoria di forma a due vie, dopo il raffreddamento viene recuperata anche la posizione alle basse temperature. Date le notevoli differenze di temperature (al sole o in ombra), le SMAs a due vie sono ideali come materiali di attuazione per le missioni nello spazio.

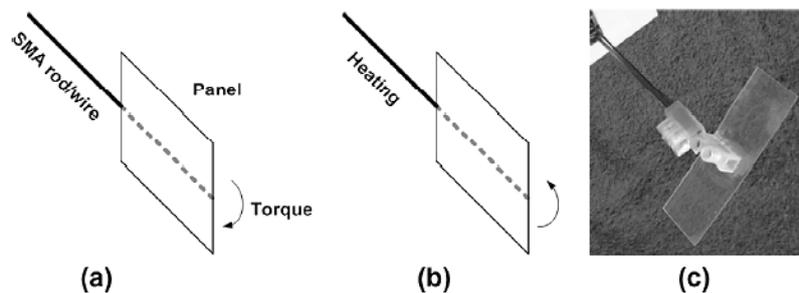


Fig. 2-29 Controllo di posizione di un pannello: (a) torsione del filo SMA. (b) riscaldamento per il recupero della forma. (c) foto del prototipo [2].

Come per il caso precedente, l'effetto a memoria di forma delle SMAs viene sfruttato in elementi torsionali che muovono un collettore solare in modo da modificarne la forma per ottimizzare le prestazioni. In una variante di questa idea, un satellite fa uso di un motore passo-passo attivato da fili di SMA per l'orientazione dei suoi *flap* solari.

Con il medesimo fine fu sviluppato un pannello solare flessibile e leggero (*lightweight flexible solar array*, LFSA) [19]; esso incorpora una striscia sottile di SMA nella cerniera che, una volta riscaldata ed attivata, apre un pannello solare precedentemente ripiegato (Fig. 2-30). Questa soluzione porta a un vantaggioso risparmio di massa e di volume e ad un dispiegamento senza shock.

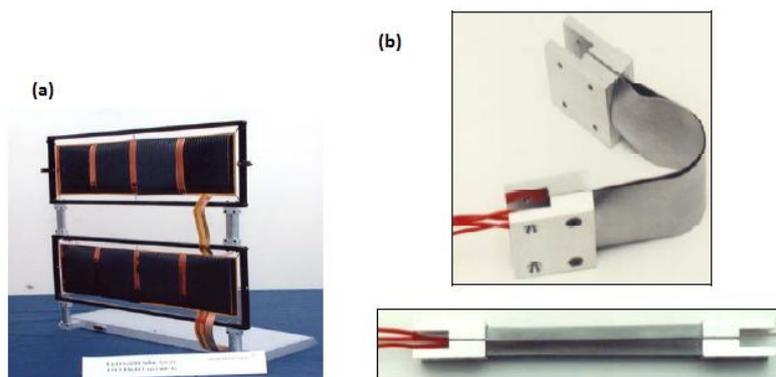


Fig. 2-30 (a) LFSA. (b) cerniera con SMA, piegata e dispiegata [19].

Si è visto come nell'industria aerospaziale sia di fondamentale importanza la realizzazione di strutture che possano essere efficacemente impaccate e stivate all'interno dei lanciatori. Le strutture *deployable* sono molto diffuse, di diverse tipologie e costruite con vari materiali. In [20] si trova un elenco esauriente di queste applicazioni con le relative caratteristiche e proprietà. In questo lavoro di tesi si porrà l'attenzione sui sistemi *self-deployment*, di cui si parlerà più approfonditamente nel paragrafo 6.1.

Un altro esempio di struttura di dispiegamento che impieghi le leghe a memoria di forma è quello di un pannello in materiale composito parzialmente flessibile (*partially flexible composite*, PFC) con inseriti fili di Nitinol per l'attivazione del movimento (Fig. 2-31) [21]. Vengono impiegate due matrici, resina epossidica per l'intero laminato (CFRP) e gomma siliconica per la parte che verrà piegata.

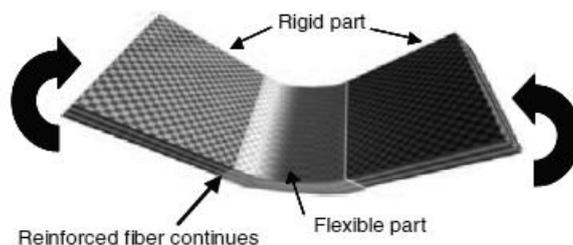


Fig. 2-31 Pannello in PFC [21].

Lo studio si focalizza sui processi di fabbricazione e su tutta una serie di prove sperimentali eseguite sul campione con e senza le fibre di SMA: prove a flessione, prove a fatica, prove di *self-deployment*, ecc.. Dai test sul pezzo senza i fili hanno ricavato risultati sulla frattura delle fibre di carbonio e sulla non capacità del laminato di mantenere la configurazione piegata, in quanto le fibre di carbonio hanno energia di *spring-back* in flessione. A fronte di ciò, dunque, si aggiungono gli inserti in Nitinol che devono contrapporsi all'energia delle fibre di carbonio per poter mantenere la forma piegata. Dopo riscaldamento, il laminato ritorna alla configurazione piana iniziale.

Viene fatta un'osservazione sul metodo di riscaldamento dei fili di SMA per attivare il recupero di forma. In questo studio hanno eseguito dei test per rilevare l'andamento della

temperatura nel composito CFRP e negli elementi in Nitinol causato dall'effetto Joule (Fig. 2-32).

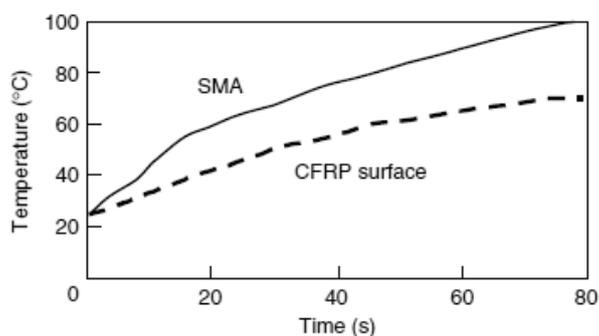


Fig. 2-32 Andamento della temperatura a causa del passaggio di corrente elettrica [21].

L'andamento della temperatura per la lega dimostra come la corrente direttamente applicata ai fili causi un riscaldamento per effetto Joule; si osserva anche come la temperatura raggiunta dalla SMA superi quella di trasformazione (80 °C per la specifica lega). Un'ultima considerazione riguarda la differenza di temperatura tra i fili e la superficie in CFRP: ciò indica che la corrente elettrica scorre maggiormente attraverso i fili, fatto che conferma come il riscaldamento per effetto Joule sia tra i più idonei per l'attivazione delle leghe a memoria di forma.

Si riassumono i vantaggi dell'utilizzo delle SMA nelle strutture *deployable*:

- risparmio di massa e volume;
- annullamento dei carichi di shock a fine dispiegamento, di solito associati ai meccanismi con molle o sistemi pirotecnici. Ciò non rende necessario l'inserimento di smorzatori e quindi si riduce la complessità totale;
- capacità di retrazione;
- funzionamento senza rumore che elimina i disturbi vibratori verso altri *payload* che solitamente si creano con i sistemi guidati da motori;
- capacità di sensore;
- elevata affidabilità: il sistema è ben programmabile (temperature di trasformazione) e controllabile (corrente elettrica per il riscaldamento della lega);
- grandi deformazioni recuperabili;
- elevata resistività elettrica: vuol dire che il cambiamento di forma può essere indotto dal passaggio di corrente nell'elemento SMA, evitando dei riscaldatori separati dal sistema;
- flessibilità di design. Gli attuatori in SMA possono essere lineari, rotatori, combinazioni di essi e possono essere parte integrante di un componente.

Le leghe a memoria di forma sono usate anche come sensori per acquisire informazioni da sistemi termomeccanici [12]. Ciò è possibile perché le proprietà variano durante le trasformazioni di fase indotte durante il riscaldamento o l'imposizione di un carico. Ad esempio, ogni fase ha la propria resistività termica, che può essere monitorata per indicare

quando un elemento in SMA sta subendo una trasformazione di fase indotta da tensioni a sua volta indotta da deformazioni.

Un'applicazione che ricade sì nel settore aerospaziale, ma anche in quello della conversione di energia, riguarda un motore solare con SMAs [2]. È noto come il problema dell'energia elettrica disponibile a bordo di un satellite sia importante e delicato. Nella maggior parte dei casi vengono impiegate delle celle solari che convertono l'energia solare in energia elettrica, direttamente disponibile o accumulabile in batterie. Queste ultime, però risultano abbastanza pesanti e ciò non è gradito nei sistemi spaziali. Viene quindi fornita un'alternativa proponendo questo motore solare basato su delle molle in lega a memoria di forma (Fig. 2-33), capace di convertire l'energia solare (radiazione) direttamente in una rotazione meccanica, invece che in energia elettrica. Dalle molteplici simulazioni numeriche effettuate, è stato dimostrato che il sistema presenta una scarsa efficienza. Ciò non toglie che questa tecnologia possa affiancarne altre (senza un eccessivo aumento delle masse) ed essere utile come dispositivo di guida per sistemi *deployable*

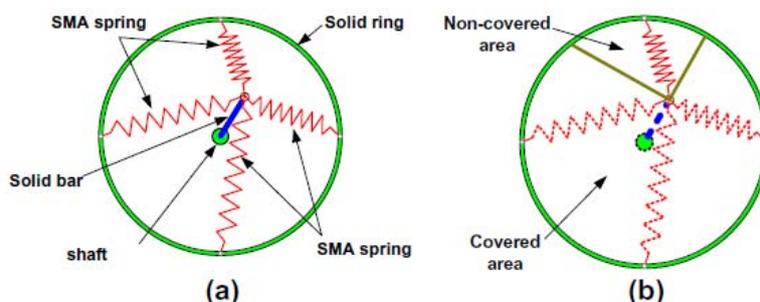


Fig. 2-33 Motore solare [2].

Infine, non si può non menzionare l'impiego delle leghe a memoria di forma come attuatori [14]. Possono essere impiegate sia le SMAs a una via che quelle a due vie. Nonostante quest'ultime possano agire in due direzioni, la loro deformazione di trasformazione è circa la metà di quella delle leghe ad una via. Per questo motivo di solito si pongono due attuatori con SMA a una via uno contro l'altro, generando così un effetto simile a quello prodotto da un attuttore con lega a due vie (attuatori antagonisti). I vantaggi della prima soluzione sono la semplicità, la compattezza e il minor numero di elementi; la seconda opzione permette invece un maggiore moto e forze più rilevanti.

Per queste applicazioni gli elementi in SMA sono realizzati nelle seguenti forme per le rispettive funzioni:

- fili in tensione per piccoli moti lineari ed elevate forze;
- elementi elicoidali per grandi moti lineari e piccole forze, o grandi rotazioni e piccole coppie;
- tubi o barre di torsione per grandi rotazioni e piccoli momenti;
- strisce per grandi spostamenti e forze modeste;
- dischi per piccoli moti lineari e grandi forze.

In questa categoria di applicazioni rientrano dei dispositivi già menzionati, come i sistemi di rilascio. Si riportano due esempi di attuatori realizzati:

Parts	References	Parts	References
ENGINE ROOM / UNDERHOOD		BODY AND EXTERIOR	
Radiator	[414-417]	Headlights / Lamps	[13, 418, 419]
Fan clutch	[420]	Wiper	[13, 421, 422]
Engine control (sensors and actuators)	[423]	Sunroof / Sunshade	[415, 424-426]
Start-up clutch	[427]	Door and locking mechanism	[13, 208, 428-431]
Tumble flaps	[209]	Side mirror	[211-213]
Fuel injector / Fuel system	[432-435]	Boot	[3, 428]
Piston rings	[436]	Engine hood	[210, 437]
Booster / Charger	[13]	Petrol cap	[204]
Valves	[13, 438]	Bumpers and crash structures	[439-442]
Battery	[443]	Air dams	[208, 444]
DRIVETRAIN		Grill / Louver	[208, 414, 415]
Transmission control	[13, 445, 446]	Spoiler	[447]
		Structural parts / Panels	[415, 448-451]
SUSPENSION / STEERING / WHEEL & TYRE		INTERIOR / PASSENGER ROOM	
Brake	[446, 452]	Dashboard	[441]
Absorber	[13]	Rear view mirror	[205]
Tyre	[453]	Seats	[439, 450, 454-460]
		Airbags	[461, 462]
		Structural parts / Impact structures	[441, 448, 463]

Fig. 2-34 Potenziali applicazioni delle SMAs nel settore automotive [1].

Le realizzazioni con SMAs permettono una facile miniaturizzazione, comportando un'elevata compattezza e quindi una riduzione degli ingombri e della massa, fattori molto importanti nella progettazione. In Tab. 2-10 è riportato un confronto fra un attuatore tradizionale e uno che impiega una lega a memoria di forma; si vede come vengano confermate le osservazioni appena fatte.

Parameters	DC-Drive	SMA-Drive
		
Actuation time (Complete cycle open-close)	3 sec.	2-3 sec.
Installation space	Compact	Stretched along the air duct
Acoustics emission (from drive)	Slight noise	No noise
Mechanical complexity	High	Low
Mass	approx. 65 gm.	approx. 20gm.
Positioning accuracy	$\pm 1.5^\circ$	$\pm 2.25^\circ$
Energy consumption	1 W during flap movements	1W permanent

Tab. 2-10 Confronto fra attuatori tradizionali e in SMA [1].

La General Motors (GM) sta studiando da qualche decennio gli attuatori in SMA (con diversi brevetti all'attivo) e le vetture del 2013 sono state le prime a utilizzarli (*air vent* per la settima serie della Chevrolet Corvette) [1]. In futuro svilupperanno altre tecnologie (Fig. 2-35), quali un generatore elettrico che sfrutta il calore dei gas di scarico, un dispositivo per il controllo del flusso d'aria nel motore (*active louver*), un altro per regolare il flusso d'aria riducendo la resistenza (*air dam*) ed infine una maniglia adattabile per facilitare l'apertura delle portiere (*grab-handle*).

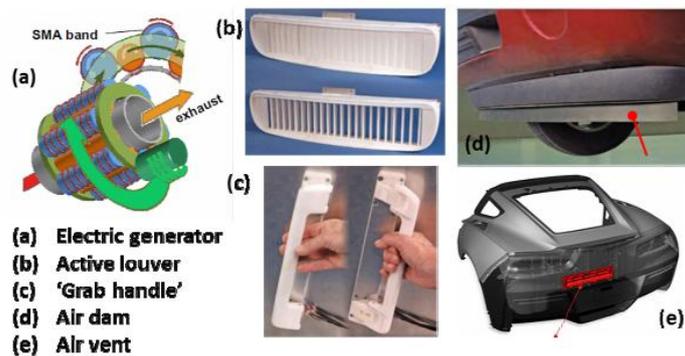


Fig. 2-35 Applicazioni emergenti delle SMAs [1].

Fili superelastici o a memoria di forma sono integrati in alcuni pneumatici (strutture polimeriche) come rinforzo meccanico per incrementare la durata operativa.

Le SMAs vengono utilizzate anche per i meccanismi di blocco/sblocco delle portiere, per la regolazione dello specchietto retrovisore ed infine per il controllo del tergilavavetro o dei fanali.

Inoltre, sfruttando le capacità di *morphing*, le leghe a memoria di forma si stanno espandendo anche ad altre aree come l'aerodinamica e l'estetica dei componenti automobilistici.

Infine si osserva come di tutti gli esempi riportati, solo una minima parte sia stata realizzata nella pratica a causa degli elevati costi che ancora implica l'utilizzo delle SMAs e del loro ristretto intervallo di temperature operative (Fig. 2-36). Altre limitazioni che devono essere considerate sono la durabilità, l'entità dell'isteresi e la stabilità, soprattutto quando le condizioni di esercizio sono severe e i requisiti stringenti (sicurezza).

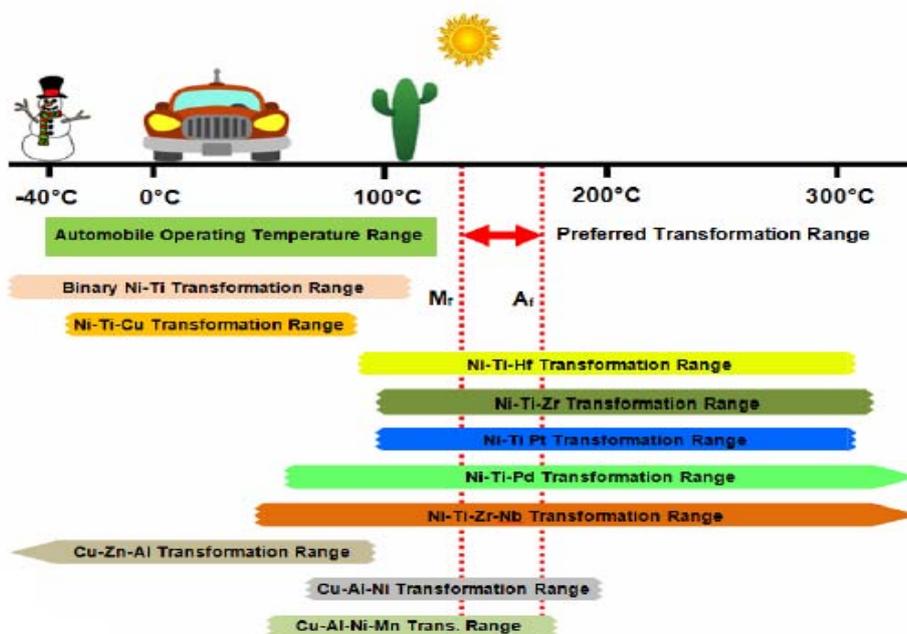


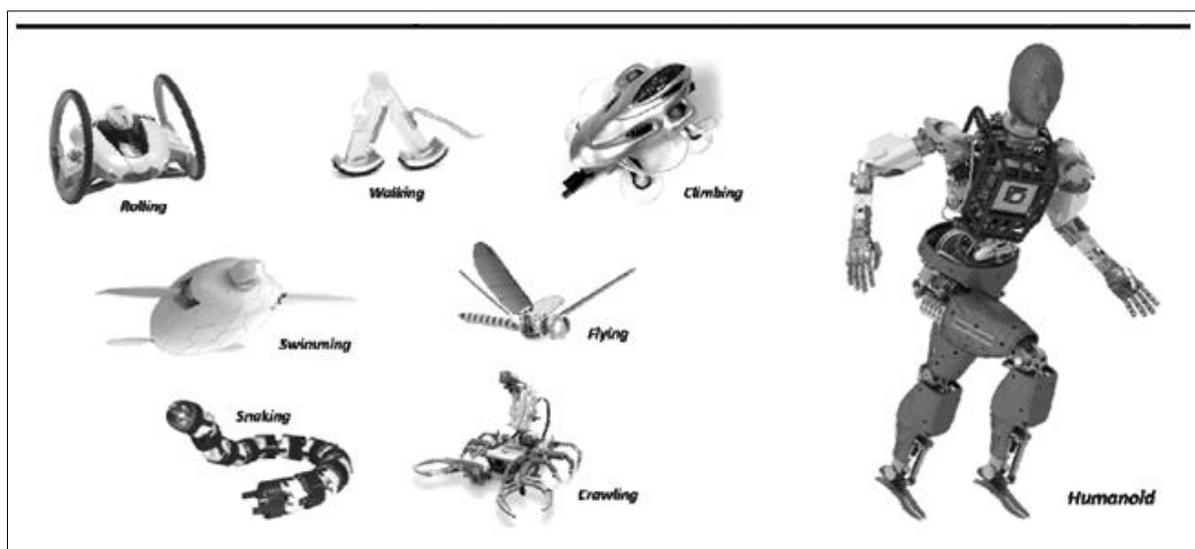
Fig. 2-36 Intervalli delle temperature operative per dispositivi nel campo automobilistico [1].

Le SMAs più utilizzate nell'industria automobilistica sono quelle binarie NiTi, che offrono un buon comportamento in un intervallo di temperature tra i -40 °C e i 125 °C, per un numero elevato di cicli di funzionamento. Ovviamente il loro impiego è limitato a quelle zone dell'autovettura distanti dal motore, dove le temperature sarebbero troppe elevate. La scelta delle leghe più appropriate ricade su quelle Cu-Al-Ni che hanno una M_f compatibile con le temperature operative di un'automobile. Per contro, esse sono fragili, instabili, hanno una bassa resistenza a fatica e non sono adatte a operazioni con elevato numero di cicli. Per colmare queste lacune si può ricorrere alle HTSMAs, facendo le opportune considerazioni sui costi.

2.6.3. Applicazioni robotiche

Un altro settore in cui le leghe a memoria di forma trovano un impiego alquanto intensivo è quello della robotica [1]. I dispositivi più diffusi sono micro-attuatori e muscoli artificiali. Ad oggi, molte delle applicazioni sono ispirate al mondo biologico (biomeccanica) e vengono ampiamente usate in aree biomedicali.

Come si può notare dalla Tab. 2-11, sono stati studiati diversi robot con differenti tipologie di movimentazione (strisciante, che cammina, ali che sbattono, rotante, ecc.). I settori che possono sfruttare questi dispositivi sono i più svariati e vanno dal biomedicale alla robotica pura, dall'aerospaziale al commerciale civile.



Categories	Categories
BIOMIMETICS	BIOMEDICAL ROBOTS
<i>Crawling / Snaking</i>	<i>Endoscopic</i>
<i>Walking / Jumping</i>	HUMANOID ROBOTS
<i>Rolling / Skating</i>	<i>Fingers / Hands</i>
<i>Climbing</i>	<i>Head / Facial expression</i>
<i>Swimming</i>	MISCELLANEOUS
<i>Flying</i>	<i>Controller</i>
<i>Others</i>	<i>Actuators</i>
	<i>Sensors</i>

Tab. 2-11 Applicazioni delle SMAs nel settore della robotica [1].

L'interesse maggiore è rivolto verso i robot biomedicali e umanoidi e sono utili in quelle situazioni in cui l'uomo non può intervenire, fornendo informazioni da ambienti come quello subacqueo, spaziale e sotterraneo.

Si riporta un esempio di un sistema di sensori per la robotica sviluppato dai ricercatori della *Northwestern University, Illinois*. Per la realizzazione hanno sfruttato la superelasticità delle leghe NiTi creando un baffo artificiale di ratto, ispirandosi alle capacità percettive di quest'ultimo. Questa tecnologia ha delle grandi potenzialità per perfezionare le capacità di percezione dei robot e potrà essere utilizzata per esaminare e navigare all'interno di piccolissime cavità, identificando micro-caratteristiche o micro-difetti.

Altre applicazioni riguardano dei robot volanti (ad esempio BATMAV e Bat Robot). È stata realizzata dal *Festo Group* una libellula artificiale ("BionicOpter", Fig. 2-37) lunga 44 cm e con un'apertura alare di 63 [cm], equipaggiata con 4 attuatori SMA per controllare i movimenti laterali della testa e quelli verso l'alto e verso il basso della coda, per gestire la stabilità del volo. Il dispositivo ha 13 gradi di libertà e può librarsi in aria e muoversi in tutte le direzioni. Questo è un esempio di come lo stato della ricerca sia avanzato e permetta la realizzazione di robot complessi che potranno essere di grande utilità in campo non solo militare, ma anche civile.



Fig. 2-37 BioniOpter del Festo Group, ispirata al volo della libellula [1].

Nel settore della robotica s'inseriscono anche i micro-veicoli [2]. Essi, ad esempio, trovano impiego in alcuni giocattoli presenti sul mercato. Tra i meccanismi più semplici realizzati, si accenna a quello riportato in Fig. 2-38: un sottile filo di SMA serve per l'attuazione ed una striscia di acciaio funge sia da corpo del veicolo che da molla elastica per allungare il filo durante il suo raffreddamento.



Fig. 2-38 Micro-veicolo [2].

In Fig. 2-39 è riportato un esempio di un mini-veicolo rotante basato sul principio del movimento del baricentro. Le molle in lega a memoria di forma sono riscaldate alternativamente causando uno spostamento della massa centrale. Lo spostamento del centro di gravità implica il movimento del meccanismo in avanti o indietro a differenza del riscaldamento indotto, che viene controllato in remoto.

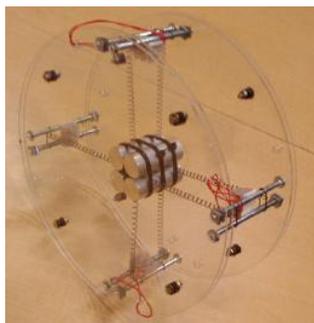


Fig. 2-39 Veicolo rotante [2].

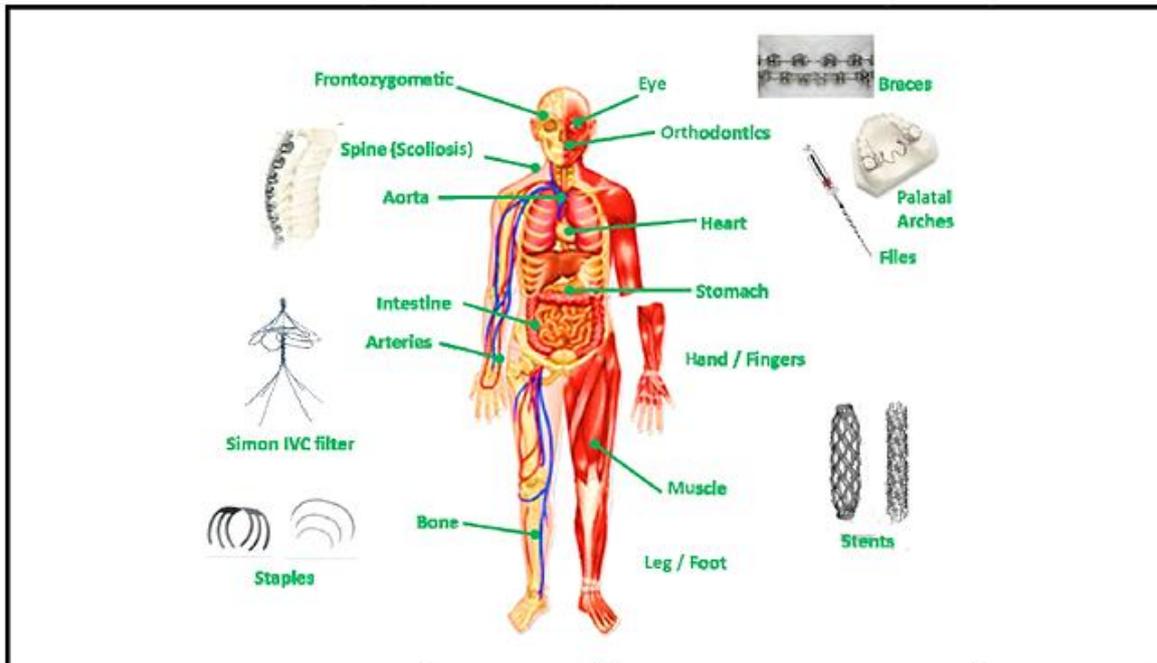
La velocità di risposta di un attuttore in SMA dipende fortemente dalla sua dimensione e dalla sua forma; ciò si ripercuote sulla grandezza e sui gradi di libertà del robot. Per piccoli attuatori il riscaldamento solitamente avviene sfruttando l'effetto Joule, mentre per quelli più spessi si preferiscono tecniche di riscaldamento indiretto. Per aumentare la frequenza di attuazione si inseriscono dei condensatori, e diversi dispositivi di raffreddamento vengono impiegati per migliorare il processo di raffreddamento. Ancora una volta tutto ciò implica un dispositivo finale più ingombrante e pesante. Infine, volendo aumentare i gradi di libertà del robot si deve inserire un maggior numero di attuatori causando dei seri problemi al sistema di controllo.

Le sfide sono quindi quelle di aumentare le prestazioni, migliorare la miniaturizzazione dell'hardware e di incrementare l'"intelligenza" dei sistemi integrati. Le problematiche da risolvere riguardano la difficoltà di fissaggio, la bassa resistenza elettrica, le connessioni elettriche miniaturizzate (per micro-robot), i piccoli output di deformazione, le procedure di controllo e la scarsa efficienza degli attuatori in SMA.

2.6.4. Applicazioni biomediche

Dopo la scoperta dell'effetto a memoria di forma da parte di Buehler et al. nel 1962, le prime applicazioni pratiche riguardarono proprio il settore medico con le prime realizzazioni di impianti ortodontici. Una volta approvata la conformità e sicurezza delle SMAs in campo biomedico, esse trovarono largo impiego nelle sue diverse aree (ortopedia, neurologia, cardiologia e radiologia), con un'ampia gamma di elementi realizzati (Tab. 2-12) [1]:

- fili ortodontici;
- filtri vascolari;
- stent;
- pinzette mediche;
- dispositivi per la microchirurgia;
- fili-guida per suture;
- sostegno per fissare il tendine all'osso;
- graffette per suture;
- endoscopi;
- distanziatori vertebrali.



Fields	Fields
ORTHODONTIC	BIOMEDICAL / SURGICAL INSTRUMENTS
Braces / Brackets	Catheters / Snares
Palatal arches	Scopes (Ureteroscopy, endoscopy, laparoscopy)
Files	Suture
ORTHOPAEDIC	MISCELLANEOUS
Head	Cardiology (Heart)
Spine	Hepatology (Liver, gallbladder, biliary tree and pancreas)
Bone	Otorhinolaryngology (Ear, nose and throat)
Muscles	Gastroenterology (Gullet, stomach and intestine)
Hands / Fingers	Urology (Kidneys, adrenal glands, ureters, urinary bladder, urethra and the male reproductive organs)
Legs	Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery
VASCULAR	Ophthalmology (Eye)
Aorta	
Arteries	
Vena cava filter	
Ventricular Septal Defect (VSD)	
Vessels	
Valves	

Tab. 2-12 Applicazione delle SMAs in campo biomedico [1].

Nella Tab. 2-13 sono riportate, a titolo esemplificativo, le principali tappe dello sviluppo dei materiali a memoria di forma nel settore della chirurgia.

Year	Device
1963	Discovery of nitinol
1971	Orthodontic braces
1976	Harrington rod for scoliosis
1977	Simon vena cava filter
1981	Orthopedic staple
1983	Prosthetic joint
1983	Nitinol stent
1990	Thin film SMA
1990	Thin film microdevices
1991	Variable curvature spatula
1993	Laparoscopic hernia repair mesh
1995	Laparoscopic clamp
1995	Laparoscopic retractor
1995	Thin film microgripper
1996	RF ablation device
1996	Hernia repair retractor
1998	Atrial septal occluder
1999	Thin film SMA microvalve
1999	Laparoscopic suturing clip
2000	Abdominal wall lift
2000	Vascular ligation clip
2000	Multipoint injector
2000	Self-tightening biodegradable SMP suture
2000	Gastric loop snare
2000	Microelectrode for neural recording
2001	Drug-eluting stent
2001	Thin film microwrapper
2001	Thin film microstents
2002	SMP micro actuator for treating ischemic stroke
2002	Laser activated SMP for treating stroke
2003	SMP foam for endovascular intervention
2003	SMP stent with drug delivery system
2004	Active SMP microfluidic reservoir
2004	Laparoscopic anastomosis ring
2005	Light-responsive SMP
2005	SMP intravascular thrombectomy device
2005	Thin film SMA heart valve
2005	Multi-transition temperature SMP
2005	Water-driven programmable SMP
2005	SMP nanoparticle
2006	SMP neuronal electrode
2006	SMP neurovascular stent
2006	Triple-shape SMP
2006	Two-way SMP fiber
2006	SMP micro tag
2006	Magnetic SMP device
2007	Laser-activated SMP vascular stent
2007	SMP endovascular thrombectomy device
2007	SMP foam stent for endovascular embolization
2007	SMP dialysis needle adapter
2007	Retractable SMP stent
2007	Water-driven self-tightening SMP suture
2007	SMP with adjustable hydrolytic degradation rate
2007	Endoscopic bleeding control device
2008	SMP for soft tissue fixation
2008	Thin film SMA microtube and stent
2008	SMP with built-in threshold temperature sensor
2009	Sirolimus-eluting SMP stent

Tab. 2-13 Sviluppo degli SMMs nel settore chirurgico [2].

In campo ortodontico, il vantaggio di un dispositivo in SMA è di operare nel plateau pseudoelastico, dove il materiale ha delle variazioni quasi nulle di tensione rispetto ad un grande incremento di deformazione. Di conseguenza, la forza sviluppata per la movimentazione dei denti è quasi costante e moderata su un lungo periodo, rispetto al caso che fa uso del tradizionale acciaio [11]. Un'altra applicazione dentistica riguarda le punte dei trapani che possono essere fabbricate in Nitinol, garantendo la capacità di flettersi e facilitare l'esecuzione degli interventi.

Nonostante le leghe a memoria di forma siano molto più costose dell'acciaio, esse hanno trovato largo impiego in questo settore avendo dimostrato eccellenti caratteristiche in termini di elevata resistenza alla corrosione, biocompatibilità, proprietà non-magnetiche e unicità nelle proprietà fisiche. Queste caratteristiche permettono di riprodurre quelle delle ossa e dei tessuti umani, e di realizzare sistemi che siano in grado di rispondere alle variazioni della temperatura corporea. In Fig. 2-40 viene riportato un diagramma stress-strain relativo a tessuti di diverse entità: ossa, tendine, acciaio e Nitinol superelastico. Si osserva come il NiTi si avvicini molto di più al comportamento del tessuto osseo o tendineo rispetto al corrispettivo di acciaio, ribadendo il miglior comportamento delle leghe a memoria di forma rispetto ai materiali tradizionali.

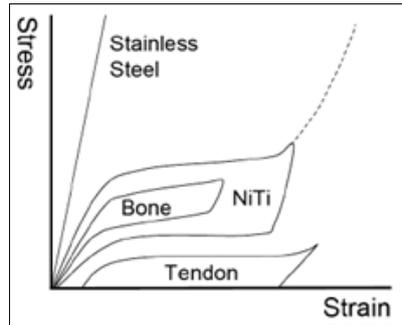


Fig. 2-40 Relazione stress-strain per tessuti ossei, tendinei, in acciaio o in Nitinol superelastico [1].

Nella medicina cardiovascolare, le leghe a memoria di forma trovano impiego nei filtri vascolari e negli stent. Nel primo caso, questi dispositivi intrappolano coaguli che scorrono nel sangue ed eventualmente li dissolvono. Dalla loro forma originale, i filtri vengono deformati e inseriti all'interno di un catetere; al momento dell'impianto, essi vengono rilasciati nel vaso sanguigno dove la temperatura è superiore ad A_s del materiale comportando il recupero della forma iniziale (Fig. 2-41).

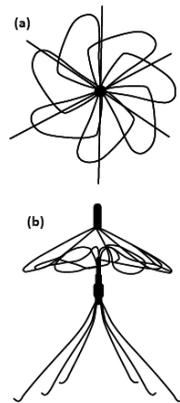


Fig. 2-41 Filtro vascolare in SMA: (a) configurazione piegata. (b) configurazione dispiegata [11].

Un'altra applicazione è un dispositivo di occlusione nei setti dell'atrio cardiaco [11]. Gli interventi che riguardano queste parti del cuore sono molto invasivi, e l'uso di elementi in SMAs diminuisce l'impatto sul paziente, semplificando anche l'operazione.

Nella branca cardiovascolare però, l'applicazione più diffusa è quella degli stent, dispositivi atti a supportare la superficie interna delle vene e facilitare il flusso del sangue. Le SMAs si sono rivelate più adatte nell'inserimento all'interno delle vene rispetto all'acciaio. Inoltre, il loro comportamento d'isteresi superelastica garantisce una migliore resistenza allo schiacciamento durante i normali processi fisiologici, provvedendo una forza radiale, e permette, durante la fase di recupero della forma, l'esercizio di una forza rivolta verso l'esterno, ideale per le funzioni dello stent (Fig. 2-42).

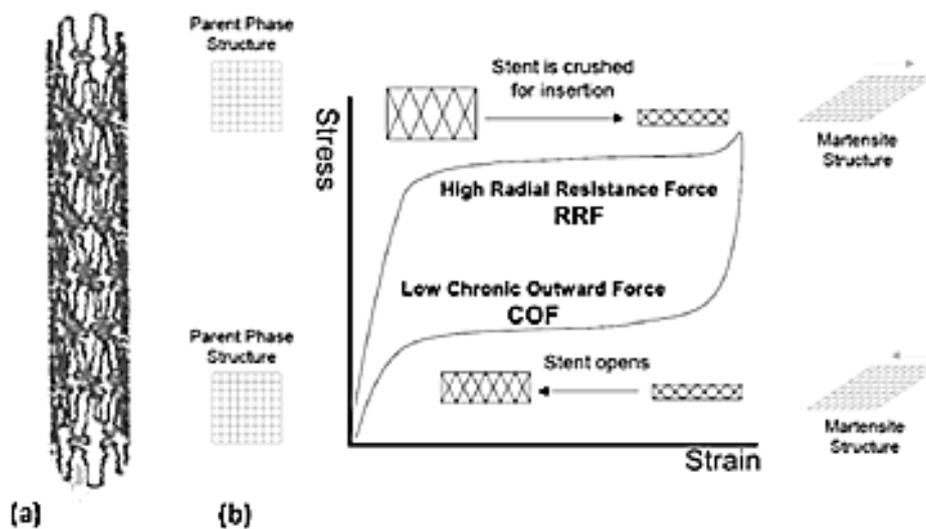


Fig. 2-42 (a) Modello di uno stent tagliato al laser. (b) Forza di resistenza radiale e forza che punta verso l'esterno in funzione del ciclo d'isteresi [1].

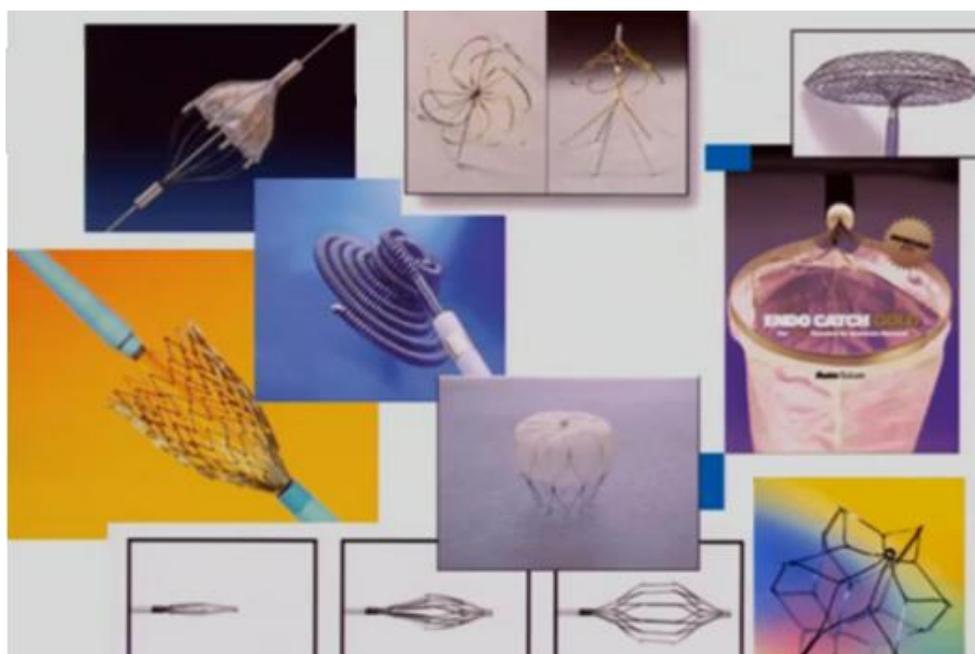


Fig. 2-43 Tipologie di stent.

Il primo stent fu realizzato nel 1983 (Dotter's group) e da quel momento lo sviluppo fu enorme, con la realizzazione di un gran numero di modelli con diverse forme, da quelle semplicemente arrotolate a quelle realizzate con taglio laser da un micro-tubo.

Le leghe a memoria di forma svolsero un importante ruolo per lo sviluppo degli stent ritrattabili. Sfruttando le leghe a due vie, facendo "riprendere" la forma contratta allo stent, esso può essere facilmente estratto senza recare danno ai tessuti in cui è inserito.

Ad oggi, la chirurgia basata sull'utilizzo di cateteri è molto diffusa in quanto consente una minor invasività dell'operazione. La microchirurgia è sicuramente più complessa e richiede un'esecuzione in remoto, con la mancanza di un feedback tattile, una ristretta manovrabilità e con un difficile controllo. L'impiego delle SMAs in quest'area ha migliorato le capacità di un

catetere di muoversi accuratamente negli appositi canali e con larghi angoli di curvatura, permettendo diagnosi e terapie più accurate e meno invasive.

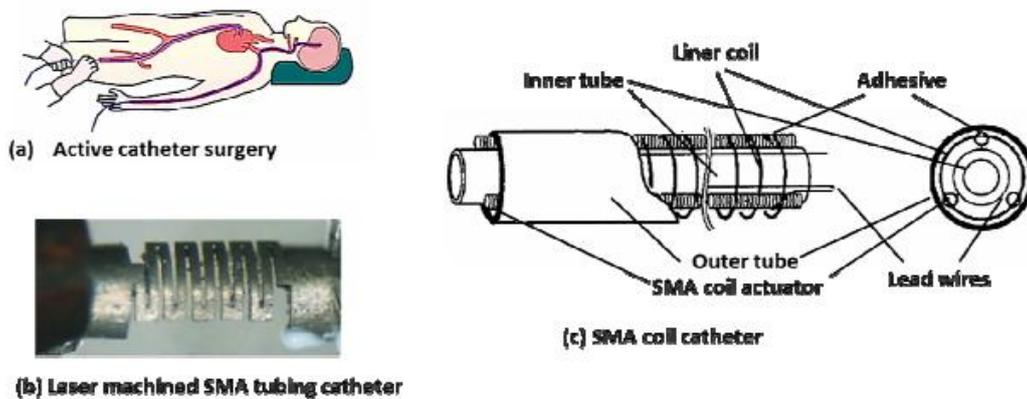


Fig. 2-44 Catetere attivo in SMA [1].

Nel settore medico, le SMAs hanno trovato impiego anche come miocardio artificiale e dispositivo di supporto artificiale per la circolazione di Fontan (Fig. 2-45).

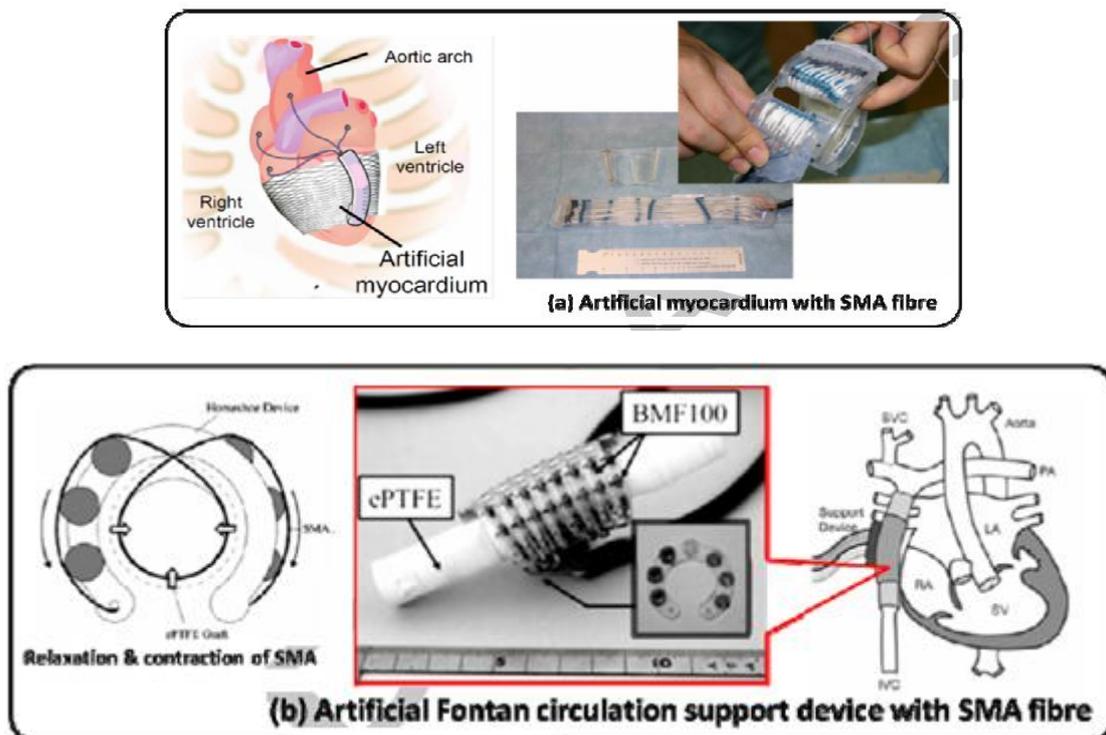


Fig. 2-45 Dispositivi artificiali di supporto per il cuore, realizzati con SMAs [1].

Nell'ambito dei micro-muscoli, diversi progetti sono stati studiati, affiancandosi ai dispositivi robotici. Tra i tanti esempi, si riporta il caso di un micro-muscolo ispirato al movimento (e alla relativa deformazione) di un verme durante il suo avanzamento (Fig. 2-46). Esso viene ricavato da una molla avvolta di NiTi con l'intenzione di sfruttare la resilienza, l'elevata densità di energia, la flessibilità, la capacità di adattamento a nuove dimensioni (effetto scala) e l'attuazione in maniera antagonista. Sembra che questo sistema possa essere il precursore per modelli su media scala con le più svariate applicazioni, non solo in campo medico.

Nel settore ortopedico, un lavoro simile al precedente fu svolto da Stirling et al. [22]; studiarono un impianto morbido per il ginocchio (Fig. 2-46), ma arrivarono alla conclusione che, nonostante le molle in SMA rispondessero alle esigenze di morbidezza ed elevata densità di energia, esse non erano appropriate all'applicazione a causa della lenta risposta nel tempo e alla necessità di una fonte di energia esterna aggiuntiva per un corretto ed efficiente funzionamento.

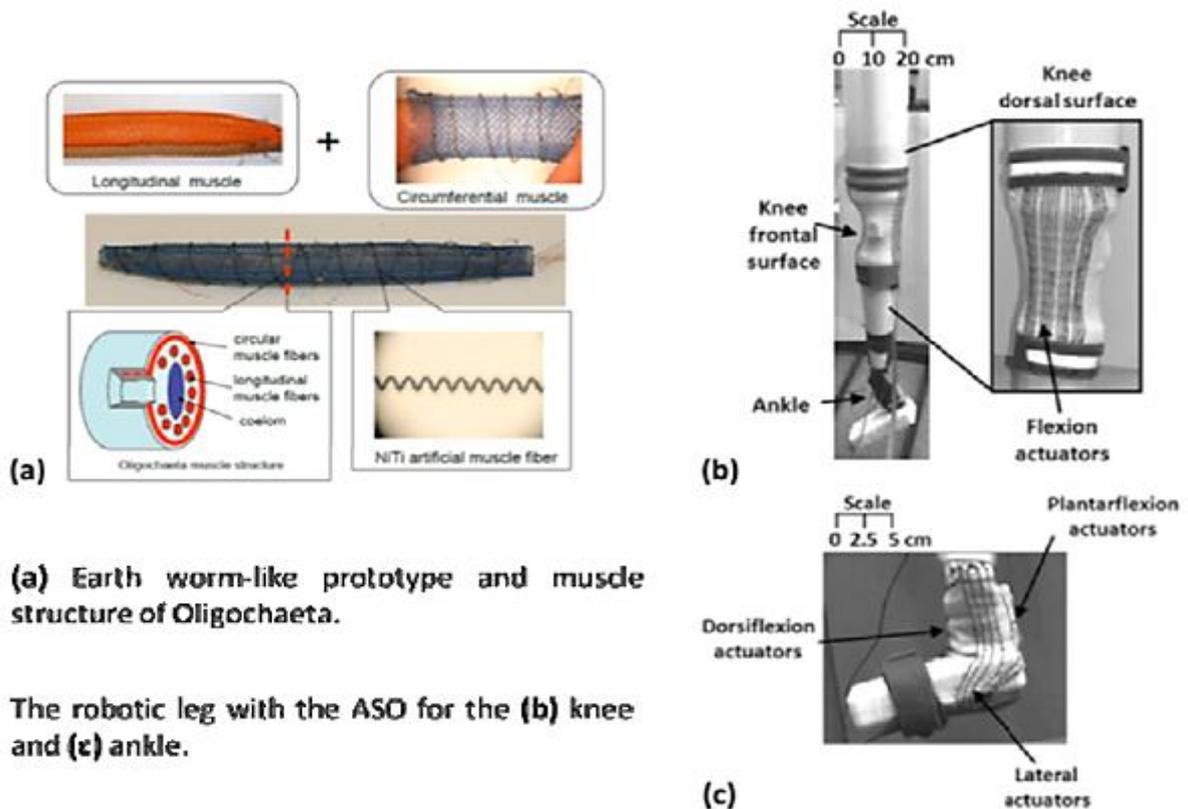


Fig. 2-46 Muscoli artificiali in SMA [1].

Altri dispositivi furono usati come supporto per ossa fratturate, danneggiate o infragilite [11]. Si porta l'esempio di un distanziatore per vertebre (Fig. 2-47) utilizzato come rinforzo e per la prevenzione di movimenti indesiderati durante la fase di guarigione.

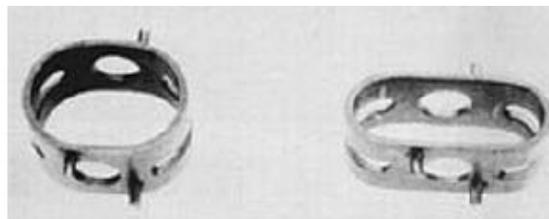


Fig. 2-47 Distanziatore vertebrale in SMA [11].

Sempre nel campo ortopedico, sono state sviluppate delle protesi “a rigidità alterabile” (“alterable stiffness”) che sembrerebbero favorire la guarigione dell’osso, permettendogli un recupero (in termini di carico sopportato) in tempi molto minori. Ad oggi, quest’alterazione è possibile solamente con impianti biodegradabili o con successivi interventi. In alternativa è

stato realizzato un impianto “a rigidità alterabile” in NiTi per alterare la rigidità attraverso induzione di calore senza contatto (Fig. 2-48).

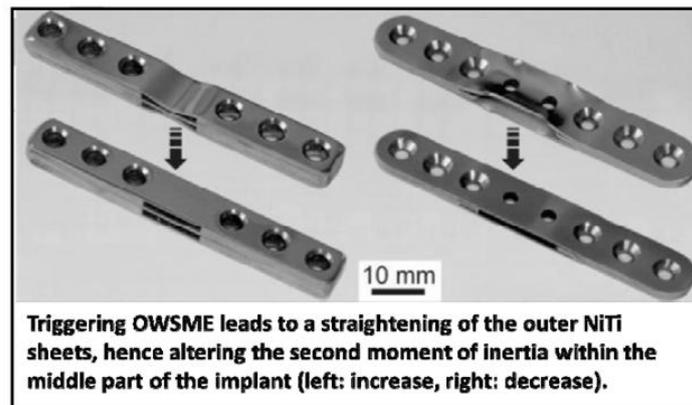


Fig. 2-48 Impianto “a rigidità alterabile” [1].

Altre applicazioni si trovano anche nella sfera chirurgica. Negli ultimi anni, la tendenza è di intervenire nel modo meno invasivo possibile e di ricercare quindi strumenti che possano essere miniaturizzati e inseriti all’interno di appositi cateteri per essere posizionati nella regione in cui si deve intervenire. Le proprietà di memoria di forma e pseudoelasticità rendono le SMAs idonee alla realizzazione di questi strumenti. Tra questi ultimi si trovano pinzette, forbici e tenaglie chirurgiche adoperate nelle procedure laparoscopiche. I fili guida pseudoelastici sono largamente impiegati in chirurgia a causa della loro resistenza all’attorcigliamento e alla superiore flessibilità [11].

Concludendo, le leghe a memoria di forma sono state ampiamente studiate sotto il punto di vista del loro impiego in campo medico, con particolare attenzione alla resistenza a frattura, al comportamento a rottura e alla biocompatibilità. Quest’ultimo è un fattore molto importante, di cui bisogna tener conto soprattutto per le leghe a base nichel. Consapevoli che molte persone sono allergiche al nichel, la ricerca si è rivolta verso materiali alternativi ed è stata posta particolare l’attenzione nei confronti dei polimeri a memoria di forma (SMPs) e dei materiali ibridi a memoria di forma (SMHs).

2.6.5. Applicazioni per l’ingegneria civile

Sfruttando le buone capacità di smorzamento, assorbimento di energia e resistenza a condizioni di carico ripetitive, le leghe a memoria di forma trovano impiego anche nel campo dell’ingegneria civile [1]. Sfruttando appunto queste caratteristiche, sono usate come dispositivi di controllo dello smorzamento e delle vibrazioni su strutture che possono essere soggette a terremoti o severe condizioni atmosferiche (forte vento), su ponti e come rinforzo per strutture in cemento armato.

Un intenso impiego di smorzatori in SMA si registra nell’ambito delle costruzioni antisismiche. Negli ultimi decenni e dopo i recenti eventi sismici, la filosofia di progettazione di tali strutture sta prendendo una direzione differente. Le tecniche passive di controllo si sono dimostrate delle ottime alternative ai tradizionali metodi di design. Dispositivi che

vengono utilizzati tradizionalmente sono di tipo viscoelastico, basati sull'isteresi elastoplastica, viscosi e ad attrito; essi però presentano delle limitazioni che riguardano invecchiamento, durabilità, manutenzione, complessità di installazione e sostituzione e cambiamento della geometria dopo il terremoto. Le leghe a memoria di forma, con le loro proprietà superelastiche, hanno dimostrato interessanti caratteristiche (capacità di smorzamento, resistenza a fatica, poca manutenzione, durabilità, elevata deformazione di recupero, ecc.) che possono essere sfruttate in questo campo, riducendo le precedenti limitazioni.

In questo settore il lavoro di ricerca è basato sulla raccolta di dati sperimentali e i modelli costitutivi sono molto semplici e non riescono ad essere completamente esaustivi nella descrizione del comportamento in queste particolari condizioni.

Facendo un discorso generale, si spiega il concetto che sta alla base di tali smorzatori. È noto, come già detto, che le leghe a memoria di forma esistono in due fasi, austenitica con elevata simmetria, e martensitica presente in diverse varianti. Un altro fattore importante in queste applicazioni è la dipendenza del comportamento della SMA dalla velocità di applicazione del carico. Nel caso dei terremoti, la velocità è elevata e il materiale non ha il tempo di scambiare energia con l'ambiente che lo circonda, causando delle variazioni di temperatura del materiale (processo adiabatico). A fronte di ciò, servirebbe un modello costitutivo capace di tener conto dell'effetto a memoria di forma, della pseudoelasticità, della riorientazione della martensite e dei differenti casi di processo adiabatico o isoterma. È evidente che un tale modello sarebbe eccessivamente complicato e che quindi se ne adottano di altri, più semplificativi e semplici.

In generale, si vuole sfruttare la capacità di dissipazione delle SMAs per diminuire sia la richiesta di resistenza da parte della struttura in esame sia le deformazioni plastiche nei suoi membri. L'abilità di ricentatura invece consente alla struttura di riportarsi nella posizione originale, prima dell'evento sismico, prevenendo l'accumulo di deformazioni inelastiche. Le proprietà di ricentatura possono essere ottenute dalla SMA in fase austenitica, mentre quelle di dissipazione di energia dal comportamento di *detwinning* della martensite.

Diversi studi sono stati condotti su questa tipologia di smorzatori, e come esempio si riporta quello discusso in [23]. Questo lavoro ha portato allo sviluppo di quattro differenti configurazioni che combinano in modi diversi elementi in SMA in fase austenitica e martensitica; lo scopo è quello di cogliere i vantaggi sopradescritti di entrambe le fasi. Lo studio è stato condotto su campioni contenenti diverse percentuali delle due fasi, osservandone gli effetti. Inoltre hanno dimostrato l'influenza della lunghezza e del numero di fili di SMA inseriti nei dispositivi.

Un'interessante osservazione è stata fatta riguardo al danno subito dalla lega a memoria di forma sottoposta a sollecitazioni che simulano un terremoto: dopo le prove eseguite, essa ha dimostrato un danneggiamento praticamente nullo dovuto all'ottimo comportamento a fatica; ciò ha un'influenza sulla manutenzione degli attuatori in quanto non è necessaria una sostituzione dopo l'evento sismico. Lo studio ha permesso di verificare la qualità degli smorzatori a diversi livelli d'intensità del terremoto, evidenziando reazioni diverse solo per eventi molto intensi. Inoltre hanno osservato una notevole diminuzione delle deformazioni residue post-sollecitazione nelle strutture con gli smorzatori integrati.

Una trattazione esauriente riguardo agli attuatori ed il comportamento delle SMAs in queste applicazioni si può trovare in [24].

A causa dei costi elevati che comporta l'uso delle SMAs, esse non hanno avuto molto successo in questo settore, essendo ad oggi più convenienti ancora i materiali tradizionali. C'è però da aggiungere che, visto il veloce sviluppo delle SMAs in diversi campi, un incremento della domanda porterà a una diminuzione dei costi e quindi alla possibilità di impiegarle anche nel settore civile.

Altri fattori che influenzano questa scelta sono la lenta risposta nel tempo, il rilevante consumo di energia necessario all'attivazione (si parla di strutture grandi con sezioni da "attivare" alquanto estese) e infine le difficoltà nella lavorazione meccanica e saldatura.

2.6.6. Applicazioni in dispositivi elettrici e di fissaggio

Le leghe a memoria di forma trovano numerose applicazioni anche nei dispositivi elettrici [2]. Alcune strisce di SMA pretensionate sono inserite all'interno di circuiti elettrici con il ruolo di interromperli automaticamente nel caso vengano surriscaldati. Sono state sviluppate diverse tipologie di sistemi e hanno dimostrato di essere più compatti e semplici rispetto ai tradizionali collegamenti.

Si possono trovare anche piccoli motori elettrici che sfruttano le proprietà delle leghe a memoria di forma (Fig. 2-49). Sono motori lineari dove, scaldando alternativamente le estremità della molla in SMA, viene prodotto un moto reversibile lineare. Il vantaggio di un tale sistema è duplice: da una parte è richiesta potenza elettrica solo per commutare la posizione mediante riscaldamento Joule su un lato della molla e nessun tipo di energia è richiesto per il mantenimento della forma; l'altro vantaggio è che entrambe le posizioni possono essere raggiunte in modo molto preciso e con un'elevata ripetibilità.

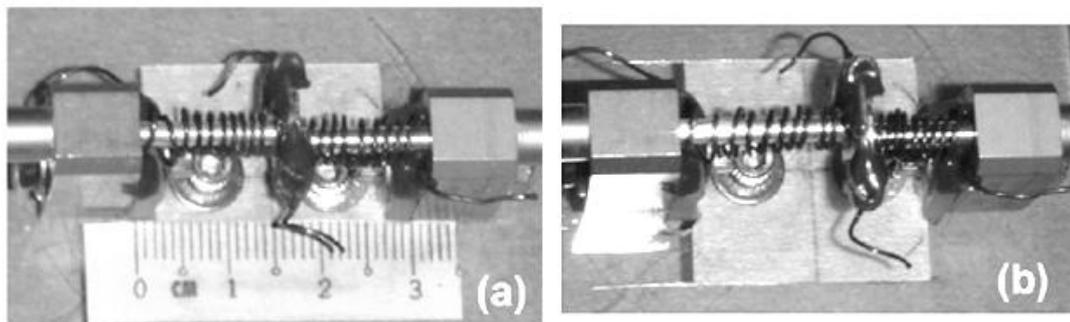


Fig. 2-49 Motore elettrico con due molle in SMA [2].

Contrariamente ai tradizionali giunti pipeline con saldature, gli accoppiamenti con SMAs rappresentano delle validissime alternative. Oltre all'accoppiamento, le leghe a memoria di forma possono essere impiegate per un assemblaggio attivo: la deformazione recuperabile (fino al 5%) può essere utilizzata per assemblare fermamente più componenti. In Fig. 2-50 sono riportati degli esempi in cui dei fili pre-allungati di SMA, con un certo diametro, vengono inseriti in fori di diametro leggermente superiore al loro. Riscaldando gli elementi filiformi essi si espandono (in sezione) garantendo un buon fissaggio.

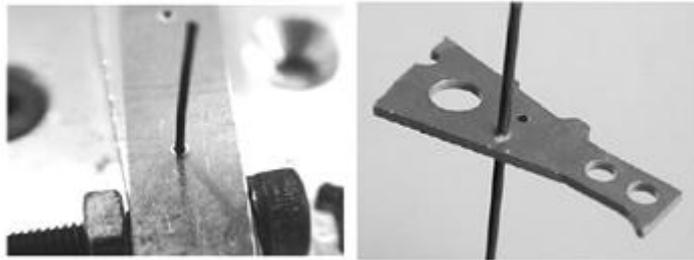


Fig. 2-50 Capacità di fissaggio delle SMAs [2].

Nelle applicazioni per giunti viene sfruttata la capacità dei materiali a memoria di forma di generare una forza di notevole intensità quando il ritorno alla forma ad alta temperatura viene meccanicamente impedito. Il giunto è realizzato con dimensioni tali da presentare, quando si trova nella forma ad alta temperatura, un'adeguata interferenza con le parti da fissare. Per consentire il montaggio, il dispositivo è portato nella fase martensitica mediante refrigerazione e dilatato in modo opportuno. Una volta montato, si fa ritornare il giunto alla temperatura ambiente; in tal modo ha luogo la trasformazione di fase ed esso tende a ritornare alla forma ad alta temperatura; dal momento che questo recupero è impedito dall'interferenza con le parti da fissare, è generata una tensione che realizza l'azione di fissaggio.

La principale differenza dei giunti in SMA rispetto a quelli convenzionali è rappresentata dal persistere dell'azione attiva di serraggio anche dopo la messa in opera. Naturalmente la temperatura di transizione della lega utilizzata deve essere inferiore a quella minima di impiego previsto, per evitare che, a bassa temperatura, possa verificarsi un indesiderato allentamento del giunto stesso.

Questo tipo di giunti è utilizzato da tempo nell'industria aerospaziale per l'accoppiamento di tubi di impianti idraulici (giunti Cryofit e Betalloy, Raychem Corp.); la diffusione è limitata prevalentemente dal costo elevato e dai limiti del campo termico ammesso (tipicamente da -20 °C a +200 °C).

Un impiego analogo a quello della giunzione di condotte idrauliche, di recente introduzione, riguarda il serraggio delle guaine schermanti su connettori e giunti in impianti elettrici di veicoli militari terrestri.

Inoltre, in diverse applicazioni ingegneristiche sono richieste delle piattaforme con molteplici gradi di libertà, ad esempio per il controllo di posizione. La Fig. 2-51 presenta una tale piattaforma nella quale vengono usati 3 fili di NiTi (diametro 0.2 mm) e due molle (ricavate da fili con diametro di 0.5 mm) per garantire la movimentazione. Riscaldando i fili di SMA individualmente o in modo combinato è possibile inclinare la piattaforma nella direzione desiderata. La presenza delle molle aumenta i gradi di libertà, introducendo quelli di torsione.

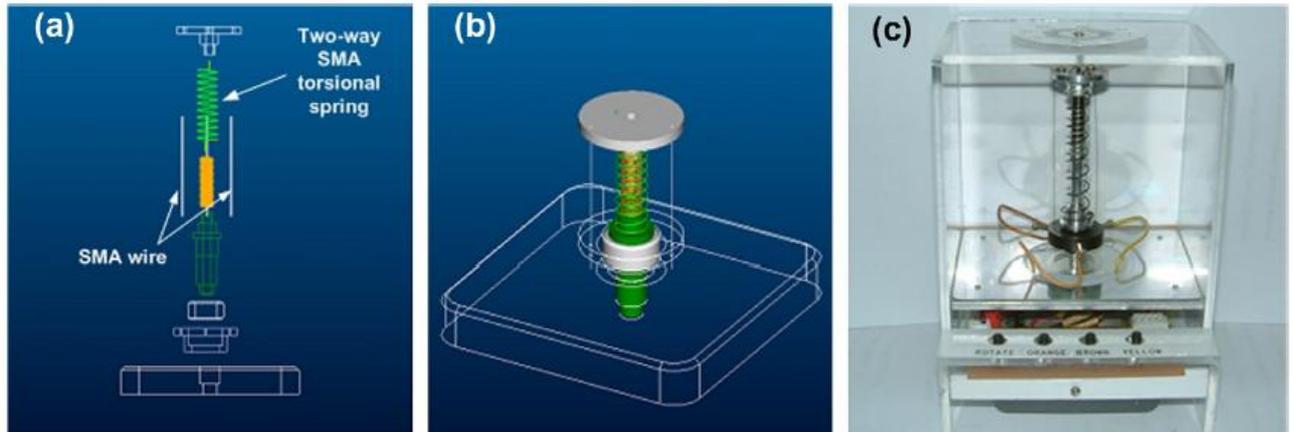


Fig. 2-51 Piattaforma con gradi di libertà multipli, con SMAs [2].

Diverse applicazioni delle SMAs si ritrovano anche nell'ambito della conversione di energia [2].

2.6.7. Attuatori

Come già ripetutamente detto, le SMAs si sono rivelate ideali anche per attuatori elettromeccanici e termici [2] e negli anni si sono sviluppate diverse tipologie (lineari, rotazionali, ecc.). L'impiego delle leghe a memoria di forma ha permesso la realizzazione di componenti più compatti, semplici ed economici rispetto a quelli tradizionali. Gli attuatori sono inseriti nei più svariati settori (da quello aerospaziale a quello degli elettrodomestici) e si propone una panoramica sulle principali caratteristiche e configurazioni.

Tra i principali vantaggi presentati dagli attuatori basati sulle SMA si possono citare:

- semplicità del meccanismo: il dispositivo può essere progettato in modo da sviluppare direttamente l'azione richiesta, senza richiedere elementi di trasmissione e collegamento;
- funzionamento senza attrito, pulito, silenzioso e senza generazione di scintille: non richiedono l'uso di componenti ausiliari basati su fenomeni di attrito (ad es. ingranaggi) e quindi escludono la generazione di polveri; inoltre permettono un funzionamento silenzioso e senza vibrazioni; l'assenza della possibilità di generazione di scintille li rende adatti all'impiego in presenza di sostanze infiammabili;
- elevato rapporto potenza/peso: soprattutto per attuatori di piccole dimensioni e pesi (< 100 [g]).

Per contro, le principali limitazioni risultano essere:

- bassa efficienza energetica: l'efficienza energetica degli attuatori con elementi in SMA risulta fortemente dipendente dalla configurazione adottata e dal tipo di deformazione utilizzata; il caso più favorevole si ha con elementi filiformi caricati a tensione, in quanto questa configurazione consente un ottimale utilizzo del materiale che opera in condizioni di sollecitazione uniformi. Il loro utilizzo è quindi limitato a quelle situazioni in cui l'efficienza non è tra i requisiti fondamentali;

- limitata banda passante (di attuazione): questa limitazione deriva principalmente dalla durata della fase di raffreddamento; infatti, mentre il riscaldamento può avvenire in modo abbastanza rapido (ad esempio applicando una corrente elettrica), il raffreddamento è limitato dalle capacità di smaltire il calore nell'ambiente, generalmente per conduzione e convezione;
- deterioramento e fatica: l'applicazione di sollecitazioni di elevata entità e di deformazioni di rilevante ampiezza possono generare alterazioni nella struttura cristallina; quindi, dove sia richiesto poter realizzare un numero elevato di cicli, risulta necessario operare con livelli di deformazione e sollecitazione ridotti.

In Tab. 2-14 vengono riportati alcuni dati indicativi che confermano gli aspetti vantaggiosi e svantaggiosi appena presentati, mettendo a confronto attuatori realizzati con diversi materiali.

Actuator type	Stress [MPa]	Strain [%]	Efficiency [%]	Bandwidth [Hz]	Work per Volume [J/cm^3]	Power per Volume [W/cm^3]
NiTi SMA	200	10	3	3	10	30
Piezoceramic	35	0.2	50	5000	0.035	175
Single crystal piezoelectric	300	1.7	90	5800	2.55	15000
Human Muscle	0.007-0.8	1-100	35	2-173	0.035	0.35
Hydraulic	20	50	80	4	5	20
Pneumatic	0.7	50	90	20	0.175	3.5

Tab. 2-14 Confronto tra attuatori [1].

Tra le realizzazioni più note si possono citare:

- attuatori in campo aeronautico e aerospaziale;
- sistema di pretensionamento di perni: il pretensionamento del perno viene ottenuto mediante l'espansione, attivata termicamente, di un distanziale in SMA; il pretensionamento viene realizzato senza applicare sforzi di taglio sul perno (*SINTEF Petroleum Research*);
- passaggio a livello per ferromodellismo: l'utilizzo di un attuatore in SMA permette di ottenere una riduzione delle dimensioni e un movimento più realistico rispetto alle versioni attuate con solenoide (Brawa);
- attuatore per serranda di chiusura di un aspiratore: un elemento in SMA operante a flessione, genera il movimento di apertura e chiusura della serranda esterna dell'aspiratore, ed è in grado di mantenerla in posizione chiusa anche in presenza di vento;
- attuatori per la fratturazione della roccia: da utilizzarsi in sostituzione alle cariche esplosive (D'Appolonia S.p.A., Genova).

Un gruppo numeroso di applicazioni riguarda dispositivi che utilizzano per l'attivazione il calore reso disponibile dal processo stesso; si ricordano:

- *concealed* Sprinkler: spruzzatore antincendio con copertura; esso è nascosto da una copertura con funzione estetica che viene mantenuta in posizione da una molla in lega a memoria di forma, che a sua volta ne provoca il distacco ad una temperatura leggermente inferiore a quella di entrata in funzione dello spruzzatore (Viking Corp.);
- valvola di sicurezza termica per impianti di distribuzione gas domestici ed industriali: la valvola interviene, attivata dal calore, in caso di incendio ed interrompe

l'erogazione del gas per prevenire la fuoriuscita dello stesso, che potrebbe alimentare ulteriormente l'incendio;

- dispositivi di sblocco porte tagliafuoco: sono attivabili direttamente dal calore e sono ripristinabili manualmente; quindi possono essere periodicamente sottoposti a verifica di funzionamento;
- thermoloc ®: è un sistema di chiusura di sicurezza per contenitori da sterilizzazione; l'attivazione del blocco può essere ottenuta solamente sottoponendo il contenitore al processo di sterilizzazione. All'apertura del contenitore il blocco viene disattivato; al blocco è associata una segnalazione che indica la condizione sigillato-non sigillato (Wagner);
- chiusura di sicurezza per forni: utilizza una coppia di molle contrapposte, una in materiale convenzionale e una in SMA, per azionare il perno di chiusura. A bassa temperatura prevale l'effetto della molla convenzionale, mentre ad alta temperatura prevale l'effetto della molla in SMA, portando il perno in posizione di chiusura;
- interruttore termico per bollitore: la molla in lega a memoria di forma che aziona l'interruttore elettrico della resistenza è attivata dal vapore prodotto quando l'acqua raggiunge la temperatura di ebollizione;
- dispositivo di regolazione della temperatura dell'aria aspirata per motori a combustione interna: l'azionamento di questi componenti è tipicamente realizzato mediante termoattuatori a paraffina; l'utilizzo di una molla in SMA permette di migliorare il tempo di risposta e la precisione di regolazione;
- valvola automatica per macchina da caffè: la valvola è azionata da una molla in NiTi che ne attua l'apertura quando l'acqua ha raggiunto una predefinita temperatura, in modo che si mescoli alla polvere di caffè nelle condizioni ottimali (Carioca, Japan).
- MemorySafe ®: dispositivo di sicurezza per impedire l'erogazione di acqua a temperatura troppo elevata in impianti sanitari; l'attivazione è prodotta dal riscaldamento dell'attuatore in SMA, indotto dal fluido stesso;
- FireCheck ®: Sistema di intercettazione di emergenza, in caso di incendio, di linee di alimentazione di combustibili controllate da valvole pneumatiche;
- sistema di compensazione della viscosità dell'olio: sistema sviluppato per compensare l'effetto della variazione di temperatura dell'olio nelle trasmissioni automobilistiche (Daimler-Benz, Germany);
- attuatori automatici di sistemi di aereazione: elementi in SMA sono utilizzati in diverse applicazioni per la movimentazione delle serrande di sistemi di aereazione in modo automatico e controllato dalla temperatura ambiente.

2.6.8. Applicazioni sportive

Anche nel settore sportivo si possono trovare alcuni esempi di utilizzo delle leghe a memoria di forma, dall'abbigliamento tecnico all'attrezzatura [1]. Esse sono adatte a rispondere a requisiti di smorzamento delle vibrazioni, leggerezza e compattezza.

Un primo esempio è fornito da una pallina da golf con rivestimento in SMA che provvede a rinforzare l'interno, migliorando le resilienza della palla dando come risultato una maggior distanza di lancio. Rimanendo sempre nel mondo del golf, è stata anche realizzata una mazza

con la superficie d'urto rivestita da SMA in modo che possa cambiare forma e adattarsi ai diversi tipi di lancio.

Applicazioni simili a quelle del golf si possono ritrovare nel tennis, baseball, sci, ecc.

L'inserimento di sottili fili in lega a memoria di forma all'interno di indumenti e calzature può migliorare notevolmente il comportamento degli stessi in termini di resistenza, assorbimento delle vibrazioni ed anche di capacità di *sensing*.

Anche nella pesca s'incontrano elementi in SMA, ad esempio nei fili da pesca. Utilizzando questi materiali si ottiene una maggior resistenza alla corrosione rispetto all'acciaio, e una miglior resistenza alla recisione (da parte dei denti dei pesci) rispetto al nylon; a parità di resistenza, i fili in SMAs richiedono una minor sezione. Inoltre essi presentano un'ottima resistenza all'attorcigliamento.

Le applicazioni sportive per ora sono limitate a livelli altamente specializzati a causa degli elevati costi, ma se dovessero abbassarsi, questo settore è ricco di dispositivi che potrebbero sfruttare al meglio le proprietà uniche delle leghe a memoria di forma.

2.6.9. Altre applicazioni

Le leghe a memoria di forma non hanno attratto solamente l'interesse della comunità ingegneristica, ma anche quello di altri settori quali quello commerciale, artistico, della moda, degli schermi tattili, ecc. [1].

Ad esempio, le SMAs sono state impiegate per realizzare delle sculture con la capacità di muoversi o dei fiori artificiali che "sbocciano" quando toccati da un uomo (attraverso la percezione del calore umano).

Nella moda, sono state impiegate per creare degli indumenti che, se deformati assumo un aspetto stropicciato che svanisce anche solo scaldandoli con un fon.

Nel settore commerciale e dei prodotti di massa, si possono trovare le seguenti applicazioni:

- montature degli occhiali;
- antenne per telefonini;
- ferretti per reggiseni.

Il vantaggio nell'utilizzo delle SMAs in questi componenti sta nella loro capacità di recuperare perfettamente la forma iniziale, anche dopo grandi deformazioni. Inoltre, per quanto concerne il settore dell'abbigliamento, esse garantiscono una notevole confortevolezza.

Tuttavia, a confronto degli altri campi, la percentuale delle applicazioni commerciali delle SMAs che hanno avuto successo è molto bassa e il maggiore loro utilizzo rimane nella sfera ingegneristica.

2.7. Modellazione

2.7.1. Introduzione

La simulazione è diventata un importante step nella progettazione di un componente di interesse ingegneristico [2]. La modellazione dei materiali, come già detto, è una parte

fondamentale delle simulazioni e una conoscenza approfondita del comportamento del materiale è necessaria. Per fare ciò è indispensabile avere a disposizione un gran numero di dati ottenuti, su larga scala, da prove sperimentali.

Ad oggi, è ragionevole affermare che la conoscenza che sta alla base dell'effetto a memoria di forma degli SMMs a livello microscopico è stata più o meno confermata e accettata. Tuttavia, in termini di precisione nella modellazione del comportamento a memoria di forma, ad un livello microscopico, la ricerca è ancora un po' in ritardo e molto vi è ancora da studiare.

La maggior parte dei dati che si possono trovare in letteratura riguarda le leghe a memoria di forma, che sono tra i materiali *SMART* più diffusi. Tuttavia, è raro trovare un set di parametri e dati specifici di un certo materiale che valgono per tutti i tipi di condizioni operative. Inoltre, è abbastanza difficile recuperare queste informazioni in un dominio pubblico, dal momento che esse vengono coperte o dalle aziende stesse o da segreto militare.

A differenza dei materiali tradizionali per i quali sono facilmente disponibili dei cataloghi con tutte le proprietà caratteristiche necessarie, per gli SMMs la situazione è completamente differente. Inoltre si ribadisce come non vi sia ancora una standardizzazione a livello internazionale che riguardi i materiali a memoria di forma. Sicuramente la caratterizzazione degli SMMs è molto più complicata dei materiali tradizionali, ma si rende indispensabile se si pensa di inserire in modo intensivo questi materiali nello scenario ingegneristico.

Nella maggior parte dei casi, se è vero che per i materiali a memoria di forma più diffusi le temperature di trasformazione e i valori delle deformazioni massime sono disponibili, tutti gli altri parametri di caratterizzazione devono essere ricavati dal singolo utilizzatore. E questo purtroppo indica una grande limitazione, sia in termini di conoscenza sia di tempo, e può portare anche ad una serie di fraintendimenti tra i vari esperti del settore.

Solitamente i modelli costitutivi sono formulati su tre differenti livelli a seconda della scala considerata: micro-scala, meso-scala e macro-scala. Nel primo caso si considerano gli effetti a livello microscopico come la nucleazione, il moto dell'interfaccia, la conformazione dei costituenti, ecc.; vengono invece trascurati gli effetti delle frazioni di volume delle fasi costitutrici. Attraverso opportune tecniche di omogeneizzazione si passa dal livello microscopico a quello macroscopico. I modelli su macro-scala considerano quantità macroscopiche e descrivono il comportamento globale del materiale.

Ovviamente ogni approccio presenta pro e contro. I modelli macroscopici in generale sono più semplici da utilizzare e permettono una veloce implementazione nei programmi di analisi. D'altra parte, essi sono spesso limitati da un punto di vista della previsione. Per i modelli su micro-scala vi è la necessità di un maggior numero di variabili, ma la capacità predittiva è migliore. Questi ultimi però impiegano un tempo di computazione elevato, diventando di difficile utilizzo nelle applicazioni ingegneristiche. Si capisce come la scelta del modello costitutivo dipenda dalla particolare applicazione e dai fini dello studio in esecuzione.

Per quanto riguarda le leghe a memoria di forma, sono stati sviluppati moltissimi modelli costitutivi per descrivere il loro comportamento termomeccanico. In letteratura se ne trova una classificazione, che li suddivide nelle seguenti categorie [2]:

- modelli fenomenologici basati su dati di stress-deformazione-temperatura uniassiali;

- teoria sul non-equilibrio termostatico che descrive i percorsi termodinamici di una SMA;
- modelli basati sull'interazione dei differenti gruppi di atomi presenti nella lega;
- modelli derivati da speciali formulazioni sull'energia libera;
- modelli basati sulle leggi della termodinamica;
- leggi costitutive basate su un modello di isteresi;
- modelli basati sulla teoria termoplastica non lineare, sulla plasticità generale o sulla teoria viscoplastica;
- modelli matematici per il moto delle fasi limite;
- modelli derivati dalla deformazione della struttura cristallina durante le trasformazioni di fase;
- leggi costitutive che tengono conto della deformazione microstrutturale durante la trasformazione di fase e del concetto di energia libera, adoperando un approccio o sulla dissipazione di energia o sul bilancio energetico.

Nonostante tutti questi modelli siano stati sviluppati più di una decina di anni fa, essi sono tuttora in uso, anche se molti altri studi sono stati condotti e svariati nuovi materiali sono stati inseriti nello scenario ingegneristico. Il recente libro edito da Lagoudas [14] si presenta come ottimo riferimento per i vari modelli sviluppati, soprattutto a livello teorico.

In questi modelli, importante è la conoscenza della microstruttura del materiale e molte sono le difficoltà che s'incontrano nel definire i molteplici parametri coinvolti. La cosa si complica molto nei materiali policristallini, dove vi è la presenza di più fasi e trasformazioni. In generale, da un punto di vista delle applicazioni ingegneristiche, l'approccio più pratico e produttivo per la modellazione è basato sulla fenomenologia.

Come già detto, attraverso la modellazione si deve essere in grado di spiegare e riprodurre il comportamento dei materiali, determinando le funzioni di trasformazione, le superfici di snervamento per definire i criteri di *failure*, avendo sempre come base un gran numero di dati sperimentali, valutati sia in controllo di spostamento sia di temperatura per assicurare una buona accuratezza dei risultati.

Per estendere un modello monodimensionale a uno multidimensionale si devono conoscere le curve di snervamento del materiale (come anche per i materiali tradizionali). Dai molti risultati sperimentali si osserva come per le SMAs vi sia una rilevante differenza tra il comportamento a trazione e a compressione. Per esse si è inoltre dimostrato come non valgano i criteri già sviluppati per i materiali tradizionali, ad esempio Von Mises o Tresca, e che vi sia stata dunque la necessità di svilupparne di appositi. Per maggiori dettagli si rimanda a [2] e [11].

La teoria delle curve di snervamento ha dimostrato d'essere valida per la previsione del comportamento delle leghe a memoria di forma, per diverse condizioni di carico; inoltre risulta l'approccio migliore da seguire per le semplici applicazioni ingegneristiche.

Nelle teorie più semplici, o per un primo approccio di previsione, si assume che le proprietà della lega a memoria di forma siano indipendenti dalla specifica fase. Nella realtà però, ciò

non è vero e le proprietà dell'austenite possono differire anche di molto rispetto a quelle della martensite. L'influenza della differenza tra i moduli di Young delle fasi può influire notevolmente sulle curve di snervamento e se ne deve tener conto in quegli stadi di progetto dove è richiesta un'elevata accuratezza e affidabilità.

Inoltre si sottolinea come le superfici di snervamento dipendano non solo dalla temperatura di prova, ma in generale dall'intera storia termica del materiale (riscaldamenti e raffreddamenti).

Dalle osservazioni appena fatte si nota come l'argomento sia molto complesso e articolato e che la conoscenza approfondita del materiale sia necessaria per garantire una sua affidabile modellazione.

Di seguito si analizzano tre modelli costitutivi indicativi che vengono impiegati nella pratica comune: il modello sviluppato da Turner e quelli studiati da Auricchio.

2.7.2. Modello costitutivo di Turner

Il modello di Turner è stato sviluppato presso il NASA Langley Research Center nel 2001 [25-29].

È di carattere macroscopico e rinuncia alla capacità di predizione del complesso comportamento che caratterizza questo genere di materiali; generalmente perciò risulta più restrittivo rispetto a molte altre leggi, ma ha da parte sua l'innegabile vantaggio della semplicità di utilizzo e implementazione all'interno di codici ad elementi finiti, richiedendo l'inserimento di poche proprietà ingegneristiche fondamentali.

Questo genere di approccio era stato originariamente pensato per la progettazione di laminati in composito al cui interno ci fosse la possibilità d'inglobamento di attuatori costituiti da leghe a memoria di forma. In generale però, può anche essere utilizzato per le singole SMAs.

Si sottolinea come queste leggi siano valide per il processo di attivazione della SMA e non per quello di raffreddamento e per il comportamento in fase martensitica. In questo lavoro di tesi si è considerata solo la fase di attuazione delle SMAs, quindi si porrà l'attenzione solamente su questo processo, analizzandone il modello costitutivo affine. Per il caso di raffreddamento e della martensite si faccia riferimento a [10].

Riprendendo quindi il modello relativo all'attivazione, esso si basa sulla rappresentazione della contrazione dovuta alla trasformazione austenite-martensite, attraverso la definizione di coefficienti di dilatazione termica equivalente. Il legame termoelastico non lineare si basa sulla definizione della deformazione totale:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{th} + \varepsilon_m + \varepsilon_p \quad (\text{Eq. 1})$$

dove ε_e è la deformazione elastica, ε_{th} quella termica, ε_e è la deformazione dovuta alla trasformazione di fase mentre ε_p è quella legata alla fase plastica.

In prima approssimazione è possibile trascurare la deformazione plastica, mentre il legame costitutivo che genera la deformazione elastica è dato dalla seguente espressione:

$$\varepsilon_e = \frac{1}{E(T)} \sigma \quad (\text{Eq. 2})$$

dove E rappresenta il modulo elastico del materiale, T è la temperatura assoluta.

È inoltre possibile assemblare in un solo termine la deformazione termica e quella martensitica, definendo un unico coefficiente di espansione termica efficace (*effective coefficient of thermal expansion*, ECTE) non lineare che, moltiplicato per la variazione di temperatura, fornisca il valore

aggregato della deformazione derivante dalla vera e propria dilatazione termica e della deformazione associata alla trasformazione di fase. In particolare, considerando la temperatura d'inizio trasformazione in fase austenite A_s come punto di separazione per quanto riguarda la determinazione del comportamento della lega, è possibile scrivere:

$$\varepsilon_{TH}(T) = \varepsilon_{th} + \varepsilon_M = \alpha_E(T)(T - T_0) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{per } T < A_s \quad \varepsilon_{TH}(T) = \varepsilon_{th} = \alpha_M(T - T_0) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\text{per } T = A_s \quad \varepsilon_{TH}(T) = \varepsilon_{th}(T) = \alpha_M(A_s - T_0) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\text{per } T = A_s \quad \varepsilon_{TH}(T) = \varepsilon_{th} = \alpha_M(A_s - T_0) \quad (\text{Eq. 6})$$

Dalla relazione (Eq. 6), rappresentativa della trasformazione della lega, è possibile ricavare per inversione il coefficiente di espansione termica efficace:

$$\alpha_E(T) = \frac{\varepsilon_{TH}(T) + \alpha_M(T_0 - A_s)}{T - A_s} \quad (\text{Eq. 7})$$

La formula precedente consente di definire un coefficiente di dilatazione efficace in grado di modellare la deformazione durante la trasformazione di fase.

Per la calibrazione del modello, Turner [36-40] ha proposto tre prove sperimentali:

- prove al calorimetro differenziale (DSC);
- prove *isothermal*;
- prove *isolength*.

La prima prova è utilizzata per la determinazione della temperatura di inizio trasformazione in fase austenite (A_s) e consiste nell'utilizzo della calorimetria a scansione differenziale la quale, misurando la differenza di flusso di calore emesso ed assorbito tra un campione ed un riferimento inerte entrambi sottoposti al medesimo ambiente, ne ricava le temperature corrispondenti ai passaggi di fase del campione.

Le altre prove sperimentali sono utilizzate per ricavare i due termini dell'equazione:

$$\varepsilon_{TH}(T) = \frac{\sigma_{rec}(T)}{E(T)} \quad (\text{Eq. 8})$$

Attraverso la prova denominata *isothermal* sono ricavati i moduli elastici del materiale eseguendo prove di trazione a temperatura costante e ripetendo la prova per ogni temperatura desiderata. Infine l'ultimo test permette di ricavare lo sforzo di recupero, ovvero lo tensione che la lega è in grado di esercitare nel passaggio tra la fase martensite e quella austenite; viene

eseguito vincolando il provino alle traverse di una macchina in cui è presente una cella di carico. Mantenendo costante la posizione dei due lembi, viene dunque registrato lo sforzo che esso genera quando attivato sotto condizioni d'incastro.

Avendo a disposizione le quantità mancanti è possibile ricavare tramite la sopra citata relazione Eq.7 l' $E(T)$ che permette di modellare il comportamento del materiale se sottoposto a effetti esterni.

Le prove sperimentali per la calibrazione possono essere diverse da quelle usate da Turner in modo da poterle adeguare alle specifiche esigenze.

È importante sottolineare come, considerando il codice MSC Patran/Nastran, esso utilizzi i coefficienti di dilatazione termica. In generale, infatti, sono due le formulazioni possibili:

- tangente: $\frac{dL}{L} = d\varepsilon = \alpha_t dT$;
- secante: $\frac{L-L_0}{L_0} = \varepsilon = \alpha_s (T - T_0)$.

Le loro differenze sono ben comprensibili in Fig. 2-52. Entrambe le formulazioni possono essere utilizzate nei codici FEM, ma è fondamentale, per la corretta calibrazione del modello mediante le equazioni Eq. 7 o Eq.8, conoscere quella usata dal codice.

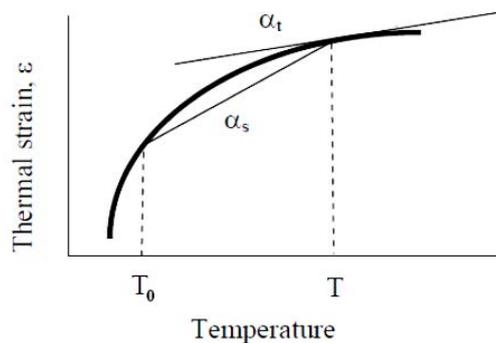


Fig. 2-52 Differenza tra CTE tangente e secante [10].

La formulazione tangente è conveniente nelle analisi esplicite non lineari in cui le proprietà dei materiali sono calcolate istantaneamente e di conseguenza uno stato di riferimento, come presente in quella secante (temperatura T_0), non è necessario.

Per l'implementazione di questo modello in MSC Patran e MSC Nastran è necessario dunque avere a disposizione i valori delle principali caratteristiche dei materiali in funzione della temperatura. Inoltre è necessaria un'opportuna modifica del file .bdf in modo da permettere la lettura delle tabelle contenenti i parametri materiali in funzione della temperature. Per maggiori dettagli su come editare il file e impostare le analisi ci si può riferire a [30] e [31].

2.7.3. Modelli costitutivi di Auricchio

Nei prossimi due paragrafi si analizzeranno due fra i più rilevanti modelli costitutivi che riguardano le leghe a memoria di forma, sviluppati da Auricchio [32-33]. La loro importanza

è dovuta al fatto che essi sono implementati direttamente all'interno dei più comuni codici per l'analisi agli elementi finiti, tra cui anche MSC Patran e MSC Marc Mentat.

Auricchio, riferendosi al Nitinol, ha sviluppato un modello relativo all'effetto a memoria di forma, quello termomeccanico, e uno relativo alla superelasticità, modello meccanico. Quest'ultimo considera le trasformazioni di fase come indotte dalle tensioni imposte sul materiale, mentre il primo aggiunge l'effetto della temperatura come causa delle trasformazioni di fase.

2.7.3.1. Modello termomeccanico

Come si è avuto già modo di spiegare, le leghe a memoria di forma esibiscono una trasformazione reversibile tra una fase ordinata austenitica alle alte temperature ed una martensitica alle basse temperature. Le variazioni di densità e quindi di volume sono piccole, dell'ordine di 0.003. Le deformazioni di trasformazione, maggiormente di tipo deviatorico, sono dell'ordine di 0.07-0.085. Tuttavia, nella fenomenologia, queste piccole deformazioni di dilatazione non portano necessariamente ad una mancanza di sensibilità alla pressione. Si ripete inoltre come il comportamento delle SMAs sia differente a differenza che esse siano sottoposte a tensione o compressione idrostatica.

La fenomenologia è rappresentata in Fig. 2-53.

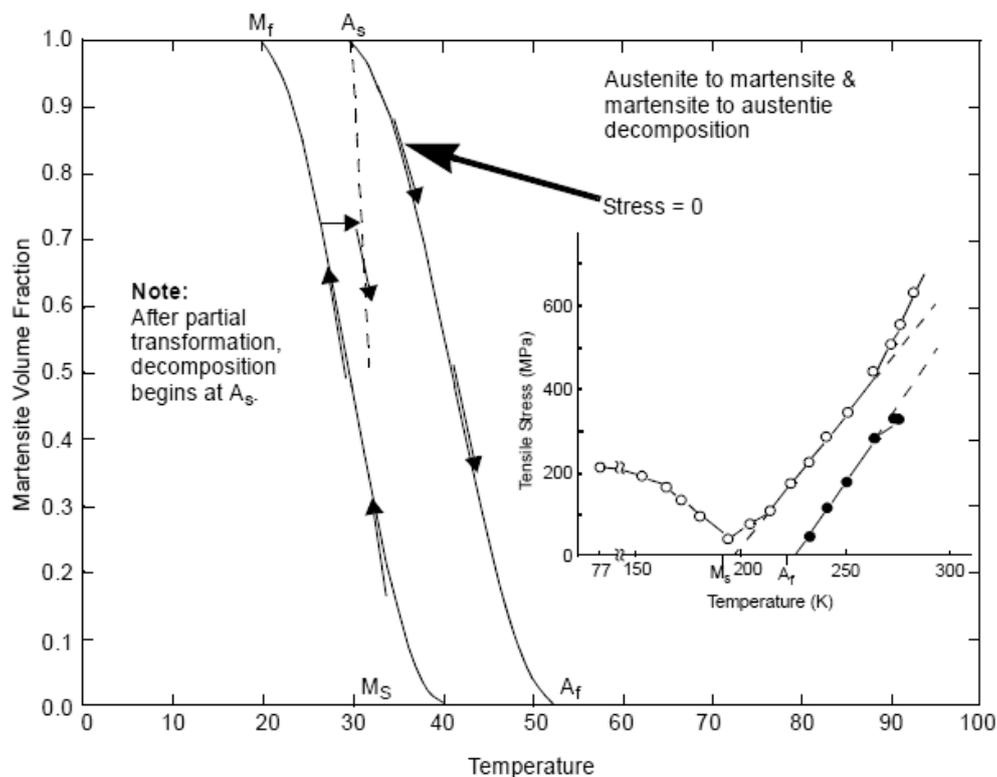


Fig. 2-53 Trasformazioni austenite-martensite e martensite-austenite [34, vol. A].

Le curve indicano che a seguito di un raffreddamento, la trasformazione da austenite a martensite inizia una volta raggiunta la M_s . Dopo un ulteriore raffreddamento, la frazione di volume della martensite è una funzione data della temperatura, e diventa il 100% quando si

raggiunge la M_f . Dopo il riscaldamento, la trasformazione da martensite ad austenite ha inizio solo dopo A_s . questa trasformazione si completa al raggiungimento di A_f . Inoltre, si ricordi che le quattro temperature di trasformazione dipendono dallo stato tensionale. I dati sperimentali mostrano che M_s , M_f , A_s e A_f possono essere approssimate con i rispettivi valori riferiti al caso senza stress, M_s^0 , M_f^0 , A_s^0 ed A_f^0 e definiti dalle espressioni:

$$M_s = M_s^0 + \frac{\sigma_{eq}}{C_m} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$M_f = M_f^0 + \frac{\sigma_{eq}}{C_m} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$A_s = A_s^0 + \frac{\sigma_{eq}}{C_a} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$A_f = A_f^0 + \frac{\sigma_{eq}}{C_a} \quad (\text{Eq. 12})$$

dove σ_{eq} è la tensione equivalente di von Mises, e C_a , C_m sono opportuni coefficienti per l'austenite e la martensite rispettivamente, che permettono di esprimere la dipendenza delle temperature di trasformazione dalla tensione.

Si sottolinea, come già spiegato, che ad una temperatura sufficientemente elevata, spesso detta M_d , la trasformazione in martensite non avviene a nessun livello di tensione.

Inoltre, si tenga presente che le caratteristiche di trasformazione dipendono sia dalla specifica composizione della lega che dai trattamenti termici subiti.

Per i dettagli teorici sull'effetto a memoria di forma e sulla superelasticità si rimanda al paragrafo 2.2.

La teoria costitutiva formulata da Auricchio si basa sulla cinematica delle piccole deformazioni, sebbene l'estensione alle grandi deformazioni sia semplice. Di conseguenza, la deformazione incrementale $\Delta\varepsilon$ è semplicemente la somma dei seguenti contributi:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^{el} + \Delta\varepsilon^{th} + \Delta\varepsilon^{pl} + \Delta\varepsilon^{ph}$$

dove:

- $\Delta\varepsilon^{el}$ deformazione incrementale elastica;
- $\Delta\varepsilon^{th}$ deformazione incrementale termica;
- $\Delta\varepsilon^{pl}$ deformazione viscoplastica incrementale;
- $\Delta\varepsilon^{ph}$ deformazione incrementale associata alle trasformazioni termoelastiche di fase.

$\Delta\varepsilon^{el}$ è semplicemente correlata ad una serie di moduli elastici L e alla variazione incrementale dello stress di Cauchy $\Delta\sigma$ attraverso la relazione:

$$\Delta\sigma = L\Delta\varepsilon^{el} \quad (\text{Eq. 13})$$

Per il calcolo del coefficiente di espansione termica del composito viene utilizzata la regola delle mescolanze:

$$\alpha = (1 - f)\alpha^A + f\alpha^M \quad (\text{Eq. 14})$$

dove gli apici A e M si riferiscono rispettivamente ai valori relativi all'austenite e alla martensite e f rappresenta la frazione di volume della martensite.

Come notato precedentemente, le deformazioni indotte dalla trasformazione di fase sono il risultato della formazione di martensite orientata e indotta da stress e dalla riorientazione di martensite indotta termicamente disposta in modo random. Per tener conto di questo, $\Delta\varepsilon^{pl}$ viene espresso come:

$$\Delta\varepsilon^{pl} = \Delta\varepsilon^{TRIP} + \Delta\varepsilon^{TWIN} \quad (\text{Eq. 15})$$

dove:

$$\Delta\varepsilon^{TRIP} = \Delta f^{(+)} g(\sigma_{eq}) \varepsilon_{eq}^T \frac{3}{2} \frac{\sigma'}{\sigma_{eq}} + \Delta f^{(+)} \varepsilon_V^T I + \Delta f^{(-)} \varepsilon^{ph} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\Delta\varepsilon^{TWIN} = f \Delta g(\sigma_{eq}) \varepsilon_{eq}^T \frac{3}{2} \frac{\sigma'}{\sigma_{eq}} + \{\sigma_{eq}\} \{\sigma_{eq} - \sigma_{eq}^g\} \quad (\text{Eq. 17})$$

dove $\Delta f = \Delta f^{(+)} + \Delta f^{(-)}$ e $\{ \}$ rappresentano le parentesi di McCauley:

$$\{x\} = \frac{1}{2} \left(\frac{x+|x|}{|x|} \right), \quad x \neq 0 \quad (\text{Eq. 18})$$

Nell'equazione (Eq. 16), $\Delta f^{(+)}$ rappresenta la velocità alla quale la martensite si è formata, ε_{eq}^T è il modulo della parte deviatorica della deformazione di trasformazione, mentre ε_V^T ne rappresenta la parte volumetrica.

La fenomenologia della trasformazione delle SMAs è tale per cui l'allineamento della martensite varia con lo stress deviatorico dominante. La funzione $g(\sigma_{eq})$ è descritta schematicamente in Fig. 2-54 ed è una misura del grado di allineamento alla quale le deformazioni di trasformazione della martensite si attesta con lo stress deviatorico applicato. La funzione può essere calibrata con dati sperimentali. Lo stress equivalente è definito da:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma^d : \sigma^d} \quad (\text{Eq. 19})$$

dove σ^d è lo stress deviatorico.

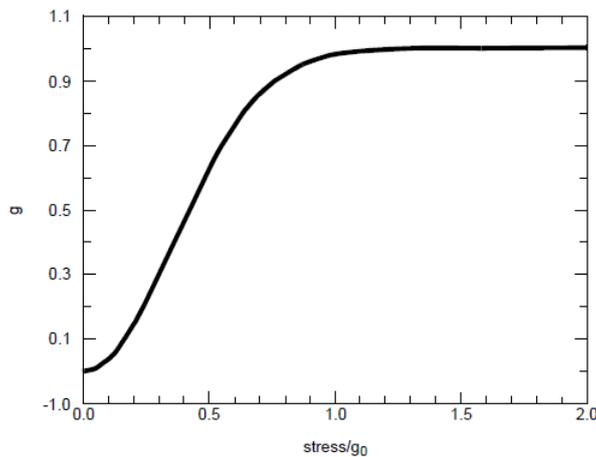


Fig. 2-54 Funzione $g(\sigma_{eq})$ [34, vol. A].

I primi due termini dell'Eq. 17 descrivono lo sviluppo delle deformazioni indotte da trasformazione dovute alla formazione di martensite indotta da stress (parzialmente orientata). $\Delta f^{(-)}$ è la variazione della formazione di austenite; ε^{ph} rappresenta il recupero della deformazione di trasformazione di fase accumulata.

Riconsiderando la funzione g , in MSC Marc è stata implementata una forma funzionale che garantisce un buon fit dei dati sperimentali:

$$g(\sigma_{eq}) = 1 - \exp \left[g_a \left(\frac{\sigma_{eq}}{g_0} \right)^{g_b} + g_c \left(\frac{\sigma_{eq}}{g_0} \right)^{g_d} + g_e \left(\frac{\sigma_{eq}}{g_0} \right)^{g_f} \right] \quad (\text{Eq. 20})$$

In molti casi il primo termine è sufficiente, e valori di $g_a < 0$ e $g_b = 2$ forniscono i migliori risultati. g_0 è un livello di stress impiegato per rendere adimensionali le costanti e può essere scelto in modo che $g \rightarrow 1$ quando $\sigma_{eq} \rightarrow g_0$. In certi casi, per garantire un miglior fit dei dati, si deve includere anche le potenze di ordine maggiore e i valori consigliati sono $g_d = 2,55$ o $2,75$ e $g_e = 3$. Si sottolinea che $0 \leq g \leq 1$ e che dovrebbe essere una funzione monotona crescente. In Marc viene quindi fornito un parametro di *cut off* tale per cui, quando g raggiunge il valore massimo g^{max} al livello di stress $\sigma_{eq} = \sigma_{max}^g g_0$, esso viene poi mantenuto costante a g^{max} .

Le proprietà e il comportamento di trasformazione/riorientazione del Nitinol dipendono dalla chimica della lega, dalla sua microstruttura e dai processi termici a cui è stata sottoposta. Ogni volta che uno dei parametri precedenti viene modificato, la calibrazione deve essere ripetuta. La calibrazione dei dati sperimentali riguardanti il Nitinol è migliore quando i provini sono inizialmente al 100% di austenite. Le proprietà che richiedono la calibrazione sono:

- le temperature di trasformazione non sotto stress M_s^0 , M_f^0 , A_s^0 ed A_f^0 ;
- i coefficiente C_m e C_a ;
- le costanti elastiche E^M , E^A , ν^M e ν^A ;
- i coefficienti di espansione termica α^M e α^A ;
- la funzione $g(\sigma_{eq})$;
- le tensioni di snervamento delle fasi martensite e austenite σ^M , σ^A ;
- le deformazioni di trasformazione ε_{eq}^T , ε_v^T .

Per quanto riguarda la calibrazione della funzione g , la strategia più diretta e precisa è quella di fittarla sulla curva stress uniassiale vs. deformazione per la martensite orientata casualmente, condotta ad una temperatura sotto M_f^0 (Fig. 2-55). La curva continua rappresenta i dati realmente registrati, mentre quella tratteggiata rappresenta la curva di fit. ϵ_{eq}^T è la deformazione deviatorica di trasformazione equivalente. Spesso si osserva l'esistenza di un livello soglia dello stress equivalente sotto il quale non avviene il *detwinning* e viene identificato con σ_{eff}^g . Il valore della funzione g rispetto a questo stress è $g_{eff} = g(\sigma_{eff}^g)$. Dall'Eq. 17 si vede come la deformazione di *twinning* sia zero quando $\sigma_{eq} < \sigma_{eff}^g$. Inoltre, è stato dimostrato dalla pratica che la funzione g tende a 1 per un valore finito del livello di stress equivalente detto σ_0^g . Per definizione $g(\sigma_0^g) = 1$. Solitamente, una buona approssimazione per g_0 è offerta dall'espressione $g_0 = 2\sigma_{eff}^g \sim 10\sigma_{eff}^g$, ma dipende molto dalle misurazioni sperimentali effettuate.

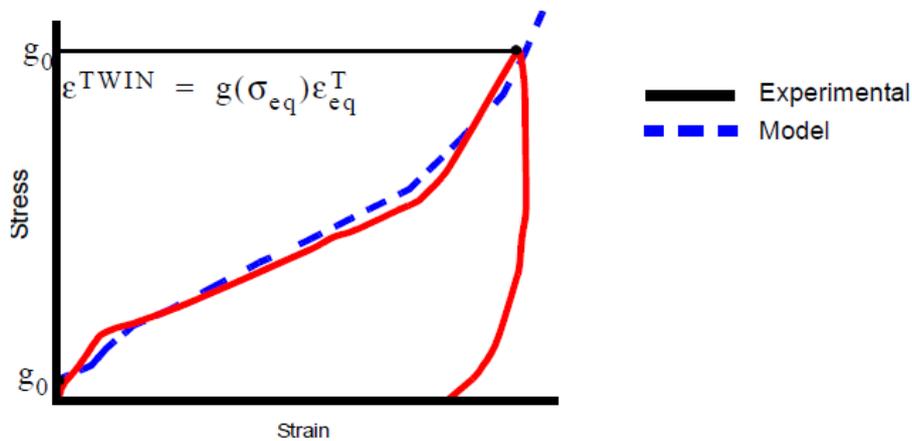


Fig. 2-55 Tipica curva stress-strain per un provino 100% martensite testato sotto M_f^0 [34, vol. A].

In Marc vi è la possibilità di implementare tutti questi parametri, come sarà mostrato nel seguito.

2.7.3.2. Modello meccanico

Il secondo modello sviluppato da Auricchio considera il fenomeno della pseudoelasticità [32-33].

Come più volte detto, alla base di questo processo vi sono le trasformazioni della fase martensitica (varianti) e le temperature che separano la fase stabile della martensite (alle basse temperature) e quella stabile dell'austenite (alle alte temperature).

Per i particolari teorici riguardanti la pseudoelasticità si faccia riferimento al paragrafo 2.2. Si ricorda solamente come questo fenomeno si manifesti in maniera isoterma e con l'applicazione di carichi esterni. Il ciclo di carico e scarico si presenta con una curva chiusa d'isteresi.

Il modello è implementato in MSC Marc in una struttura di decomposizione moltiplicativa. Si sceglie come variabile di controllo il gradiente di deformazione F espresso nella forma:

$$F = F^e F^{tr} \quad (\text{Eq. 21})$$

dove F^e è la parte elastica, mentre F^{tr} è quella transizione di fase.

Assumendo una risposta isotropa elastica, lo stress di Kirchhoff τ e il tensore sinistro elastico di Cauchy-Green b^e ($b^e = F^e F^{eT}$) condividono le stesse direzioni principali. Quindi si può introdurre la seguente decomposizione spettrale:

$$\tau = \sum_{A=1}^3 \tau_A n^A \approx \otimes n^B \quad (\text{Eq. 22})$$

$$d = \sum_{A=1}^3 \sigma_A^d n^A \approx \otimes n^B \quad (\text{Eq. 23})$$

$$b^e = \sum_{A=1}^3 (\lambda_A^e)^2 n^A \approx \otimes n^B \quad (\text{Eq. 24})$$

con λ_A^e allungamento elastico principale a σ^d parte deviatorica, secondo la relazione:

$$\tau = pI + \sigma^d \quad (\text{Eq. 25})$$

dove I è il tensore identità del secondo ordine, p è la pressione definita come $p = \text{tr}(\tau)/3$ (con $\text{tr}(\cdot)$ operatore traccia). La precedente equazione può essere scritta anche come:

$$\tau_A = p + \sigma_A^d \quad (\text{Eq. 26})$$

con $p = K\theta^e$, $\sigma_A^d = 2Ge_A^e$.

Si considerano due trasformazioni di fase:

- austenite-martensite (A→M);
- martensite-austenite (M→A).

Per modellare la possibile dipendenza dalla pressione della trasformazione di fase, si introduce una funzione di carico tipo Drucker-Prager così definita:

$$F(\tau) = \|\sigma^D\| + 3\alpha p \quad (\text{Eq. 27})$$

dove α è un parametro materiale e $\|\cdot\|$ rappresenta la norma euclidea tale che:

$$\|\sigma^D\| = \left[\sum_{A=1}^3 (\sigma_A^d)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Eq. 28})$$

Indicando con un punto sopra il parametro la relativa variazione nel tempo, si definisce un'evoluzione lineare di ξ_s :

$$\dot{\xi}_s = H^{AS} (1 - \xi_s) \frac{\dot{F}}{F - R_f^{AS}} \quad \text{per} \quad (A \rightarrow S) \quad (\text{Eq. 29})$$

$$\dot{\xi}_s = H^{SA} (\xi_s) \frac{\dot{F}}{F - R_f^{SA}} \quad \text{per} \quad (A \rightarrow S) \quad (\text{Eq. 30})$$

dove

$$R_f^{AS} = \left[\sigma_f^{AS} \left(\sqrt{\frac{2}{3}} + \alpha \right) \right] \quad , \quad R_f^{SA} = \left[\sigma_f^{SA} \left(\sqrt{\frac{2}{3}} + \alpha \right) \right] \quad (\text{Eq. 31})$$

con σ_f^{AS} , σ_s^{AS} , σ_f^{SA} e σ_s^{SA} costanti del materiale. Le quantità scalari H^{AS} e H^{SA} inglobano la condizione di attivazione della trasformazione plastica e sono definite dalle relazioni:

$$H^{AS} = 1 \quad \text{se } R_s^{AS} < F < R_f^{AS}, \quad \text{o } \dot{F} > 0. \quad \text{Altrimenti } H^{AS} = 0;$$

$$H^{AS} = 1 \quad \text{se } R_f^{SA} < F < R_s^{SA}, \quad \text{o } \dot{F} < 0. \quad \text{Altrimenti } H^{SA} = 0$$

dove

$$R_s^{AS} = \left[\sigma_s^{AS} \left(\sqrt{\frac{2}{3}} + \alpha \right) \right], \quad R_s^{SA} = \left[\sigma_s^{SA} \left(\sqrt{\frac{2}{3}} + \alpha \right) \right] \quad (\text{Eq. 32})$$

Il modello a tempo-discreto è ottenuto integrando quello a tempo continuo nell'intervallo temporale $[t_n, t]$. In particolare viene usata una formula di integrazione all'indietro di Eulero. Scrivendo in forma di residui e togliendo le frazioni dalle equazioni Eq. 29-30, le equazioni di evoluzione a tempo discreto diventano:

$$R^{AS} = (F - R_f^{AS})\lambda_s - H^{AS}(1 - \xi_s)(F - F_n) = 0 \quad (\text{Eq. 33})$$

$$R^{SA} = (F - R_f^{SA})\lambda_s - H^{SA}(\xi_s)(F - F_n) = 0 \quad (\text{Eq. 34})$$

dove

$$\lambda_s = \int_{t_n}^t \dot{\xi} \, dt = \xi_s - \xi_{s,n} \quad (\text{Eq. 35})$$

Per la soluzione dettagliata dell'algoritmo e altri approfondimenti si rimanda a [33].

Nelle versioni più recenti di questo modello, l'utilizzatore inserisce diverse costanti elastiche per le due fasi. In questo caso, i moduli elastici e i coefficienti di Poisson efficaci sono dati da:

$$E = E^A(1 - \xi_s) + E^M \xi_s \quad (\text{Eq. 36})$$

$$\nu = \nu^A(1 - \xi_s) + \nu^M \xi_s \quad (\text{Eq. 37})$$

dove come al solito M sta per martensite e A sta per austenite.

I dati sperimentali per il modello meccanico per le leghe a memoria di forma è alquanto semplice. Vengono effettuati test uniaxiali di trazione a determinate temperature per la determinazione dei seguenti parametri:

- σ_s^{AS} tensione iniziale per la trasformazione A→M;
- σ_f^{AS} tensione finale per A→M;
- σ_s^{SA} tensione iniziale per M→A;
- σ_f^{SA} tensione finale per M→A.

Il coefficiente α è misurato come differenza tra la risposta in trazione e in compressione. Se il valore è il medesimo in entrambi i casi, allora il valore è posto a zero, nel caso contrario viene impostato a 0,1 se non vi sono dati per il comportamento a compressione nella fase di trasformazione. Se un tale valore è disponibile ($\sigma_s^{AS^-}$), α si può calcolare nel modo seguente:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2(\sigma_s^{AS^-} - \sigma_s^{AS^+})}{3(\sigma_s^{AS^-} + \sigma_s^{AS^+})}} \quad (\text{Eq. 38})$$

Di seguito si riportano due tabelle (Tab. 2-15 e Fig. 2-56) dove vengono riportate le formule che permettono di passare da un modello all'altro a seconda dei dati disponibili.

Thermo-Mechanical SMA	Mechanical SMA	Enhanced Mechanical SMA
E^A	$E = 0.5(E^A + E^M)$	E^A
ν^A	$\nu = 0.5(\nu^A + \nu^M)$	ν^A
E^M	$E = 0.5(E^A + E^M)$	E^M
ν^M	$\nu = 0.5\nu(\nu^A + \nu^M)$	ν^M
ϵ_{eq}^T	$\epsilon_L = \text{sqrt}\left(\frac{3}{2}\right)\epsilon_{eq}^T$	$\epsilon_L = \text{sqrt}\left(\frac{3}{2}\right)\epsilon_{eq}^T$
C_M	C_M	C_M
C_A	C_A	C_A
T_o	T_o	T_o

Tab. 2-15 Confronto tra i parametri dei due modelli di Auricchio [34, vol. A].

The Relationship between Mechanical Model and Thermo-Mechanical Model
$\sigma_s^{AS} = (T_o - M_s^0)C_m$
$\sigma_f^{AS} = (T_o - M_f^0)C_m$
$\sigma_s^{SA} = (T_o - A_s^0)C_a$
$\sigma_f^{SA} = (T_o - A_f^0)C_a$

Fig. 2-56 Formule di conversione tra i due modelli [34, vol. A].

3. POLIMERI A MEMORIA DI FORMA

3.1. Introduzione e confronto con le leghe a memoria di forma

Nella grande categoria degli *SMART materials* si inserisco anche i polimeri a memoria di forma (*shape memory polymers*, SMPs) [2].

Mentre molti dei polimeri impiegati in ambito ingegneristico hanno un discreto livello di recupero della forma, essi dimostrano però un limitato effetto a memoria di forma. Per colmare questa lacuna, ad oggi, sono stati sviluppati moltissimi sistemi di SMPs con diverse proprietà e caratteristiche. In questo capitolo si farà riferimento anche, e a volte indistintamente, ai compositi polimerici a memoria di forma (*shape memory polymer composites*, SMPCs), definiti come polimeri a memoria di forma contenenti particolari rinforzi. In letteratura si trovano anche con il nome di *elastic memory composites* (EMCs).

Il termine “memoria di forma” riferito ai polimeri fu proposto per la prima volta nel 1941 da Vernon. Tuttavia, l'importanza degli SMPs non fu riconosciuta fino agli anni '60 quando il polietilene reticolato non fu usato per la realizzazione di tubi e film capaci di restringersi se riscaldati. Negli anni '80 poi s'intensificarono gli studi per sviluppare nuovi SMPs, accelerando notevolmente nel decennio successivo e portando ad una serie di importanti risultati.

Dalla pubblicazione sul primo polimero a memoria di forma, il polinorbornene a memoria di forma, se ne sono sviluppati numerosi altri basati su differenti strutture e principi; svariati di questi sono stati commercializzati su larga scala, come il poliuretano (DiAPLEX, *SMP Technologies Inc.*, originariamente dalle *Mitsubishi Heavy Industries*), SMPs basati sul polistirene (Veriflex[®], Verilyte[™], Veritex[™], *Cornerstone Research Group, Inc.*), il poliuretano alifatico (Tecoflex[®], *Lubrizol Advanced Materials*), gli SMPs epossidici (TEMBO[®], *Composite Technology Development, Inc.*) ed il poliuretano curabile con UV (NOA-63, *Norland Products Inc.*) [35].

Altri esempi di comuni SMPs sono [36]: polietilene (PE) reticolato, trans-poliisoprene (TPI), copolimeri reticolati di etilene-vinil-acetato, polimeri a base di stirene, polimeri a base epossidica, poliuretano segmentato, ecc.

Innanzitutto si fa un confronto con le leghe a memoria di forma. Rispetto a esse, i polimeri a memoria di forma offrono i seguenti vantaggi [2]:

- minore densità; a titolo di esempio, la densità di uno SMP a base di poliuretano PU è di 1,25 g/cm³, contro un valore di 6,4 g/cm³ per il NiTi;
- minori costi, sia delle materie prime che dei processi di fabbricazione; inoltre permettono una facile produzione con elevata qualità e in una molteplicità di forme, anche diverse tra loro;
- la deformazione di recupero è maggiore di quasi un ordine di grandezza rispetto alle leghe a memoria di forma: per SMP in PU di possono raggiungere livelli di recupero fino al 95%;

- le proprietà termomeccaniche possono essere facilmente adeguate alle esigenze mescolando negli SMPs diversi tipi di elementi o variando adeguatamente la composizione;
- l'intervallo di temperatura per il recupero della forma può essere facilmente modificato all'interno di un ampio intervallo di valori;
- maggior rapporto di smorzamento, soprattutto dentro il range di transizione;
- molti degli SMPs presentano un'eccellente stabilità chimica e buone biodegradabilità e biocompatibilità;
- sono adatti per "rispondere" ai sensi/tessuti umani: essendo polimeri, sono materiali morbidi che offrono numerose opzioni per la realizzazione di dispositivi biodegradabili, biocompatibili e confortevoli, che si interfaccino adeguatamente con il corpo umano;
- sono molto leggeri e occupano un grande volume (schiume): ciò rende gli SMPs idonei ad applicazioni aerospaziali ed aeronautiche, ad esempio nelle strutture di *packaging* e di *deployment*;
- gli stimoli che possono innescare il recupero della forma sono in numero maggiore rispetto a quelli relativi alle SMAs: calore (riscaldamento diretto, per effetto Joule, per induzione, per radiazione, ecc.), campo magnetico, umidità, solventi, variazioni del Ph, luce, ecc.;
- l'effetto a memoria di forma può essere multiplo e viene indotto per sintesi o per adeguata programmazione.

In Tab. si riportano, a titolo di esempio, alcuni valori delle principali proprietà meccaniche di una lega NiTi e di un polimero a memoria di forma a base epossidica; si può osservare che rispecchiano le osservazioni appena riportate.

Material/property	NiTi SMA	Epoxy base SMP
Density (g/cm ³)	6-8	0.9-1.1
Typical transformation range (°C)	-50 to 100	-10 to 150
Observed phase transformation	A ⇌ M, R-phase	Glass transition
Low temperature modulus range (GPa)	25-30	0.5-1
High temperature modulus range (GPa)	75-80	0.005-0.01
Recovery speed (s)	<1	1-120
Recovery stress (MPa)	200-400	1-3
Recovery strain	<8%	500%
Shaping	Difficult	Easy
Cost in \$/lb	Expensive (~250)	Cheap (<10)
Heat conductivity	Moderate	Low
Biocompatibility	-	biodegradable

Tab. 3-1 Confronto SMAs vs SMPs [37].

Nonostante le proprietà degli SMPs siano più controllabili e modificabili rispetto a quelle delle leghe a memoria di forma, una corretta sintesi che garantisca il miglior comportamento richiede un'approfondita conoscenza chimica e dei polimeri, anni di esperienza ed un numero considerevole di test e prove. Purtroppo questo background di informazioni non è sempre

reperibile e disponibile in modo semplice ed immediato, e ciò rappresenta un limite per l'impiego dei polimeri a memoria di forma nel settore ingegneristico.

Nonostante siano molto numerose le pubblicazioni riguardanti gli SMPs, la ricerca deve ancora affrontare molteplici problematiche e limitazioni. Inoltre deve rivolgersi allo sviluppo di *switch* alternativi, anche atermici, implementando nuovi rinforzi e ricercando innovativi effetti a memoria di forma e funzionalità.

Grande interesse è rivolto anche verso i sistemi compositi e multi-materiali a base di SMPs, con l'accortezza di studiare il comportamento dell'interfaccia tra componenti, l'efficienza di dispersione delle inclusioni, l'ottimizzazione della struttura e delle proprietà. Una peculiarità che dovrà sicuramente essere sfruttata e migliorata è la programmabilità di questi materiali.

3.2. Caratteristiche e proprietà

È innanzitutto importante sottolineare come l'effetto a memoria di forma negli SMPs sia basato su un fenomeno completamente differente da quello relativo alle SMAs [2], che abbiamo detto basarsi sull'esistenza di due strutture cristallografiche stabili, l'austenite e la martensite. Inoltre si rileva come la molteplicità di polimeri esistenti implichi che il meccanismo alla base dello SME non sia uguale per tutti e che debba essere esaminato caso per caso.

In generale, nei polimeri a memoria di forma, lo SME si basa su un doppio sistema di domini, uno elastico ed uno di transizione (Fig. 3-1).

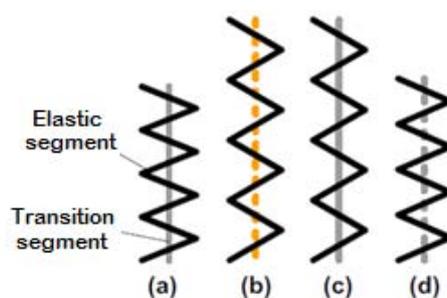


Fig. 3-1 Illustrazione schematica di uno SMP: (a) configurazione originale. (b) sistema allungato ad elevate temperature. (c) forma temporanea a bassa temperatura. (d) recupero di forma dopo riscaldamento [2].

Mentre il dominio elastico mantiene sempre un'elevata elasticità durante il ciclo di memoria, quello di transizione varia notevolmente la sua rigidità se sottoposto allo stimolo esterno. Si prenda come esempio un polimero termosensibile. Dopo il riscaldamento oltre la temperatura di transizione vetrosa, T_g (o di fusione, T_m) il segmento di transizione diviene soffice e può essere modellato (Fig. 3-1 (b)); quindi, dopo un allungamento, la resistenza proviene maggiormente dal dominio elastico. A causa del raffreddamento, il segmento di transizione riacquista la sua rigidità mantenendo la forma deformata. In seguito, al dominio elastico è impedito il ritorno alla forma originale anche dopo la rimozione del carico: questa è la forma temporanea acquisita dal materiale (Fig. 3-1 (c)). Quella appena descritta è la procedura di *trainig* del polimero. L'energia elastica si mantiene all'interno del dominio elastico,

rappresentando l'energia che guida l'effetto a memoria di forma. Infine, riscaldando il pezzo, il segmento elastico è capace di recuperare la forma originale, concludendo il ciclo (Fig. 3-1 (d)).

Riferendosi alla temperatura di transizione vetrosa T_g , sotto a essa le molecole del polimero hanno una scarsa mobilità e si presentano in uno stato vetroso dove i segmenti polimerici sono detti *frozen*. Sopra T_g invece, i legami tra le catene polimeriche diventano deboli e il polimero diventa gommoso. In quest'ultimo stato la rigidità è bassa e l'energia di deformazione viene convertita in una variazione di entropia. Esaminando il meccanismo che sta alla base dello SME, al contrario delle SMAs, si osserva come gli SMPs siano duri alle basse temperature e diventino teneri alle temperature superiori.

Per una descrizione generale di un polimero a memoria di forma si fa riferimento al lavoro svolto da Hu e Chen [38] che hanno sviluppato un modello 3D basato sui meccanismi molecolari e valido per qualunque categoria di polimero.

Si considera lo SMP composto da unità interruttore (*switch units*) e punti reticolari (*net-point units*) (Fig. 3-2). Quest'ultimi determinano la forma permanente e possono appartenere a reticoli chimici o fisici, con un composto complesso compenetrante e supramolecolare. La forza che guida il recupero della deformazione è l'elasticità entropica della rete polimerica. Le unità interruttore controllano invece la stabilità e il recupero della forma dopo l'azione di un predeterminato stimolo esterno. Finora queste unità sono state realizzate mediante l'uso di fasi amorfe e cristalline, particolari molecole, *microwhisker*, microfibre, nanoparticelle, ecc. In questi sistemi, la forza entropica elastica è il risultato della rete polimerica, quindi sono richiesti *net-point* fisici o chimici, legati da forze intermolecolari e/o da legami covalenti.

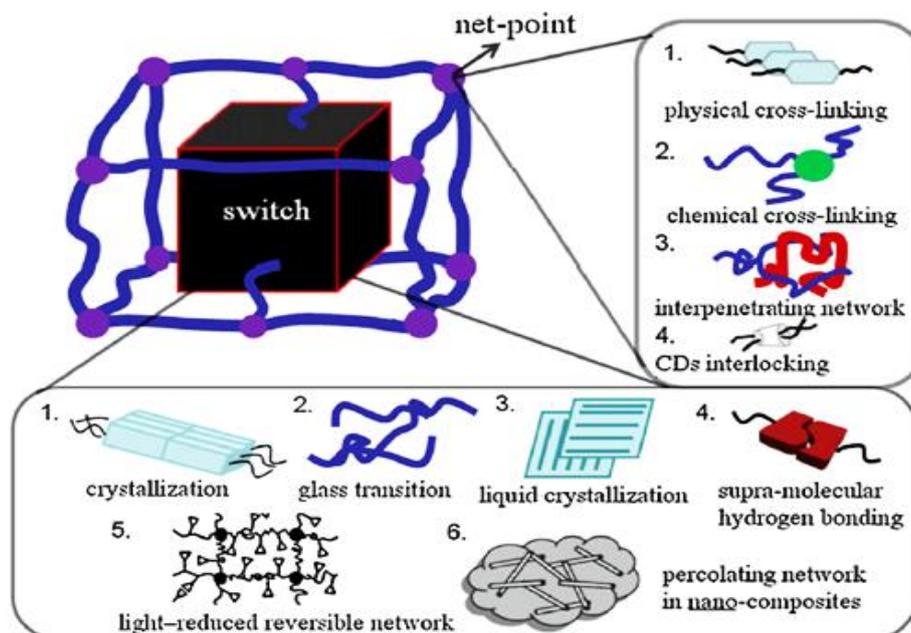


Fig. 3-2 Architettura generale di un polimero a memoria di forma [28].

Viene fatto un breve accenno sulle unità di *switch*, limitandosi ad un elenco delle tipologie ([38] per maggiori dettagli). All'inizio, esse erano solamente delle fasi amorphe o

semicristalline, ma con l'avanzare della ricerca, furono implementate, aggiungendone di nuove.

A livello di fasi quindi, si trovano quelle amorfe, semicristalline e cristalline liquide. Esse fanno riferimento alle temperature di transizione vetrosa, di fusione e isotropica (T_i) rispettivamente.

Gli *switch* si possono progettare anche a livello molecolare sfruttando il fatto che nella chimica vi sono molte reazioni reversibili. Tra queste unità le più sfruttate sono quelle fotosensibili; si trovano anche esempi di unità mercapto (gruppi solfidrilici -HS).

Come già detto, per i polimeri a memoria di forma è possibile e facile, raggiungere uno SME multiplo attraverso appositi trattamenti e *trainig*. In generale però, la trattazione degli SMPs implica una robusta conoscenza chimica di base sui costituenti polimerici e sui processi di sintesi degli stessi. La chimica su cui si basano questi fenomeni è complicata e richiede la copresenza di esperti in chimica e nella scienza dei materiali per sfruttare al meglio le proprietà e capacità di questi polimeri.

Senza entrare troppo nei dettagli, si analizzano ora alcuni aspetti sulla realizzazione e manipolazione degli SMPs.

Essendo la temperatura di transizione vetrosa un parametro discriminante, esso è motivo di studio in quanto, attraverso il suo controllo si possono modificare le proprietà e il comportamento del polimero. Un modo per variare le T_g è di immergere lo SMP in acqua. In questo modo, le molecole di acqua vengono assorbite e le si classificano in due tipi: *bound water* e *free water*, a seconda che si formino o meno dei legami idrogeno con le altre molecole. La presenza di queste molecole e di questi legami influenza il comportamento del polimero rendendolo più o meno robusto. È stato osservato che incrementando il tempo d'immersione aumentano le molecole di acqua assorbite, che sono in maggior numero di tipo *free* (Fig. 3-3). Al diminuire del tempo di immersione la temperatura di transizione vetrosa cala.

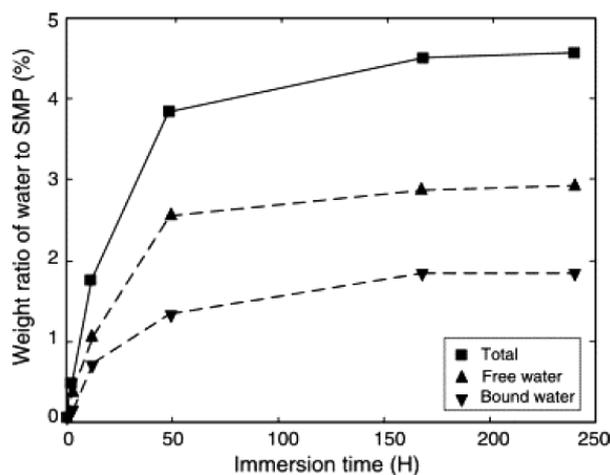


Fig. 3-3 Percentuale di acqua nel polimero vs tempo di immersione [39].

Durante l'immersione, un ruolo significativo lo assume anche il processo di riscaldamento. L'evoluzione della T_g dopo riscaldamento può essere divisa in due step. Nel primo essa si mantiene in pratica costante nonostante la diminuzione del contenuto di acqua, corrispondente

ad una rimozione di *free water*; ciò sottolinea la scarsa influenza di queste molecole sulla T_g . Nel secondo stage la T_g inizialmente cresce linearmente, con ulteriore diminuzione del contenuto di acqua, dovuta alla rimozione delle molecole *bound water*. Con la completa evaporazione dell'acqua, l'interazione tra essa e il polimero svanisce assieme anche ai legami idrogeno che si erano formati durante l'immersione. In questo modo il polimero recupera la sua T_g .

Si considera ora un tipico ciclo termomeccanico per SMPs, che solitamente comprende i seguenti step:

- deformazione del polimero ad una temperatura maggiore della T_g ;
- fissaggio della forma deformata e raffreddamento sotto T_g ;
- rilascio del vincolo;
- riscaldamento sopra la T_g con successivo ripristino della forma originale.

Anche per gli SMPs si è osservato l'effetto a memoria di temperatura [2] che si manifesta con cause differenti da quello delle leghe a memoria di forma. Il materiale può memorizzare le temperature cui è stato programmato, mostrando delle relazioni dirette tra i parametri dello stimolo e la deformazione di recupero. Bisogna sottolineare come non vi sia un'elevata precisione nel ricordare l'esatta temperatura; ciò è dovuto all'elevata complessità dei meccanismi che governano il comportamento del polimero.

Non si possono non citare anche gli aspetti svantaggiosi che riguardano questi particolari polimeri. Primo fra tutti è la loro scarsa rigidità. Un secondo svantaggio riguarda l'entità dell'output che riescono a fornire [35]. Infatti essi mostrano sì una deformazione recuperabile molto elevata, ma l'output meccanico dopo la stimolazione è estremamente basso. E questo è sicuramente un forte limite per le applicazioni in ambito ingegneristico, cui si cerca di far fronte ricercando nuove combinazioni di matrice-inclusioni e migliori trattamenti termici.

Per far fronte alla bassa rigidità, l'aggiunta di rinforzi sembra essere tra le migliori soluzioni possibili, permettendo il controllo e l'adattamento del valore della rigidità alle particolari esigenze [39]. Rinforzi comunemente impiegati sono le fibre di carbonio, di vetro e di kevlar. Oltre a quelle più diffuse, si possono trovare anche inclusioni di cellulosa, oro, fasi amorfe, ecc.

In generale, polimeri rinforzati con fibre discontinue mostrano un recupero della forma in tutte le direzioni, mentre quelli con fibre continue recuperano meglio sotto tensioni trasversali o di flessione.

Di seguito si riportano alcune osservazioni sui vari tipi di rinforzi.

Una tipologia di rinforzo è rappresentata dai nanotubi (*carbon nanotubes*, CNTs) e dalle nanoparticelle di carbonio che rendono conduttivi i polimeri. La conduttività elettrica diviene un parametro fondamentale dal momento che un polimero è sottoposto, durante un ciclo termomeccanico, a variazioni di temperatura e di deformazione. Un valore appropriato della conduttività deve essere ottenuto per garantire un corretto funzionamento del polimero.

La sfida maggiore nella realizzazione di questi materiali è di riuscire a distribuire uniformemente gli elementi in carbonio per ottenere un comportamento omogeneo su tutto il materiale. Con gli stessi scopi si impiegano anche il nerofumo e filamenti di nichel

appositamente trattati [35]. Tuttavia, l'inserimento di questi nano-elementi porta anche a una riduzione del recupero di forma causato dall'attrito di interfaccia tra gli stessi ed i segmenti molecolari.

L'inserimento di nano-particelle di carburo di silicio (SiC) aumenta sia la durezza sia il modulo elastico della resina di base, in quanto le stesse proprietà relative al SiC sono molto maggiori di quelle della matrice polimerica. Il miglioramento di questi parametri è proporzionale alla frazione di volume del rinforzo. Per contro, anche questo tipo di inclusioni ha un effetto negativo sull'effetto a memoria di forma. Quest'ultimo può essere alleviato con l'aggiunta di celite (alluminato tricalcico) che migliora l'effetto a memoria di forma.

Recentemente si sono svolte delle ricerche anche su nano-argille esfoliate che, se mescolate al polimero, aumenterebbero molto i rapporti di recupero della forma, le tensioni di recupero e le proprietà meccaniche. Speciali trattamenti termici eseguiti su questi rinforzi migliorano la compatibilità con la matrice polimerica. Si osserva come la forma a nano-barretta sia più efficiente rispetto a quella sferica, a causa del maggior rapporto d'aspetto della prima.

Anche la cellulosa, sotto forma di *nanowhiskers*, si è dimostrata un buon candidato come elemento di rinforzo, soprattutto all'interno del poliuretano. Essa causa un modesto incremento di rigidità senza alterare l'effetto a memoria di forma.

In generale, un aspetto importante riguarda la quantità di rinforzo che può essere inserita all'interno dei polimeri. Oltre una certa percentuale, che dipende da moltissimi parametri, gli effetti dell'aggiunta non sono più vantaggiosi e possono addirittura peggiorare le proprietà del polimero.

Inoltre, i rinforzi non hanno solo la funzione di migliorare il comportamento del polimero, ma anche quella di creare nuovi effetti a memoria di forma e nuove funzioni. Oltre al notevole vantaggio di poter essere sensibili a molteplici stimoli esterni, gli SMPs hanno anche la capacità di mostrare effetti a memoria di forma multipli, potendo quindi ricordare più d'una forma e non solo quella originale [35]. Per ottenere queste proprietà i materiali devono essere sottoposti a opportuni trattamenti termomeccanici multi-step e particolari elementi aggiuntivi devono essere inseriti per favorire il processo. Miscele di polimeri, laminazione e realizzazione di composti ibridi sono tutti metodi che permettono di realizzare queste proprietà.

Un fattore cruciale in questa tecnologia è la capacità di controllo che si deve avere sul meccanismo multiplo di variazione di forma.

Un'altra peculiarità degli SMPs risiede nel fatto che è possibile controllare la posizione degli step di recupero della forma [35]. Essendo i polimeri dei materiali isolanti, è possibile variare la temperatura solamente in una piccola sezione non andando a influenzare quelle circostanti. In questo modo si può localizzare il recupero di forma nella zona che viene attivata. In Fig. 3-4 si riporta un esempio di SMP con CNTs dove il recupero della forma avviene in modo controllato lungo il pezzo, applicando una corrente elettrica che provoca un riscaldamento localizzato.

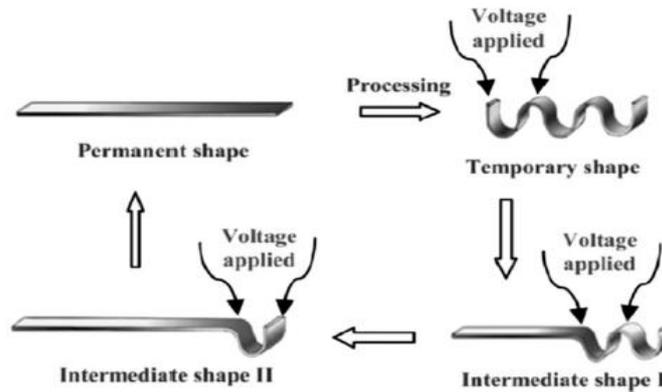


Fig. 3-4 Recupero controllato di forma in uno SMP con CNTs [35].

Infine, si vuole porre l'attenzione anche sulla capacità di auto-riparazione (*self-healing*) dei polimeri a memoria di forma, come risultato dello SME [35]. Con particolari aggiunte di elementi nei polimeri, si possono riparare non solo le micro-cricche, ma anche quelle di dimensioni maggiori. Immergendo fibre di SMP nei tradizionali polimeri termoindurenti si raggiunge per essi la capacità di riparazione.

Nonostante gli SMPs siano più semplici delle SMAs in termini di fasi e transizioni, essi hanno un comportamento che è difficilmente prevedibile con una buona precisione e accuratezza. Questo, più gli altri aspetti limitanti già menzionati, spingono la ricerca a trovare delle soluzioni che possano incrementare le proprietà degli SMPs rendendoli realmente i futuri candidati per molte applicazioni ingegneristiche.

3.3. Classificazioni e tipologie

La classificazione degli SMPs è stata largamente discussa, ma non è ancora generalmente unificata e chiara. Vi sono diversi criteri secondo i quali vengono suddivisi questi materiali:

- in base allo stimolo esterno;
- in base alla natura della struttura reticolare: fisicamente o chimicamente reticolati;
- in base al fatto di essere o meno biodegradabili;
- in base alla temperatura di trasformazione: T_g , di transizione vetrosa o T_m , di fusione;
- in base al fatto che siano a memoria di forma o a variazione di forma.

Come scritto in precedenza, gli SMPs hanno il vantaggio di poter essere attivati da diversi stimoli, ognuno dei quali individua una particolare tipologia di polimero. Considerando quindi il primo criterio, di seguito si riporta un elenco delle varie tipologie [35] [38].

La variazione di temperatura è sicuramente il metodo di attivazione più diffuso e conosciuto. I polimeri che rispondono a essa sono detti termosensibili (*thermo responsive SMPs*).

Solitamente i polimeri a memoria di forma non sono conduttivi e si rendono tali mescolandoci delle nano-polveri di carbonio o nerofumo. La corrente elettrica è poi convertita in calore ed il suo passaggio attraverso il materiale ne induce il recupero di forma. Tali polimeri sono detti a memoria di forma indotta da riscaldamento elettrico. I vantaggi che si hanno riscaldando in

questo modo il materiale, rispetto a un processo diretto, sono la convenienza, l'uniformità nel riscaldamento e la possibilità di un controllo in remoto. Questa tecnologia si dimostra vantaggiosa in quei casi dove può non essere possibile operare con un riscaldamento diretto, come per le strutture *self-deployable* nello spazio, per dispositivi in impianti medici e per attuatori e sensori.

Un altro stimolo è rappresentato dalla luce e i polimeri che ne vengono attivati si definiscono indotti da luce (*light induced SMPs*). In generale, questi materiali sono allungati ed illuminati da una luce con lunghezza d'onda maggiore di quella fissa ed i gruppi fotosensibili formano legami intrecciati, bloccando il polimero in quella forma, che si mantiene anche quando viene rimosso il carico. La configurazione iniziale è ripristinata quando il polimero viene illuminato nuovamente da una luce con minore lunghezza d'onda che separa i legami precedentemente formati.

Si possono trovare diverse tipologie di polimeri attivati dalla luce, definiti in base all'effetto che li caratterizza: polimeri basati sull'effetto fototermico, sulla fotodimerizzazione reversibile, sulla coordinazione reversibile metallo-legante. Per maggiori dettagli si faccia riferimento a [35]. Questo tipo di attivazione avviene senza contatto e risulta quindi più sicura di quella causata elettricamente o da campi magnetici.

Un tipo di attivazione del cambio di forma senza contatto è stato realizzato incorporando delle nano-particelle magnetiche nel polimero che, se riscaldate induttivamente, inducono campi magnetici alternati. I polimeri che appartengono a questa categoria mostrano quindi un effetto a memoria di forma magneticamente indotto (*magnetically induced shape memory effect*).

Le nano-particelle magnetiche solitamente impiegate hanno un nucleo di ossido di ferro inserito in una matrice di silice; alcune alternative sono: particelle ferromagnetiche, particelle di NdFeB (neodimio-ferroB), cristalli singoli di Ni-Mn-Ga e polveri di nichel. Questi elementi devono essere distribuiti nel modo più uniforme possibile per ottenere proprietà magnetiche omogenee; inoltre devono avere una buona compatibilità con la matrice.

Nonostante la possibilità di ottenere un'attuazione senza contatto, l'uso di questi polimeri deve ancora superare alcune limitazioni; infatti, la frequenza del campo magnetico e la temperatura di trasformazione devono essere mantenute in intervalli idonei alle applicazioni. Ad esempio, per applicazioni mediche, l'intervallo di frequenza è 50-100 [kHz] e la temperatura deve essere compatibile con quella corporea. In questa direzione la ricerca sta cercando di sviluppare nuovi materiali che superino tali limiti.

L'attivazione di un polimero può essere raggiunta anche immergendolo in acqua (Fig. 3-5). All'interno del polimero, per incrementare questa capacità, possono inserirsi dei *nanowhiskers* di cellulosa o dei riempitivi idrofili.

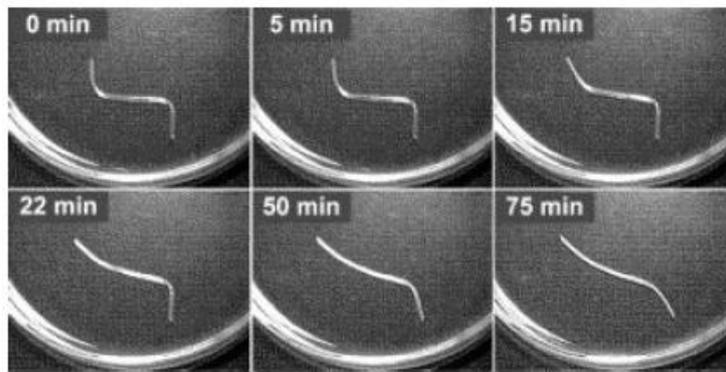


Fig. 3-5 Sequenza di fotogrammi del recupero di forma di uno SMP immerso in acqua [39].

Considerando un diverso criterio di classificazione, si prende come riferimento l'effetto a memoria di forma, e non il tipo di stimolo applicato. Secondo questa classificazione, si focalizza l'attenzione sulle funzionalità degli SMPs, che risultano essere numerose conferendo grande flessibilità agli stessi [35] [38].

Si definiscono come polimeri a memoria di forma a due vie quei polimeri che possono variare la loro forma, dopo opportuni stimoli, senza richiedere una pre-deformazione. Essi possono ritornare alla configurazione originale cambiando l'ampiezza o la direzione dello stimolo esterno. I polimeri appartenenti a questa categoria si suddividono ulteriormente nei seguenti gruppi: semicristallini, compositi laminati con proprietà meccaniche disaccoppiate, membrane fotosensibili a base azobenzene e SMPCs fotoattivi basati sull'effetto fototermico. Si osserva come i polimeri il cui comportamento a due vie sia basato su fenomeni foto-termici siano caratterizzati da basse deformazioni di recupero; inoltre, il meccanismo che li governa non è ancora del tutto chiaro e definito. I laminati invece, presentano molti più vantaggi; ad esempio sono facilmente fabbricabili e raggiungono grandi deformazioni. Queste ultime inoltre, possono essere adattate alle particolari esigenze semplicemente controllando la sequenza di laminazione e le proprietà delle singole lamine. Sono caratteristiche queste che li rendono materiali interessanti per svariate applicazioni future.

Si definiscono poi i polimeri a memoria di forma a tre vie quei polimeri capaci di fissare due forme temporanee e recuperare, in sequenza, dalla prima forma temporanea alla seconda ed eventualmente a quella permanente, se sottoposte a opportuno stimolo [38]. Solitamente questo effetto è attribuito a una rete polimerica multifase che contiene come minimo due domini, che sono associati con temperature di transizione individuali. Finora il triplo SME è stato raggiunto solo per gli SMPs fisicamente e chimicamente reticolati.

Infine vi sono i polimeri a memoria di forma con SME multiplo, capaci di memorizzare più di due forme temporanee. Questo gruppo ha suscitato molto interesse poiché dà la possibilità di avere un'elevata flessibilità in termini di realizzazione e proprietà. Come già accennato, questo effetto si ottiene mediante specifici trattamenti termici e sequenze di programmazione.

Una categoria a sé stante, che esula dalla precedente classificazione, riguarda le schiume di SMPs. Si introduce un interessante concetto di materiale noto come *cold hibernated elastic memory* (CHEM) [40-41]: una struttura di forma qualunque viene compattata in un volume molto ridotto in uno stato flessibile sopra la temperatura di transizione, T_g e successivamente raffreddato sotto la stessa T_g fino ad uno stato vetroso. Le forze esterne che hanno permesso

la deformazione sono rimosse quando la struttura stivata è nello stato *frozen* e la forma viene mantenuta nello stato *cold hibernate* per un tempo quasi illimitato, sotto la temperatura di transizione. Se il componente viene riscaldato sopra la T_g allora recupera la sua configurazione originale.

Questi materiali sono caratterizzati da bassa densità, elevate deformazioni di recupero, elevate proprietà di smorzamento nell'intervallo delle temperature di transizione e una forte dipendenza dalla temperatura sulla permeabilità ai gas.

Solitamente vengono impiegati SMPs in poliuretano PU in quanto dimostrano buone proprietà termomeccaniche in termini di recupero di deformazione e stabilità della forma. Per contro, essi non sono adatti ad applicazioni con carichi elevati e agenti per lunghi periodi. A causa della loro bassa T_g (massimo 70 °C), questi polimeri tendono a recuperare la forma anche a basse temperature, presentando anche una scarsa rigidità che porta a piccoli carichi di attuazione. In questi termini, risultati migliori sono stati raggiunti utilizzando le resine epossidiche, che presentano un recupero della deformazione di compressione fino al 90%.

In Tab. 3-2 sono riportate alcune proprietà di una generica schiuma CHEM.

Properties	MF 5520
Density (g/cm ³)	0.032
T _g (°C)	63
Compressive Strength (MPa)	0.09 - 0.102
Tensile Strength (MPa)	0.2
E (compression) below T _g (MPa)	2.57 - 2.69
E (tension) below T _g (Mpa)	11.4
E (compression) above T _g (MPa)	0.042 - 0.064
CTE (glassy state) (ppm/°C)	27.5
Th. conductivity (W/mK)	0.027
Th. conductivity (95% compressed) (W/mK)	0.12
Specific heat (30°C) (J/kg K)	1320
Outgassing (Wt. Loss - WVR) %	1.17

Tab. 3-2 Proprietà di una schiuma CHEM [41].

I maggiori vantaggi che si traggono dalla tecnologia CHEM sono:

- ridotta massa e basso volume di stivaggio (due ordine di grandezza minore rispetto all'alluminio);
- alta affidabilità e costi bassi: non vi sono meccanismi ausiliari che richiedono manutenzione e riducono l'affidabilità di sistema;
- semplicità e capacità di *self-deployment*;
- elevato smorzamento dinamico e processi puliti di dispiegamento: i materiali impiegati garantiscono un ambiente operativo pulito e privo di contaminazioni;

- assenza di effetti a lungo termine sullo stivaggio e facilità di fabbricazione: possono essere stivati per un periodo illimitato; presentano una buona predisposizione alla lavorazione, al taglio e alla formatura;
- buona resistenza agli impatti e alle radiazioni, e isolanti termici: le schiume CHEM assorbono l'energia di impatto; inoltre hanno conducibilità termiche ed elettriche molto basse.

Il maggiore svantaggio delle strutture CHEM è rappresentato dalla necessità di avere energia termica disponibile per l'attivazione (ad esempio per innescare il dispiegamento). Nelle applicazioni spaziali sembrerebbe fattibile usufruire dell'energia solare.

Un altro aspetto limitativo per questi materiali riguarda le loro scarse proprietà di resistenza e rigidità. Una soluzione potrebbe essere l'impiego di pelli in materiali composito, andando a formare strutture sandwich; questa soluzione porta a un notevole aumento di rigidità nella direzione trasversale. Per le pelli sono solitamente impiegati materiali compositi (CFRP) o compositi polimerici contenenti diversi rinforzi. Altri vantaggi riguardano l'aumento della capacità di *packaging* e una miglior previsione del comportamento di dispiegamento.

I processi di fabbricazione e lavorazione di queste schiume sono complessi e molto costosi, poiché richiedono un'ottima conoscenza della chimica che sta alla base del processo. Nuove tecniche sono state sviluppate, ma è ancora necessaria molta ricerca per ottimizzare i processi e cercare di migliorare anche le proprietà delle schiume stesse.

Alcuni studi sono stati compiuti su nuove tipologie di schiume che presentano delle dimensioni micrometriche delle celle costituenti. La dimensione delle stesse può essere controllata durante il processo di fabbricazione. Quando realizzate nel modo corretto, le micro-schiume in CHEM hanno dimostrato, rispetto a quelle tradizionali, un miglioramento nelle proprietà fisiche e meccaniche, un aumento dell'isotropia, un aumento della resistenza a trazione e a compressione e un'estensione della resistenza al taglio e alla frattura.

3.4. Applicazioni

Sebbene i polimeri a memoria di forma abbiano catturato l'attenzione della comunità ingegneristica molti anni dopo le leghe a memoria di forma, recentemente hanno avuto una rapida crescita diventando materiali chiave nel mondo dei materiali a memoria di forma.

Come già detto per le SMAs, i campi applicativi sono molteplici e a volte s'intrecciano. In Tab. 3-3 si elencano le principali applicazioni degli SMPs nei diversi settori e in seguito se ne riportano gli esempi più significativi.

Applications		Applications	
1	Aneurysm occlusion devices	34	Orthodontic
2	Assembly/disassembly tools	35	Orthopedic cast
3	Bio-MEMs	36	Orthopedics Morphix® suture anchor
4	Bone defect fillers	37	Packaging
5	Cardiac valve repair	38	Pharyngeal mucosa reconstruction
6	Cells manipulating and capturing	39	Phase change fabrics
7	Chemical feeding in chemical reactions	40	Physiological monitoring
8	Clot removal devices	41	Post-surgical treatment of mitral insufficiency
9	Controlled drug release	42	Pressure garments
10	Crease and pattern retention finishing	43	Recordable and erasable memories
11	Damping fabrics	44	Study of cell proliferation
12	Damping materials	45	Selective desalination material
13	Deodorant fabrics	46	Self-healing
14	Electroactive shape memory hinge	47	Self-peeling dry adhesive
15	Embolic devices	48	Shape changing nanofibers
16	Endoscopic surgery suture	49	Shape memory fibers
17	Erasable Braille	50	Smart mandrels for composite tooling
18	Fashion design	51	Shape memory neuronal probe
19	Flexible light-emitting diodes	52	Skin-care products
20	Hair treatment	53	Soft lithography
21	Heat and moisture management	54	Surface wetting
22	Heat shrinkable packages for electronics	55	Microfluidic devices
23	Hot shrinkage micro-tags	56	Surface wrinkle and micro-patterns
24	Kidney dialysis needles	57	Switchable information carriers
25	Light-modulators and display devices	58	Temperature sensors
26	Measuring tools in complex cavities	59	Toys
27	Memory foam mattress, pillow and insoles	60	Treatment of esophageal stenosis
28	MEMs applications	61	Vascular stents
29	Microtweezers in medicine	62	Surgery inside living cells
30	Micro-valves in microdevices	63	Vehicle active air dams and other aerodynamic surfaces
31	Morphing of aircraft wings and helicopter rotor blades	64	Weight reducing agent
32	Novel McKibben artificial muscles	65	Wound dressing
33	Ophthalmic applications	66	Wrinkle free finishing of cotton fabrics

Tab. 3-3 Applicazioni degli SMPs [35].

Si può affermare come per molti dispositivi l'ispirazione sia venuta dal mondo biologico, cercando di imitare alcuni comportamenti di piante e animali. Nel mondo vegetale si sono considerati: la *mimosa pudica* che si ritrae istantaneamente quando toccata, le foglie delle piante mangia-insetti che si chiudono a scatto quando percepiscono la presenza dell'insetto, le foglioline della "pianta danzante" (*codariocalyx motorius*) che ruotano quando illuminate dal sole. Questi fenomeni sono dovuti al movimento dell'acqua all'interno delle celle, che cambiano di conseguenza il loro volume e la loro forma. Esempi si possono trovare anche nel mondo animale: il cetriolo di mare modifica la sua rigidità se stimolato in un certo modo; il camaleonte varia colore per mimetizzarsi (riarrangiamento dei cromatofori), come succede anche per le seppie, i calamari e le piovre.

Prendendo spunto anche da questi fenomeni, e cercando di rispondere alla crescente domanda di materiali innovativi, i ricercatori hanno iniziato un importante lavoro di ricerca per tentare di simulare i meccanismi di percezione degli stimoli e di conseguente risposta, sviluppando quindi polimeri a memoria di forma con proprietà e prestazioni sempre più avanzate.

3.4.1. Applicazioni aeronautiche e aerospaziali

Nel paragrafo che si riferisce alle leghe a memoria di forma è già stato trattato il caso delle strutture *deployable* e per esse trovano applicazione anche i polimeri.

È noto come le SMAs siano più potenti degli SMPs in termini di attuazione. Tuttavia, questi ultimi sono più economici, leggeri e hanno una maggiore deformazione di recupero e possono quindi diventare parte integrante dei sistemi di dispiegamento e non solo [2]. Anch'essi hanno il vantaggio di garantire un processo di dispiegamento senza shock e senza indesiderate vibrazioni poiché il processo di recupero della forma può essere controllato in modo semplice, ma efficiente.

Riferendosi ai compositi polimerici a memoria di forma (o EMCs), essi sono impiegati nelle strutture aerospaziali *deployable* in quanto offrono delle ottime caratteristiche di deformazione, soprattutto riferite al *packaging* [42]. Sono dei materiali alternativi da usare per le *tape spring* al posto dei tradizionali metalli o dei compositi (vedi anche paragrafo 6.1). Il comportamento non lineare di questi dispositivi realizzati in EMC è molto simile a quello delle *tape spring* in CFRP. Tale non linearità geometrica è permessa dal fenomeno di buckling elastico microstrutturale delle fibre di rinforzo, inizialmente dritte e successivamente ondulate (Fig. 3-6). Nei compositi tradizionali, solitamente il microbuckling è un fenomeno di failure; nei laminati EMC invece, questo fenomeno permette a essi di essere deformati elasticamente a livelli di deformazione che superano di gran lunga i limiti di deformazione delle fibre di rinforzo. A parte la scala cui si manifesta questa non linearità geometrica, un'altra differenza tra i due tipi di materiale è che la non linearità relativa agli EMCs può essere "attivata" o "disattivata" variando la temperatura del materiale. Alla temperatura operativa, il buckling delle fibre è impedito dalla matrice polimerica, mentre a temperature maggiori la matrice in SMP diventa più morbida (la rigidità diminuisce di anche due ordini di grandezza) e si ha il buckling elastico delle fibre quando esse vengono caricate a compressione. Una volta che il materiale è stato deformato, si raffredda in modo da fissare la nuova configurazione. Tale forma è mantenuta sino a quando il pezzo non viene nuovamente sottoposto a riscaldamento. Questa doppia non linearità che si manifesta sia a livello microscopico sia a livello macroscopico conferisce agli EMCs un'ottima capacità di deployment.

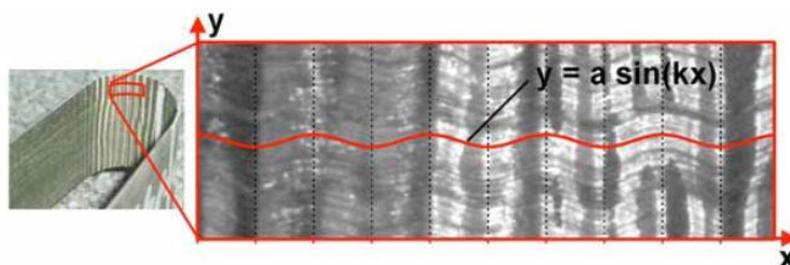


Fig. 3-6 Micrografia di un laminato in EMC, lato in compressione [42].

Si menzionano alcuni esempi di realizzazioni; in [43] si riporta il caso di un pannello solare (Roll Out and Passively Deployed Array, RAPDAR) che sfrutta la tecnologia TEMBO[®] Elastic Memory Composite (EMC) per il suo dispiegamento. Viene studiato e sviluppato un

longherone in EMC che possa garantire il packaging e la rigidità richieste (Fig. 3-7); la sua forma permette un efficiente arrotolamento e srotolamento del dispositivo.

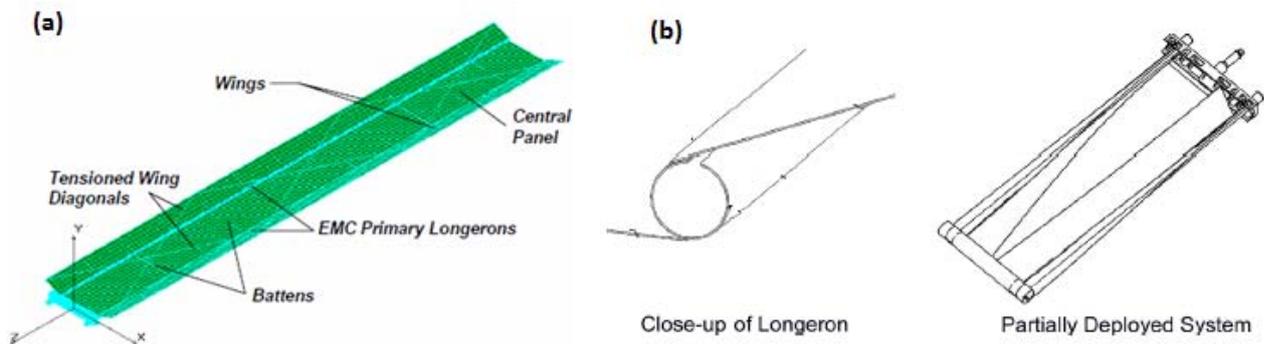


Fig. 3-7 Pannello solare RAPDAR: (a) struttura completa. (b) longherone primario [43].

I materiali TEMBO[®] EMC sono dei compositi con polimeri a memoria di forma come matrice, e fibre tradizionali come rinforzo; essi sono caratterizzati dall'abilità di "congelare" e poi rilasciare energia di deformazione, indotta attraverso dei particolari cicli termo-meccanici. Essi inoltre, riescono a raggiungere elevate deformazioni di impaccamento. Altre interessanti proprietà riguardano una discreta resistenza, un buon modulo e una bassa densità che implica leggerezza.

Un aspetto interessante di questo meccanismo è che sfrutta l'energia solare per l'attivazione del sistema di *deployment* (sistema passivo).

La causa di una ancora bassa diffusione di questi materiali in campo aerospaziale risiede nella scarsa quantità di informazioni disponibili riguardo le loro proprietà (ad esempio, rispetto al noto comportamento delle *tape spring* elastiche).

Sempre nell'ambito delle strutture di dispiegamento, un'interessante innovazione è stata fatta introducendo le schiume di SMP (tecnologia CHEM). Esse possono essere compresse fino al 95% e presentano una discreta rigidità alle basse temperature per supportare un carico ragionevole dopo il recupero della forma. La tecnologia CHEM sfrutta il vantaggio della memoria di forma dei polimeri, in aggiunta al recupero elastico della schiuma per dispiegare la struttura compatta; inoltre è possibile un adattamento della temperatura di transizione vetrosa T_g per irrigidire la struttura nella configurazione completamente dispiegata. In Fig. 3-8 si riporta un tipico ciclo di processo per la tecnologia CHEM [41]:

1. struttura originale: viene assemblata a temperatura ambiente sotto T_g ;
2. piegatura o arrotolamento: la struttura viene riscaldata sopra T_g , diventando flessibile e viene deformata nella configurazione piegata; vengono applicate forze esterne per ottenere tale configurazione;
3. "ibernazione" (immagazzinamento): il pezzo piegato/arrotolato viene raffreddato sotto T_g così da fissare la forma deformata. La struttura può essere così stivata e trasportata. Fino a quando la temperatura si mantiene sotto T_g , non è richiesta nessuna forza esterna per mantenere la configurazione piegata;

4. dispiegamento: il pezzo viene riscaldato sopra T_g e riprende la forma iniziale. Le forze di recupero di memoria e l'elasticità della schiuma permettono il naturale dispiegamento senza attuazioni esterne;
5. irrigidimento: un raffreddamento sotto T_g permette alla struttura dispiegata di fissare la forma e di essere messa successivamente in opera.

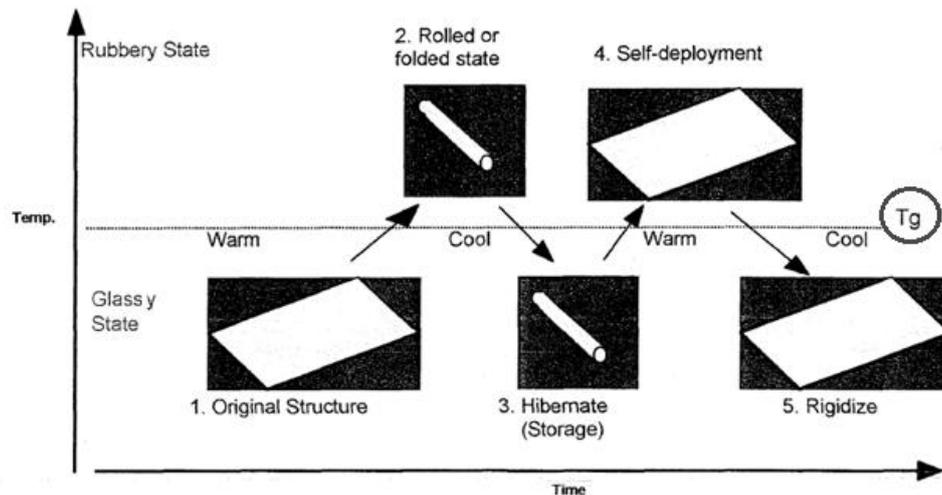


Fig. 3-8 Ciclo per la tecnologia CHEM [41].

Queste schiume polimeriche a memoria di forma sono state a lungo studiate e sono state anche sottoposte a test sia a terra che in volo. In [40] si riportano i dettagli sui risultati ottenuti da esperimenti (I-FOAM) eseguiti durante la missione STS-134. A bordo dell'ISS (*International Space Station*) sono stati portati dei campioni in composito CHEM, posizionati in un contenitore BIODON, e sono stati sottoposti a test di flessione, torsione e compressione (maggio 2011). Una volta riportati a Terra, sono stati letti i dati prima acquisiti e poi immagazzinati in un dispositivo di memoria. Successivamente sono state svolte altre prove anche a terra. Dai risultati ottenuti, hanno dimostrato che la microgravità non influisce sulle proprietà di recupero della forma poiché i carichi di recupero sono talmente elevati da essere insensibili alla gravità. Le maggiori difficoltà si sono riscontrate nel comportamento delle complesse strutture multifunzionali in cui sono state integrate le schiume polimeriche; il trasferimento di calore attraverso questi sistemi è un fattore critico poiché i campioni di schiuma sono dei pessimi conduttori di calore e la microgravità potrebbe indirettamente influenzare il recupero. A terra questo problema è parzialmente compensato dalla convezione, che nello spazio però è assente. Il sistema di riscaldamento, quindi, sembra essere l'elemento critico della progettazione.

I progetti futuri hanno lo scopo di realizzare nuovi campioni da testare sempre a bordo dell'ISS. Saranno portate a bordo nuove tecnologie e un prototipo di un attuatore. Le limitazioni sono date dai ridotti spazi disponibili per il contenitore dei pezzi da testare e dal range di temperature che si possono raggiungere.

Le proprietà e capacità di questi materiali sono state impiegate anche per altri dispositivi, come robot spaziali, supporti per sottosistemi di telecomunicazioni e potenza, sensori, sistemi per il controllo termico e protezioni da impatti e radiazioni [41]. Per questi elementi sono stati

condotti test di fattibilità e inchieste preliminari sul comportamento in ambiente spaziale. Si riportano in Tab. 3-4 alcune delle applicazioni realizzate.

Comments	
Nano-rover wheels	Assembled with nano-rover and demonstrated in lab Ref
Precision Soft Lander	Safe and stick-at-the-impact-site landing. Small model proof-of-concept Ref.
Sensors Delivery Systems	CHEM-based integrated sensors are dropped and deployed in different planetary locations Ref.
Horn Antenna	Deployable conical corrugated horn antenna. Small model proof-of-concept Ref
Radar Antenna	Three-layer membrane design. Small model proof-of-concept Ref
Thermal-Meteoroid Shield	Lightweight deployable thermal & meteoroid protecting system.
Habitats Structures	Shelters, hangars, crew cabins, trans habs, Small model proof-of-concept Ref.
In-Situ Propellant Production Tanks	Small model proof-of-concept Ref
CCSL Deployable Boom	Hybrid design of CFRP composite & CHEM foam. Analytical and experimental proof-of-concept

Tab. 3-4 Applicazioni della tecnologia CHEM (CCSL: CFRP/CHEM Spring Lock) [41].

Si sottolinea come la maggior parte dei dispositivi elencati sia stata sviluppata fino ad uno step di progettazione di carattere analitico e sperimentale, dimostrato in laboratorio. In questi esperimenti sono stati realizzati dei piccoli modelli strutturali utilizzati in ambiente terrestre. Un'eccezione è fatta per le ruote in CHEM per un nano-rover che sono state realizzate in scala e testate a temperatura ambiente e pressioni molto basse (per simulare l'atmosfera marziana) [41]. Per i dispositivi radar e per i pannelli solari hanno dimostrato come sia necessaria una certa rigidità strutturale che è garantita dall'impiego di pannelli sandwich, invece che dalle sole schiume.

Analisi preliminari indicano come le schiume in CHEM non siano molto adatte a dispositivi denominati *gossamer* ("molto leggeri, trasparenti e simili alla garza"), che siano sollecitati con carichi elevati. Tuttavia, sembra che elementi sandwich con anima in CHEM e pelli in composito possano supportare strutture per il dispiegamento di antenne, telescopi, schermi solari o pannelli solari.

Un esempio applicativo riguarda una trave che sfrutta il concetto CCSL, ovvero *CFRP/CHEM Spring Lock* per grandi strutture *boom* (50-100 [m]); viene adottato un design unico che realizza una struttura composta di due *tape spring* in CFRP separate da schiume in CHEM [41] (Fig. 3-9).

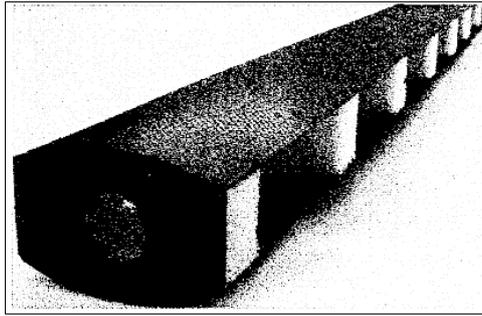


Fig. 3-9 Trave con concetto CCSL [41].

I due materiali sono utilizzati in modo strategico per permettere alla trave di essere piegata e dispiegata senza l'impiego di complessi meccanismi di trasmissione o collegamento. Questa tecnologia sfrutta la schiuma per bloccare la trave nello stato piegato e dispiegato, per controllare il dispiegamento e aggiungere resistenza al buckling. Le *tape spring* in CFRP vengono usate per provvedere un'elevata rigidità assiale ai membri della trave, per ridurre la massa, offrire l'energia elastica necessaria per il *deployment* e aumentare la stabilità complessiva del *boom*.

Questa tecnologia è di particolare interesse nel campo aerospaziale e alcuni dati sono disponibili sul web. Tuttavia, essendo un concetto abbastanza recente e altamente innovativo, le informazioni a riguardo non sono così facilmente accessibili e reperibili.

Finora, i progetti sono stati sviluppati maggiormente dalla NASA e dal *Jet Propulsion Laboratory and industry*, con fini e applicazioni prettamente aerospaziali. Questa tecnologia sembra comunque essere la soluzione futura per strutture *self-deployable* leggere, controllabili, semplici e a basso volume di stivaggio.

Infine si osserva come, per le applicazioni di *deployment*, sia fondamentale scegliere adeguatamente il polimero in base alla sua temperatura di transizione vetrosa, che deve essere leggermente superiore a quella massima dell'ambiente operativo per evitare dispiegamenti in istanti di tempo diversi da quelli programmati (ad esempio una missione su Marte richiederebbe una T_g di $0\text{ }^\circ\text{C}$, mentre sulla Terra dovrebbe essere di $50\text{ }^\circ\text{C}$) o l'accumularsi di tensioni nel caso il dispositivo fosse bloccato.

Nel settore aeronautico, uno studio è stato condotto sul *morphing* di un'ala in SMP di un modello di un piccolo velivolo (Fig. 3-10). Quando l'ala viene scaldata per effetto Joule essa recupera la forma originale piatta. A causa della scarsa rigidità di questi materiali, anche in questo settore si devono ricercare delle soluzioni alternative che incorporino altri materiali per garantire le adeguate proprietà meccaniche all'intera struttura in esame.

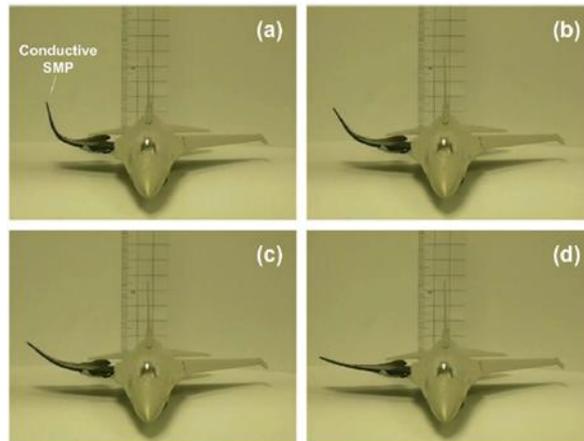


Fig. 3-10 Morphing di un'ala in SMP [2].

3.4.2. Applicazioni mediche

Sicuramente questo è uno dei settori in cui l'uso degli SMPs è molto intenso [2] e che offre le maggiori sfide per gli sviluppi futuri.

Negli interventi chirurgici poco invasivi, dopo una sutura, lo spazio per annodare il filo è minimo. Inoltre, in certi casi il chirurgo è costretto a operare in remoto e le varie sequenze diventano ancor più critiche. I polimeri a memoria di forma rappresentano una buona soluzione a questi problemi, ad esempio con delle suture in grado di auto serrarsi. Questi elementi non hanno bisogno necessariamente di calore (effetto Joule) per attivarsi, ma può bastare un'immersione in acqua a temperatura ambiente per innescare il meccanismo di recupero della forma garantendo la chiusura del nodo (Fig. 3-11).

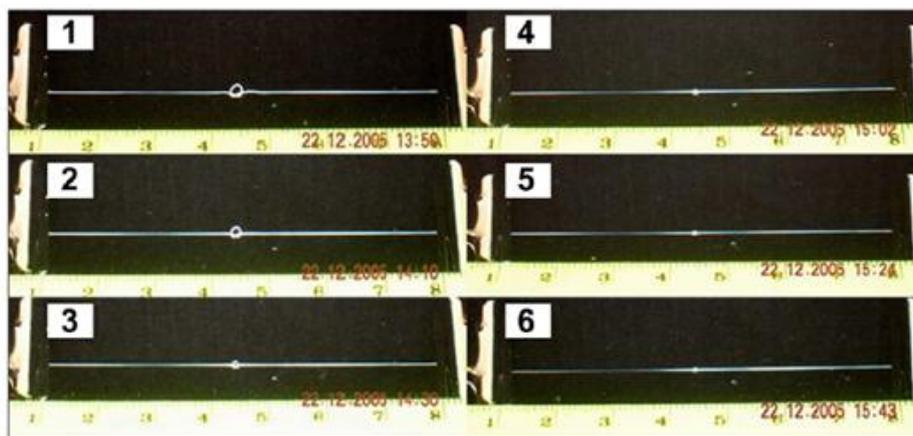


Fig. 3-11 Esempio di filo per sutura in SMP capace di auto-serrarsi se immerso in acqua a temperatura ambiente [2].

L'uso di dispositivi in SMP per il rilascio dei medicinali garantisce un rischio quasi nullo di infezioni rispetto agli altri materiali comunemente utilizzati.

Come per le SMAs, anche i polimeri a memoria di forma sono impiegati nella realizzazione degli stent. Per quest'ultimi sembra essere molto semplice la retrazione dal sito in cui sono

impiantati, che avviene sfruttando la sensibilità all'umidità e l'effetto multiplo a memoria di forma

Nel campo della microchirurgia vi è sempre più una richiesta di strumenti che abbiano dimensioni miniaturizzate per condurre adeguatamente gli interventi. I materiali a memoria di forma, e specialmente gli SMPs, sono degli ottimi candidati per questi scopi.

Gli aneurismi intracranici colpiscono tra il 2% e il 6% della popolazione e rappresentano una grave patologia che, se non identificata, può portare a gravi danni cerebrali [39]. Il tipico trattamento è di embolizzazione con spirali di platino, che consiste nell'occlusione di un vaso arterioso o venoso. Si ottiene mediante l'uso di agenti meccanici definitivi o temporanei quali coaguli autologhi, alcool polivinilico, materiale spongioso, colla chirurgica o spirali metalliche. Questi agenti vengono introdotti attraverso cateteri per via endovascolare o attraverso puntura diretta della lesione. Considerando le spirali, esse sono inserite in gran numero all'interno dell'aneurisma per occludere il flusso del sangue; il sangue stagna in quest'area e si coagula, portando alla formazione di un trombo. L'effetto desiderato può essere ottenuto se vi è una matrice spessa interconnessa del trombo assieme alla formazione di tessuto cicatriziale al collo dell'aneurisma. Diversi problemi si manifestano se non si avverano queste due peculiarità. Nel caso del titanio, essendo bio-inerte, l'adesione al tessuto del vaso è limitata. Una prima soluzione è stata trovata adottando una forma a spirale e ricoprendo di poliuretano il platino, ma i vantaggi maggiori sono stati osservati utilizzando i polimeri a memoria di forma in quanto, sfruttando lo SME, essi possono assumere una forma predeterminata. In questo modo si può programmare una forma dell'elemento che sia adatta all'inserimento all'interno del corpo; in seguito al posizionamento nell'aneurisma, a causa della variazione di temperatura (del sangue), viene recuperata la forma originale idonea a rispondere ai suddetti requisiti. Un altro fattore a favore degli SMPs è il loro essere bio-attivi, garantendo così un ottimo adattamento all'interno dell'aneurisma.

Come le SMAs, anche gli SMPs vengono utilizzati in campo ortodontico sotto forma di fili. Solitamente sono impiegati fili metallici che offrono migliori proprietà in termini di rigidità, resistenza a fatica, durabilità e flessibilità; nonostante questi vantaggi, essi hanno un colore che a livello estetico può dare dei problemi. Sostituendo questi metalli con dei particolari polimeri si ottengono diversi vantaggi: minore densità, elevato recupero della forma, trasparenza e un aspetto esteticamente adatto all'applicazione. Inoltre i fili in SMP esercitano una forza di recupero costante sui denti per un lungo periodo.

Un altro esempio applicativo nel settore medico riguarda le ingessature. Un'ingessatura realizzata con SMPs è più leggera, riciclabile, permeabile, facile da realizzare, trasparente ai raggi X e con un costo moderato [38].

Concludendo, si ricorda come in questo settore sia fondamentale la biocompatibilità dei materiali per evitare infezioni o allergie. Inoltre, gli elementi devono essere sterilizzati e bisogna considerare la reazione degli stessi a questo processo.

3.4.3. Applicazioni per la modellazione di superfici

Le proprietà che caratterizzano i polimeri a memoria di forma li rendono adatti alla realizzazione di superfici che mostrino particolari comportamenti quali: super-idrofobicità, auto-pulizia, cambiamento di colore localizzato, adesività, lubrificazione e attrito, ecc. Queste superfici, che possiamo definire *smart*, potrebbero trovare applicazioni in un vasto range di settori: biosensori, nano-attuatori, elettronica, micro-sensori, ecc. Possono essere realizzate delle superfici con capacità di memorizzazione dati, che potrebbero anche essere nascosti in una forma di steganografia proprio “all’interno” del materiale stesso. Un'altra applicazione potrebbe essere la realizzazione di dispositivi anti-contraffazione.

Il braille è una forma di scrittura e lettura per non vedenti che sfrutta il tatto di queste persone. Esso consiste in modelli composti di punti in rilievo raggruppati in matrici 3x2. Questi punti sono facilmente impressi su carta o plastica attraverso delle particolari punte di incisione; la loro rimozione però risulta difficoltosa. Fogli per il braille prodotti in SMP permettono la facile rimozione degli errori di stampa anche mediante semplice acqua calda o con riscaldatori puntuali. In questo modo è anche possibile riciclare un foglio precedentemente scritto [2]. Diverse tecniche di produzione di tali fogli sono state sviluppate e si rimanda a [2] per maggiori dettagli.

Come accennato in precedenza, una delle proprietà degli SMPs è la capacità di auto-riparazione, che può essere sfruttata in diverse applicazioni.

L’auto-riparazione avviene a livello microscopico e permette il recupero di micro-cricche o micro-graffi. Esempi applicativi riguardano resine termoindurenti che sono arricchite con SMPs appunto per permettere la riparazione di micro-danni al loro interno.

In generale la tecnologia che riguarda la modellazione di superfici è ancora ai primi sviluppi e molti sono ancora gli aspetti da chiarire e approfondire. Tuttavia, si presenta come un interessante sfida da affrontare per ottenere dei risultati che potranno essere applicati in diversi settori ingegneristici.

3.4.4. Applicazioni nell’assemblaggio attivo

Le viti rappresentano gli elementi più diffusi per le operazioni di fissaggio e sono realizzate in svariate dimensioni per poterle adattare alle misure dei fori. Una vite realizzata con SMP potrebbe essere impiegata per un ampio range di misure di fori, potendo essa modificare la propria forma e quindi le proprie dimensioni [2].

Allo stesso modo, accoppiamenti che sfruttano gli SMPs forniscono una buona soluzione per il serraggio di due tubi, in un intervallo abbastanza esteso di diametri. Questi sono esempi di una tecnologia definita assemblaggio attivo.

Queste funzioni vengono raggiunte sfruttando il rilascio della tensione immagazzinata dopo la rimozione dello stimolo esterno applicato.

Gli stessi principi vengono applicati anche per sistemi di separazione, dove anche le leghe a memoria di forma hanno trovato impiego.

In Fig. 3-12 viene riportato l'esempio di un foro che si allarga automaticamente se riscaldato.

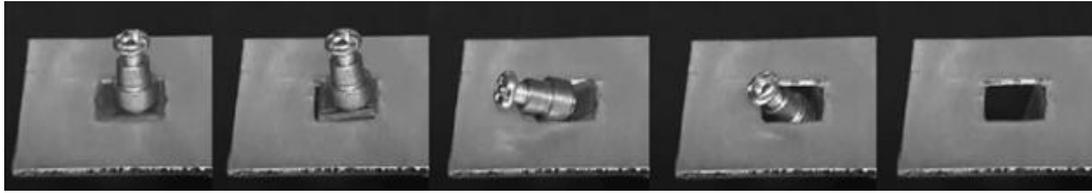


Fig. 3-12 Foro che si allarga automaticamente se riscaldato [2].

A fronte del loro minor costo, della non conduttività elettrica e della grande deformazione recuperabile, i polimeri a memoria di forma sembrano essere migliori delle SMAs per questa categoria di applicazioni.

3.4.5. Attuazione

L'attuazione prevede l'utilizzo di un attuatore per la movimentazione o il controllo di un sistema, come un motore; esso è azionato da una sorgente di energia esterna (calore, corrente elettrica, radiazione solare, ecc.). È noto come gli SMPs siano capaci di essere sensibili a uno stimolo esterno e di reagire ad esso con un cambio di forma; rilasciando l'energia immagazzinata durante il processo, essi sono in grado di sviluppare una forza e muovere così un sistema secondario.

Per questo tipo di applicazioni viene anche sfruttano l'effetto a memoria di forma a due vie.

Si sottolinea come gli SMPs abbiano in diversi casi sostituito le SMAs in questa categoria di dispositivi. Vengono impiegati maggiormente i compositi polimerici a memoria di forma in quanto dimostrano migliori proprietà in termini di intensità della tensione di recupero rispetto ai semplici SMPs. Vengono preferiti alle leghe a memoria di forma per la loro minor densità e maggior deformazione di recupero.

3.4.6. Altre applicazioni

Oltre ai settori prettamente ingegneristici, gli SMPs trovano impiego, come anche le SMAs, in altri ambiti come quello dell'abbigliamento o in generale quello commerciale.

Nel settore tessile gli SMPs trovano diverse possibilità di applicazione [38]. Nonostante sia relativamente semplice realizzare delle fibre di polimero, più difficile è farlo se devono essere impiegate nel tessile. Infatti, si devono considerare fattori quali la durabilità, l'elongazione, le proprietà tattili, la processabilità, che vanno ad influire sul risultato finale. In generale quindi, si preferiscono le nano e micro-fibre come soluzioni per le applicazioni tessili.

L'impiego dei polimeri a memoria di forma come rivestimenti di indumenti permette di raggiungere un elevato livello di confortevolezza e una buona capacità traspirante. SMPs a base poliuretano garantiscono il controllo della permeabilità dei tessuti. Si può ottenere un'elevata permeabilità al vapor d'acqua alle alte temperature e una minima alle basse temperature, rendendo i capi utilizzabili in entrambe le condizioni.

Rivestimenti in SMPs vengono utilizzati anche come trattamenti di finitura su tessuti come lana e cotone, conferendo loro utili proprietà come migliore lavabilità e minor propensione allo stropicciamento.

Altre applicazioni si riscontrano in oggetti utili ai disabili. Ad esempio sono stati sviluppati dei manici per posate capaci di prendere la forma adatta alla particolare esigenza della persona immergendoli in acqua calda e deformandoli (Fig. 3-13). Dopo un raffreddamento, la forma raggiunta è impressa al manico e la posata è pronta per l'uso da parte del disabile. Questo è stato utile e vantaggioso in termini di produzione e flessibilità, in quanto con un unico pezzo si può rispondere a diverse esigenze di forma e posizione del manico.

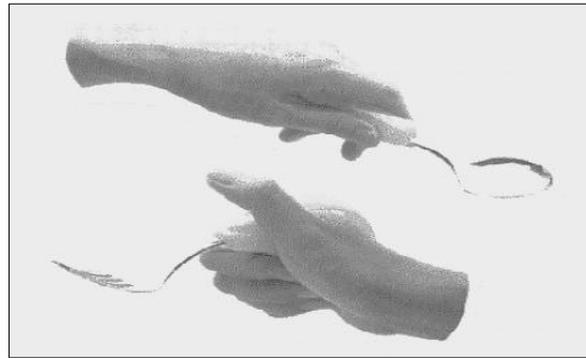


Fig. 3-13 Posate con manici in SMP [39].

Per quanto concerne la tecnologia CHEM, si è già sottolineato come le maggiori applicazioni siano nel settore aerospaziale, ma si vogliono elencare alcuni esempi applicativi anche in altri settori [41]: schermi protettivi *deployable*, tende da campeggio o arredamenti da esterni. Per questi articoli, la temperatura di transizione vetrosa T_g deve essere leggermente superiore alla massima temperatura operativa per garantire la stabilità della forma ed evitare recuperi indesiderati di forma. I maggiori vantaggi che si possono trarre sono sicuramente quelli di minori masse e ottime capacità di *packaging* che consentono una facile trasportabilità.

Altri esempi e settori applicativi possono essere: serbatoi *deployable*, filtri, giocattoli, schermature elettromagnetiche, insonorizzatori, dispositivi per l'assorbimento di energia, per le costruzioni e per il settore automobilistico di energia, ecc.

3.5. Modellazione

Da un punto di vista della modellazione termomeccanica, il meccanismo che sta alla base dello SME dei polimeri a memoria di forma e degli ibridi a memoria di forma è molto simile e quindi si può trattare nello stesso modo [2].

Facendo un confronto con le SMAs, il progresso nella modellazione delle relazioni costitutive degli SMPs è meno proficuo e veloce. Gli studi su questi materiali sono numerosissimi e nuove idee e tecnologie sono presentate per realizzarne di nuovi, con prestazioni sempre più spinte. Nonostante ciò, basandosi sulle pubblicazioni scientifiche presenti, si può affermare che sono solo un paio gli SMPs che sono stati esaminati in modo approfondito in termini di proprietà termomeccaniche e di memoria di forma. L'interesse è stato riposto nei confronti dei polimeri termosensibili, in particolare verso il poliuretano (PU), e per essi sono stati sviluppati dei modelli di tipo fenomenologico che riescono sì ad interpretare in modo accurato i dati sperimentali, ma solo in semplici condizioni (ad esempio stato di stress/tensione uniassiale). Dall'altra parte, data l'estrema complessità della microstruttura dei polimeri, i

modelli microstrutturali trovano molte difficoltà nel prevedere quantitativamente il comportamento nelle reali applicazioni ingegneristiche.

Per questa categoria di polimeri sono state condotte analisi strutturali, simulazioni su micro, meso e macro-scala e simulazioni dinamiche a livello molecolare; attraverso la modellazione macroscopica sviluppata è possibile prevedere in modo abbastanza preciso il loro comportamento, sotto diverse condizioni al contorno [38].

Anche per i polimeri a memoria di forma sono state studiate le superfici di snervamento, ma anche in questo caso in modo ridotto rispetto alle SMAs [2]. Inoltre, è stato dimostrato che per molti SMPs non è necessario avere un modello completo, ma che potrebbe bastarne uno che interpreti solo alcune fasi dell'intero completamento.

In [44] viene proposto uno dei modelli costitutivi realizzati per caratterizzare il comportamento termomeccanico di un polimero a memoria di forma.

Sapendo che il numero di SMPs tuttora studiati e realizzati è molto elevato, è facile capire come vi sia una complessità di base nel realizzare dei modelli con validità generale e che riescano a comprendere tutta la fenomenologia su cui si basa il comportamento di questi materiali. I modelli esistenti quindi, sono applicabili ognuno ad uno specifico set di polimeri con determinati parametri. Per far fronte a queste lacune è necessario trovare nuovi modelli per differenti sistemi di SMPs, che siano più generici in modo da essere universalmente applicabili.

Essendo la simulazione agli elementi finiti uno step importante nella progettazione di un dispositivo, i modelli costitutivi dovranno essere il più possibile semplici da implementare e di facile comprensione per l'utilizzatore.

4. MATERIALI IBRIDI A MEMORIA DI FORMA

In questo paragrafo si trattano alcune tipologie di materiali a memoria di forma che sembrerebbero distanti tra loro, ma volontariamente sono state raggruppate nello stesso capitolo. Infatti tutte considerano dei materiali che sono l'unione di singoli costituenti, e che quindi possiamo in generale definire come materiali ibridi.

Come si è già avuto modo di dire, la classificazione e la denominazione degli SMMs non è ancora completamente accettata e definita, e in letteratura si trovano definizioni discordanti anche per quanto concerne questi gruppi.

In generale, il fatto di incorporare materiali funzionali all'interno di materiali strutturali è rivolto alla realizzazione di strutture composite funzionali o multifunzionali che rientrano perfettamente nella definizione di materiali *SMART*.

Nella progettazione di un generico materiale ibrido a memoria di forma che comprenda più materiali *SMART*, i costituenti sono scelti in modo tale che alcune proprietà si sovrappongano, a seconda dell'applicazione (Fig. 4-1) [37]. Esempi di queste proprietà sono il tempo di risposta del materiale, gli intervalli di variazione dei moduli elastici e della conduttività, i range di trasformazione dei componenti, ecc. I costituenti possono interagire sia a livello micro sia macroscopico presentandosi sotto forma di laminati, inclusioni (particelle, fibre, fili), tessuti o meccanismi. Ogni disposizione porterà a un materiale finale la cui risposta potrà essere la sovrapposizione delle singole risposte, la "rivalità" tra le risposte o la combinazione di caratteristiche strutturali di un componente con quelle di attuazione dell'altro.

In generale, quando si considerano materiali che contemplano l'esistenza di più costituenti, particolare attenzione deve essere posta nei confronti della compatibilità e dell'invasività degli stessi. Aspetti tecnologici rivelanti sono:

- preparazione dei materiali all'inglobamento;
- sviluppo di tecniche di inglobamento;
- capacità di trasferimento del carico tra i costituenti;
- interfaccia e compatibilità tra costituenti;
- sviluppo di strumenti per la simulazione numerica;
- caratterizzazione per la validazione tecnologica.

Per la progettazione di un dispositivo con materiali ibridi a memoria di forma si richiede dunque una conoscenza approfondita non solo delle proprietà dei singoli elementi, ma anche di tutti i fenomeni che si instaurano una volta che il materiale viene realizzato.

Nei paragrafi seguenti si cercherà di chiarire la definizione e le peculiarità di questa categoria di SMMs.

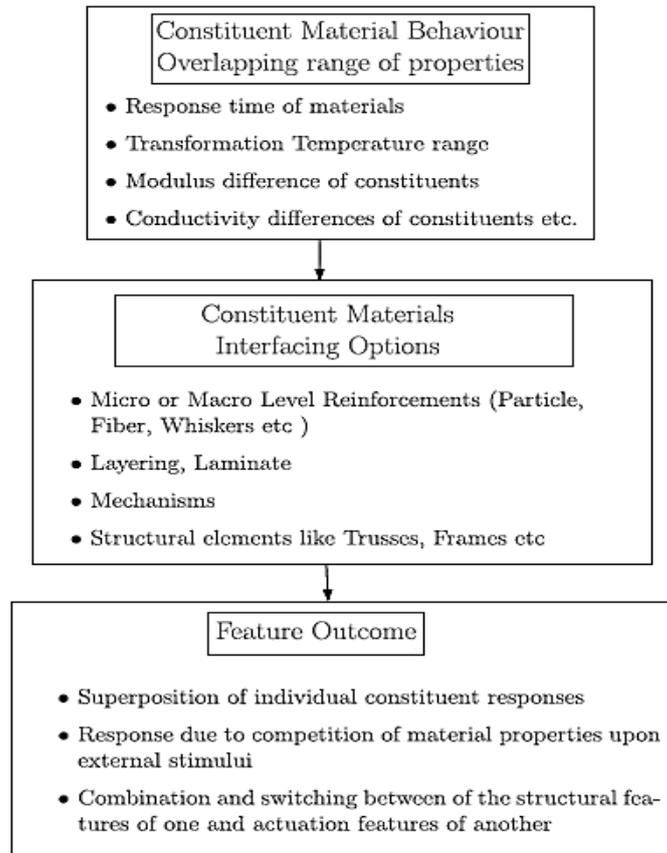


Fig. 4-1 Schema generale per la progettazione di un materiale ibrido a memoria di forma [37].

4.1. Ibridi a memoria di forma

Gli ibridi a memoria di forma (*shape memory hybrids*, SMHs) sono una particolare categoria di materiali che sono stati sviluppati per far fronte alla difficoltà di reperire in modo conveniente e veloce le conoscenze riguardanti le SMAs e gli SMPs [2]. Essi sono costituiti da materiali di base che non presentano effetto a memoria di forma e dei quali si conoscono in modo chiaro e definito le proprietà. La progettazione di un componente con questi materiali risulta quindi relativamente semplice potendosi basare su conoscenze note e potendo eseguire il processo con buona ripetibilità.

In uno SMH, sia la matrice sia le inclusioni non devono per forza essere polimerici, ma si possono scegliere fra tutti i materiali disponibili (metallici, organici, inorganici, ecc.) per poter meglio raggiungere gli obiettivi richiesti dal materiale finale (Fig. 4-2).

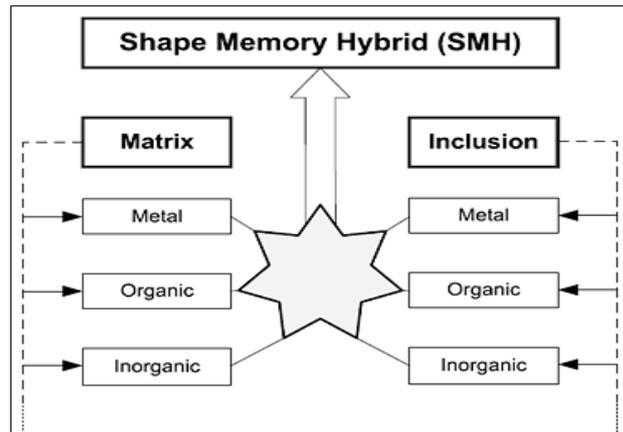


Fig. 4-2 Matrici e inclusioni per SMHs [2].

Nonostante gli ibridi a memoria di forma non siano costituiti da materiali che esprimano singolarmente SME, essi lo possono ugualmente esplicare ed in maniera simile a quello degli SMPs.

I componenti di uno SMH non hanno particolari interazioni chimiche e quindi le relative proprietà possono essere mantenute facilmente. Inoltre ciò dà la possibilità di prevedere il comportamento del materiale sin dalla sua formazione, dal momento che si conoscono le temperature caratteristiche dei costituenti e le proprietà.

Vengono elencati alcuni esempi di combinazioni di materiali che possono costituire un ibrido a memoria di forma [2]:

- matrice di silicone e inclusioni di cera;
- matrice di spugna elastica e inclusioni di solfato rameico pentaidrato; la grande solubilità del solfato rameico è il motivo per il quale esso viene utilizzato per raggiungere caratteristiche di “risposta all’acqua”.

La ricerca su questi materiali è tuttora in forte espansione e richiede ancora l’esecuzione di molte prove sperimentali e verifiche per completare la conoscenza delle loro proprietà meccaniche, fisiche, chimiche, ecc..

Dai dati sinora raccolti si è osservato come gli SMHs possano essere suddivisi nelle seguenti categorie [2]:

- *thermo-responsive*;
- *multi-stimuli-responsive*;
- *pressure-responsive*;
- simili alla gomme con capacità di auto-riparazione.

Nel caso degli ibridi *thermo-responsive*, la forma è recuperata dopo il riscaldamento del materiale, che può avvenire anche per semplice immersione in acqua calda. Un esempio è quello già citato composto di silicone e cera; esso manifesta un ottimo effetto di memoria di forma [2].

Per gli ibridi *multi-stimuli-responsive* hanno osservato che essi “rispondono” e reagiscono a più di uno stimolo, ad esempio calore e acqua. Un esempio ne è l’ibrido costituito da matrice di spugna elastica e inclusioni di sodio acetato triidrato [2].

Tra i materiali tradizionali, quelli sensibili a un tensione (ad esempio la pressione) sono stati ampiamente studiati e analizzati. Nel settore dei materiali a memoria di forma, questi fenomeni non sono ancora del tutto chiari. Vengono proposti due approcci per raggiungere le caratteristiche di *pressure-responsive* [2]. Il primo è quello che prevede l’inserimento in uno SMM di particolari riempitivi *thermo-responsive* capaci di generare calore quando sottoposti a pressione, così che lo SMM possa auto-riscaldarsi per il recupero della forma. Il secondo approccio è basato sul concetto degli SMPs, dove il segmento di transizione (inclusione) si ammorbidisce quando viene compresso.

L’effetto a memoria di forma fa riferimento al recupero della forma, ma un crescente interesse nella meccanica strutturale è riposto anche nei confronti del recupero di forza, essendo quest’ultimo legato alla capacità di un materiale di auto-ripararsi. Molte delle tecniche sviluppate impiegano degli agenti riparanti che sono inseriti in micro-capsule o direttamente rilasciati in micro-canali nella posizione in cui sono presenti micro-cricche. Queste soluzioni però sono applicabili solo per cricche di grandezza limitata e sono efficienti fino a quando l’agente non viene completamente consumato. Un altro fattore rilevante è il tempo, trattandosi di un fenomeno di polimerizzazione.

Un altro metodo studiato per indurre l’auto-riparazione fu quello di sfruttare il movimento browniano indotto delle catene del polimero, ma si rivelò essere molto poco performante.

Quello che invece si è dimostrato è che gli ibridi a memoria di forma silicone/adesivi hanno un’immediata e ripetibile capacità di un’auto-riparazione [2]. In Fig. 4-3 è riportato un campione di SMH, composto da una molla interna di SMA che provvede al riscaldamento dell’ibrido che la ricopre (a). Quest’ultimo viene allungato fino a rottura (b1), mantenendo il collegamento attraverso la molla (b2). Al passaggio di corrente elettrica nella molla, non solo le due parti di SMH si riuniscono, ma anche l’intero campione si riscalda (b3, b4). Dopo un successivo raffreddamento fino alla temperatura ambiente, quando viene applicata una flessione (d), il pezzo di SMH ritorna elastico e non presenta fratture (d).

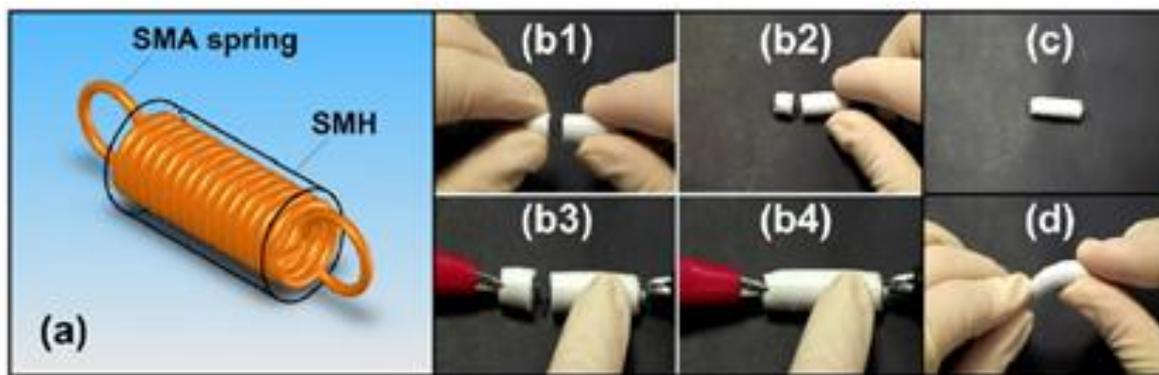


Fig. 4-3 Auto-riparazione in uno SMH [2].

4.2. Compositi ibridi con elementi in SMAs

In letteratura non è ben chiara la definizione di questi materiali, ma in generale sono definiti come compositi convenzionali con elementi immersi in lega a memoria di forma (*shape memory alloy hybrid composite*, SMAHC).

Diversi studi si sono occupati degli SMAHCs e in particolar modo si può far riferimento ai lavori svolti da Turner and al. [25-29], focalizzati su materiali compositi in resina epossidica con fibre di vetro e aggiunta di elementi in Nitinol.

I primi a sviluppare l'idea di inserire degli attuatori in SMA all'interno di laminati compositi furono Rogers e Robertshaw [45].

Per questi materiali è stato realizzato, sempre da Turner [30, 46-48], il già citato modello costitutivo termomeccanico per lo studio della risposta statica e dinamica delle strutture SMAHC (composito resina epossidica con fibre di vetro e elementi in Nitinol) (paragrafo 2.7.2). Il modello coglie la non linearità termica della SMA e della matrice composita, ma essendo di natura macromeccanica esso è basato solamente su misurazioni delle principali proprietà meccaniche.

Altri esempi di SMAHC comprendono materiali CFRP con aggiunta di Nitinol [37].

Si è già più volte detto come le leghe a memoria di forma vengano impiegate come attuatori perché capaci di sviluppare elevate tensioni di recupero (> 400 [MPa]) e recuperare la deformazione fino anche l'8%. Anche per gli SMAHCs vengono sfruttate queste caratteristiche per soddisfare i requisiti di queste strutture.

Le leghe a memoria di forma sono realizzate in diverse configurazioni quali fibre, nastri, fili o film sottili per poi poter essere inserite in matrici polimeriche. Solitamente, se si impiegano i fili, essi vengono pretensionati prima dell'inserimento della matrice perché si è dimostrato come abbiano un miglior comportamento di recupero della forma [37]. Il vantaggio di inserire fibre pretensionate di TiNi sta nella loro eccellente forza di recupero e nella facilità del processo per imporre la predeformazione (semplice applicazione di un carico di trazione variabile).

Un fattore che va a influire sulla deformazione di recupero è non solo la pretensione dei fili, ma anche il numero di fibre contenute: la deformazione di recupero aumenta all'aumentare del numero di fibre (**Fig.**).

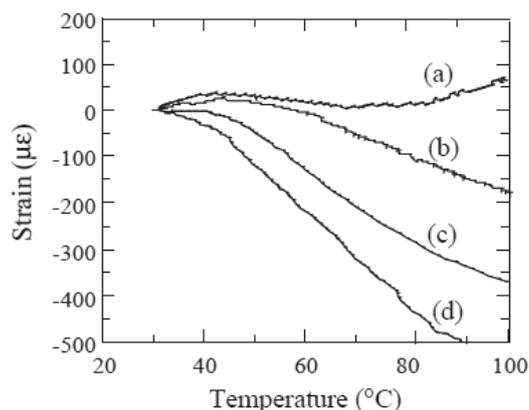


Fig. 4-4 Influenza del numero di fibre NiTi inserite sulla deformazione generata dalle forze di recupero per un composito TiNi/CFRP: (a) fibra singola. (b) 2 fibre . (c) 4 fibre (d) 6 fibre [37].

In questi materiali, le leghe a memoria di forma possono essere impiegate anche con lo scopo di riparare delle micro-cricche trasversali che si possono formare all'interno del composito (Fig. 4-5) [46]. Nella Fig. 4-5 (a) viene riportata l'immagine al microscopio elettronico di una frattura nella lamina con inclinazione 90° , sottoposto ad una tensione di trazione di 150 [MPa]; nella Fig. 4-5 (b) è rappresentato lo stesso provino, dopo essere stato riscaldato a 90°C per effetto Joule. Come si può osservare, dopo il riscaldamento la cricca si chiude a causa della tensione di compressione indotta dall'attuazione delle fibre di SMA. Il processo di riparazione può essere spiegato nel modo seguente: le fibre pretensionate di SMA inizialmente hanno una struttura martensitica e quando il composito contenente la cricca viene scaldato sopra la temperatura di fine austenite A_f avviene la trasformazione dalla fase martensitica a quella austenitica. In altre parole, le fibre cercano di recuperare la forma originale e si restringono, introducendo forze di compressione nella matrice in CFRP. La cricca viene quindi riparata perché la forza di recupero delle fibre di SMA è maggiore della tensione di compressione richiesta per la chiusura della cricca.

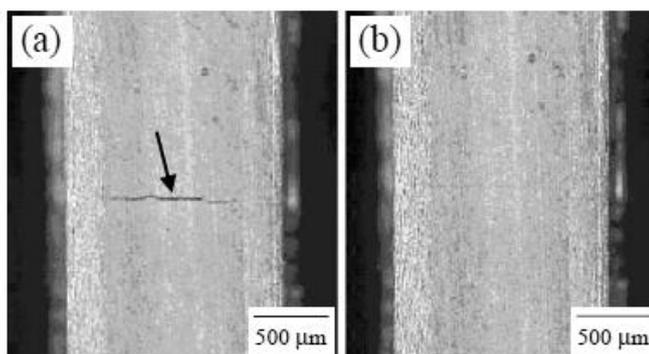


Fig. 4-5 Riparazione di una cricca trasversale [46].

I compositi solitamente impiegati sono materiali a matrice polimerica con fibre di carbonio (CFRP) o di vetro (*glass-epoxy*). I CFRP sono impiegati come matrice per gli SMAHCs per applicazioni soprattutto strutturali in quanto hanno un'elevata resistenza a trazione, un elevato modulo elastico e bassa densità. Entrambi vengono utilizzati perché si prestano bene all'inserimento di leghe a memoria di forma in termini di comportamento termoelettrico.

4.3. Compositi di SMAs e SMPs

A differenza degli SMHs, in cui i due componenti non manifestano singolarmente l'effetto a memoria di forma, in questo caso entrambi lo manifestano. Infatti si tratta di materiali costituiti da leghe a memoria di forma e da polimeri a memoria di forma.

Anche per questa categoria, in letteratura le definizioni sono contrastanti; in certe pubblicazioni sono denominati anche “sistemi di materiali *SMART* multifunzionali” [49], quando invece in altre occasioni questa definizione copre una ben più vasta tipologia di materiali, comprendendo tutti i materiali *SMART*. In questa trattazione saranno semplicemente detti compositi di SMAs e SMPs.

Sarà considerato il caso in cui entrambi i materiali a memoria di forma sono di tipo *thermo-responsive*.

Si ricorda come per le SMAs siano rilevanti i fenomeni di memoria di forma e di pseudoelasticità, mentre per gli SMPs lo è temperatura di transizione vetrosa T_g , parametro discriminante tra la fase gommosa e quella vetrosa.

Combinando i due sistemi si ottiene un materiale con una risposta diversa e più avanzata rispetto alle singole risposte dei componenti.

Si sono già ampiamente trattati i vantaggi e gli svantaggi di questi due sistemi, sottolineando anche come essi vengano impiegati in associazione ad altri compositi per far fronte alle loro limitazioni.

Per i compositi di SMAs e SMPs si cerca di sfruttare la copresenza di diverse temperature di transizione per sviluppare sistemi con caratteristiche differenti in diversi regimi di temperatura (Fig. 4-6). La temperatura di transizione vetrosa T_g può essere programmata tra la M_f e la A_s per ottenere differenti rigidità del materiale. La T_g può essere modificata operando sulla composizione delle specie chimiche aggiunte al composito. Dalla stessa figura si osserva come il modulo del polimero vari di due ordini di grandezza in base alla temperatura a cui si trova, sopra o sotto la T_g . Il modulo della SMA è sempre di due ordini di grandezza superiore a quello dello SMPs. Questa differenza tra le rigidità dei costituenti indica che la frazione di volume della SMA deve mantenersi bassa in quanto un valore elevato porterebbe ad un comportamento dominante della lega su tutto l'intervallo di temperatura, provocando, se sottoposto a cicli, il suo distacco dalla matrice polimerica. Anche il fatto che le proprietà meccaniche dei costituenti dipendano dalla temperatura permette di adattare il comportamento globale del materiale alle particolari esigenze.

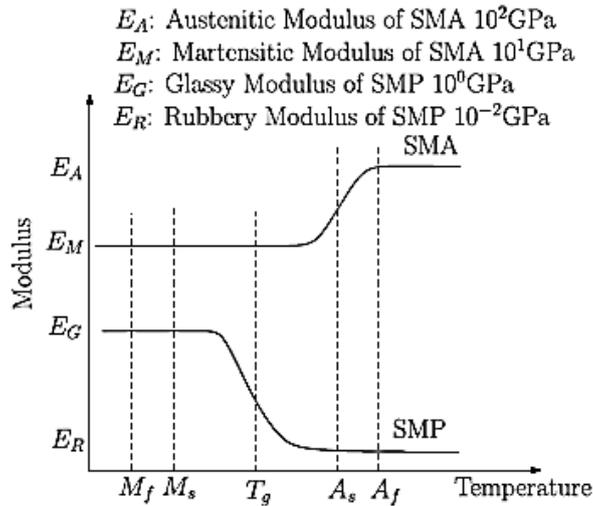


Fig. 4-6 Confronto tra i moduli di SMA e SMP rispetto le temperature di trasformazione [37].

Per quanto appena detto sulle frazioni di volume di SMA e SMP, si riportano a titolo di esempio alcune relazioni utili per stabilire questi valori e per comprendere il comportamento delle rigidità dei due componenti.

Siano:

- n il numero di rinforzi in SMA;
- L la lunghezza del composito;
- W la larghezza del composito;
- H altezza del composito;
- V^{SMA} , V^{SMP} e V^C volumi rispettivamente di SMA, SMP e composito;
- A^{SMA} , A^{SMP} aree delle sezioni rispettivamente della SMA e dello SMP;
- I_{SMA} , I_{SMP} momenti d'inerzia rispettivamente di SMA e SMP.

Si definiscono:

$$V^{SMA} = n \times \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \times L$$

$$V^{SMP} = L \times W \times H$$

$$V^C = V^{SMA} + V^{SMP}$$

Solitamente in questi compositi si preferisce avere la configurazione rigida della SMA alle alte temperature ($T > A_f$) e quella rigida dello SMP alle basse temperature ($T < T_g$). Come già detto, la T_g è compresa tra la M_f e la A_s . In questo particolare caso ci saranno due configurazioni rigide stabili, caratterizzate dalle singole rigidità:

$$T < T_g \longrightarrow k_{SMA} < k_{SMP} \quad (\text{Eq. 39})$$

$$T_g < T < A_s \longrightarrow k_{SMA} < k_{SMP} \quad (\text{Eq. 40})$$

$$T > A_s \longrightarrow k_{SMA} > k_{SMP} \quad (\text{Eq. 41})$$

In prima approssimazione si può semplificare l'Eq. in $k_{SMA} \approx k_{SMP}$. Nell'intervallo di temperature $T_g < T < A_s$, la SMA si trova in fase martensitica, mentre il polimero risulta gommoso. A differenza del tipo di carico applicato e della temperatura operativa vengono calcolate le rigidità. In generale valgono le seguenti formule:

$$k_{SMA}^{ass} = \frac{E_{SMA}^M \times n^M \times A_{SMA}}{L_{SMA}} \quad \text{per carico assiale durante il riscaldamento} \quad (\text{Eq. 42})$$

$$k_{SMA}^{ass} = \frac{E_{SMA}^A \times n^A \times A_{SMA}}{L_{SMA}} \quad \text{per carico assiale durante raffreddamento} \quad (\text{Eq. 43})$$

$$k_{SMP}^{ass} = \frac{E_{SMP}^{rub} \times A_{SMP}}{L_{SMP}} \quad \text{per carico assiale durante raffreddamento e riscaldamento} \quad (\text{Eq. 44})$$

$$k_{SMA}^{fless} = \frac{E_{SMA}^M \times n^M \times I_{SMA}}{L_{SMA}^3} \quad \text{per carico di flessione durante riscaldamento} \quad (\text{Eq. 45})$$

$$k_{SMA}^{fless} = \frac{E_{SMA}^A \times n^A \times I_{SMA}}{L_{SMA}^3} \quad \text{per la un carico assiale durante raffreddamento} \quad (\text{Eq. 46})$$

$$k_{SMP}^{fless} = \frac{E_{SMP}^{rub} \times I_{SMP}}{L_{SMP}^3} \quad \text{per carico assiale durante raffreddamento e riscaldamento} \quad (\text{Eq. 47})$$

Applicando le formule precedenti, a ogni condizione di carico si può determinare il numero di fibre, n^A o n^M , in termini dei moduli della lega e del polimero e delle dimensioni della matrice. Una volta definite le variabili (H_{SMP} e il numero di rinforzi), le frazioni di volume si ottengono con le equazioni:

$$Vf_{SMA} = \frac{V_{SMA}}{V_C} \quad (\text{Eq. 48})$$

$$Vf_{SMP} = \frac{V_{SMP}}{V_C} \quad (\text{Eq. 49})$$

Si prendano queste relazioni solamente come indicative, poichè sono rappresentative di una delle tante configurazioni che si possono realizzare.

Si è visto, quindi, come i parametri critici per la realizzazione di questi materiali siano le temperature di trasformazione della SMA e dello SMP ($M_f < T_g < A_s$) ed il numero di rinforzi di lega a memoria di forma nel composito, determinate dall'uguaglianza $k_{SMA}^{austenite} = k_{SMP}^{gommoso}$.

Nelle realizzazioni pratiche si possono trovare le seguenti configurazioni:

- SMA incassate nel polimero;
- SMA avvolta attorno allo SMP;
- SMA modellata sulla superficie del polimero.

Diversi componenti sono stati realizzati sfruttando le configurazioni precedenti, conferendo al materiale capacità diverse per ognuna. In [46] vengono spiegati i dettagli e le peculiarità di ogni caso. In generale, i campioni realizzati offrono spunti interessanti per applicazioni quali

sistemi di monitoraggio della temperatura, strutture *morphing*, meccanismi di serraggio o sistemi di apertura automatica di valvole.

Le applicazioni che possono trovare questi compositi sono molteplici e potrebbero coprire diversi settori: medico, aerospaziale e aeronautico, degli attuatori, robotica, ecc.. Potrebbero essere dei candidati per sostituire i semplici polimeri a memoria di forma in quelle applicazioni dove sia necessaria una maggiore rigidità.

Ad oggi, una delle applicazioni più rilevanti per questi materiali è nel campo della microchirurgia poco invasiva, con lo sviluppo di nuovi cateteri con proprietà meccaniche avanzate e caratteristiche di biocompatibilità e flessibilità d'impiego.

5. ALTRE TIPOLOGIE DI MATERIALI SMART

In questo capitolo saranno trattate tre categorie di *SMART materials*, meno conosciute e diffuse rispetto alle leghe e ai polimeri a memoria di forma. Nell'ordine si parlerà dei polimeri elettroattivi, dei gel a memoria di forma, delle ceramiche a memoria di forma ed infine dei matamateriali.

5.1. Polimeri elettroattivi

5.1.1. Caratteristiche e proprietà

I polimeri elettroattivi (*electroactive polymers*, EAPs) sono una classe particolare di polimeri che si deformano se sottoposti a stimoli elettrici [50] e vengono inseriti nella categoria dei materiali a cambio di forma (*shape change materials*, SCMs). Prima di essi furono sviluppati i polimeri elettroattivi ceramici (*electroactive ceramic*, EAC), impiegati soprattutto per gli attuatori.

I primi studi che s'interessarono a questi polimeri risalgono agli ultimi anni dell'800 quando iniziarono ad indagare sugli effetti dell'applicazione di corrente elettrica particolari gomme [50]. Furono approfonditi diversi aspetti: entità della deformazione, corrente di attivazione, variazione di volume, effetto piezoelettrico, ecc. Negli anni si succedettero diverse ricerche e nei primi anni '90 si scoprirono le grandi capacità di deformazione degli EAPs, dando inizio al loro sviluppo nel settore ingegneristico.

I polimeri elettroattivi godono della proprietà di esercitare uno spostamento nettamente maggiore rispetto a quelli ceramici, che invece risultano essere piuttosto rigidi. Dimostrano anche una maggiore forza di attuazione, una minor densità e una buona conduttività termica. Inoltre hanno un'elevata elasticità e abilità a indurre grandi sollecitazioni. Un fattore da tenere in considerazione è la potenza consumata per l'attivazione, che per i polimeri elettroattivi è dell'ordine dei milliwatt, mentre per quelli ceramici dei watt. Ciò vuol dire che gli EAPs reagiscono anche a stimoli di pochi volt. Per contro, essi hanno una robustezza alquanto scarsa e questo è uno tra i loro maggiori limiti, assieme alla bassa efficienza di conversione.

In Tab. 5-1 sono riportati dei valori di confronto tra le due tipologie di polimero.

CARATTERISTICHE	EAC	EAP
Forza di attuazione	0,1-0,3%	>10%
Velocità di reazione	Dal microsecondo al secondo	Dal microsecondo al secondo
Densità	6-8 g/cc	1-2,5 g/cc
Voltaggio di guida	50-800 volt	10-100 volt
Potenza consumata	Watt	milliwatt
caratteristiche	Fragilità	elasticità

Tab. 5-1 Confronto per le proprietà di EAC ed EAP [51].

Vi sono svariate tipologie di polimeri elettroattivi, ma in generale si possono classificare in dielettrici e ionici, secondo il tipo di attuazione.

I polimeri dielettrici sono materiali in cui l'attivazione è causata da forze elettrostatiche tra due elettrodi che premono il polimero (Fig. 5-1). Gli elastomeri dielettrici sono capaci di elevate deformazioni e fondamentalmente sono dei condensatori che variano la loro capacità quando viene applicata una tensione; sui due elettrodi si creano due potenziali contrapposti e i due piatti si attraggono. In questo modo il polimero si comprime nella direzione dello spessore e si espande nell'area a causa del campo elettrico applicato.

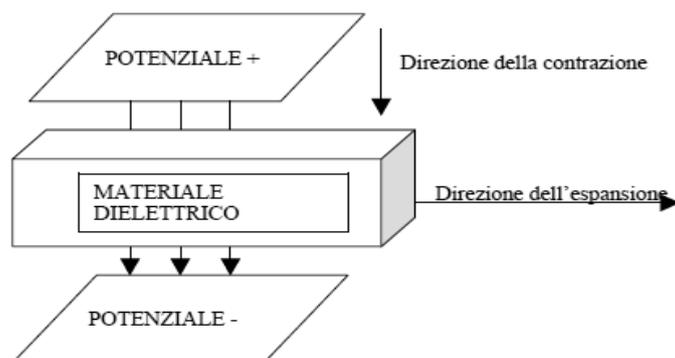


Fig. 5-1 Principio di funzionamento di un EAP dielettrico [51].

Questa categoria di EAPs richiede solitamente un'elevata tensione di attuazione (centinaia di migliaia di volt) per produrre elevati campi elettrici, ma un consumo di potenza elettrica molto basso. Per il mantenimento della posizione, ad esempio in un attuttore, non è richiesto l'impiego di energia.

Esempi di polimeri appartenenti a questo gruppo sono i polimeri elettrostrittivi, gli elastomeri dielettrici, elastomeri elettro-viscoelastici, polimeri ferroelettrici, ecc.

Nei polimeri elettroattivi ionici invece, l'attuazione è causata dallo spostamento degli ioni all'interno del polimero. Solamente pochi volt sono necessari per l'attivazione, ma il flusso ionico implica una grande potenza elettrica ed è richiesta energia per il mantenimento della posizione. Presentano un basso accoppiamento termomeccanico. Inoltre, questo tipo di polimeri non è adatto ad applicazioni spaziali a causa della volatilità dell'elettrolita contenuto in essi, che rende difficoltoso il mantenimento delle proprietà del materiale.

Esempi di EAPs ionici sono i polimeri conduttivi, i compositi ionici polimero-metallo (*ionic polymer-metal composites*, IPMCs), i gel sensibili, fluidi elettroreologici (diventano viscosi se percorsi da corrente) e i nanotubi in carbonio.

Confrontando le due categorie, i polimeri dielettrici sono capaci di mantenere lo spostamento indotto durante l'attivazione e inoltre hanno un'elevata densità di energia meccanica, a differenza dei polimeri ionici che necessitano di energia per il mantenimento della deformazione. Queste proprietà li rendono idonei ad applicazioni robotiche. Inoltre essi possono essere impiegati in aria (ambiente asciutto) senza decadimento delle prestazioni. Tuttavia questi polimeri richiedono elevati campi di attivazione che si avvicinano ai livelli di *breakdown*. Al contrario, i polimeri ionici richiedono tensioni di soli 1-2 [V]. Per contro però, questi ultimi richiedono che sia mantenuta una certa umidità; alcuni polimeri sono stati sviluppati con degli attivatori incapsulati al loro interno per permettere il loro utilizzo anche in un ambiente asciutto.

Per massimizzare le proprietà di attuazione e di robustezza degli EAPs è necessario agire su tutti gli step di progettazione dei dispositivi: sinterizzazione, fabbricazione, formatura e trattamento. Inoltre, un ruolo fondamentale lo rivestono sia la conoscenza approfondita dei meccanismi che stanno alla base del comportamento dei polimeri elettroattivi, sia una modellazione numerica accurata (modelli chimici computazionali e strumenti analitici termomeccanici).

5.1.2. In particolare: elastomeri a cristalli liquidi

Una categoria di polimeri elettroattivi recente e di particolare interesse è quella degli elastomeri a cristalli liquidi (*liquid crystal elastomers*, LCEs) [52].

Anche in questo caso la classificazione non è concorde, ma si è soliti includere questi polimeri nella categoria degli EAPs dielettrici.

Negli ultimi due decenni l'interesse verso questi materiali è notevolmente cresciuto a causa delle loro peculiarità uniche. Il fisico francese Pierre-Gilles de Gennes fu il primo a prevedere le proprietà dei LCEs, ma il maggior progresso fu opera di Küpfer e Finkelmann nel 1991, quando scoprirono un metodo per ottenere elastomeri nematici con grandi e perfetti monodomini, indispensabili per osservare gli effetti termodinamici caratteristici dei LCEs.

Gli elastomeri a cristalli liquidi definiscono una speciale tipologia di materiali che combinano le proprietà dei cristalli liquidi e dei polimeri: le proprietà termiche e di orientazione dei primi e l'elasticità dei polimeri. Il fatto che queste proprietà agiscano simultaneamente permette il raggiungimento di nuovi fenomeni fisici quali il cambio di forma a causa di variazioni di temperatura, effetti opto-meccanici estremi e l'accoppiamento roto-meccanico.

Per realizzare i LCEs è necessario unire le catene polimeriche in una rete gel per fissarne la topologia; in questo modo si raggiunge uno stato solido elastico, cioè una gomma. Alcune particolari tecniche vengono impiegate per ottenere un campione monodominio [52].

Si riassumono brevemente le caratteristiche dei costituenti di base, i cristalli liquidi e i polimeri, per meglio comprendere poi il comportamento degli elastomeri a cristalli liquidi.

I cristalli liquidi sono delle molecole rigide a forma di bastoncino con un ampio intervallo di ordine di orientazione. Queste sostanze non passano direttamente dallo stato liquido a quello solido, ma in particolari condizioni sono in grado di organizzarsi in fasi intermedie, dette mesofasi, che presentano caratteristiche sia dello stato liquido cristallino sia di quello solido. Questo dualismo giustifica il termine con cui s'indicano questi composti, ovverosia cristalli liquidi. Le mesofasi che si possono formare sono molteplici, ma quelle di interesse per i LCEs sono quelle nematiche. Esse hanno un'orientazione molecolare lungo direzioni preferenziali dette direttori, ma non hanno un ordine posizionale. La forma e i legami chimici coniugati delle unità molecolari che formano i cristalli liquidi nematici li rendono molto polarizzabili lungo l'asse di orientazione preferenziale.

Un polimero, invece, è una grande molecola (macromolecola) composta di unità strutturali che si ripetono e che solitamente sono connesse con legami covalenti. Il processo attraverso il quale i monomeri vanno a formare il polimero è detto polimerizzazione. Per comprendere

meglio il comportamento del polimero si rappresenta come una catena composta da un certo numero di asticelle (monomeri) di una data lunghezza, liberamente unite.

Le tipologie di LCE seguono all'incirca quelle dei cristalli liquidi, e si possono distinguere in:

- LCE nematici;
- LCE colesterici;
- elastomeri smectici.

L'attenzione verrà posta maggiormente sulla prima categoria.

Ciò che rende i polimeri molto estendibili è la natura simil-liquida e mobile dei monomeri che li costituiscono. Oscillazioni termiche muovono rapidamente le catene polimeriche; si deve però ricordare che la gomma è un solido e che come tale normalmente richiede un input di energia per cambiare la sua forma macroscopica. E questa è la grande differenza tra i LCEs e le gomme convenzionali. I polimeri nematici subiscono spontaneamente il cambio di forma come risposta a variazioni che avvengono a livello molecolare. Ciò significa che non occorre l'applicazione di forze esterne per cambiare la configurazione macroscopica dal momento che lo stato nematico può essere raggiunto attraverso un raffreddamento dell'elastomero a cristalli liquidi. Nello stato isotropo il polimero è in media sferico, mentre nello stato nematico dopo raffreddamento si presenta allungato (Fig. 5-2). Si può quindi affermare che un tale polimero si allunga quando viene raffreddato fino ad uno stato nematico. Il processo che porta da uno stato all'altro attraverso variazioni di temperatura è di tipo reversibile. Quanto appena descritto consente a questi materiali di raggiungere grandi deformazioni. Altre peculiarità sono la completa trasparenza e l'elevata doppia rifrazione. Infine, un'altra proprietà che viene definita accoppiamento roto-meccanico, fornisce una rotazione del direttore senza una richiesta di energia per la matrice gommosa. Le rotazioni locali sono un fattore centrale per gli elastomeri nematici e portano alla definizione di un nuovo fenomeno elastico che prende il nome di *soft elasticity*.

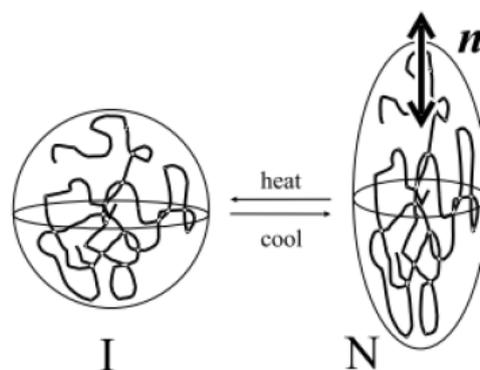


Fig. 5-2 Transizione reversibile tra gli stati isotropo e nematico di un LCE [52].

Come tutta la categoria dei polimeri, anche questo gruppo è sensibile a diversi tipi di stimoli quali temperatura, luce (irradiazione UV), corrente elettrica, ecc.

Le particolari proprietà degli elastomeri rendono questi polimeri adatti a molteplici applicazioni. Il primo settore cui si associano i cristalli liquidi è il quello dell'ottica, i LCEs, se impiegati da soli, non sono adatti alla tecnologia dei display dal momento che non possono

essere azionati attraverso campi elettrici. Per colmare questa lacuna, alcuni scienziati hanno pensato di inserire all'interno dei LCEs dei nano-tubi di carbonio, provvedimento tra l'altro preso anche nel caso dei polimeri a memoria di forma.

Il controllo e l'azionamento della doppia rifrazione consentono l'impiego come sensori optomeccanici e simili. Sistemi termomeccanici a cambio di forma o gomme con memoria di forma selettiva sono adeguati per sensori di temperatura e attuatori controllati in temperatura. Come per tutti i polimeri elettroattivi, il principale campo applicativo rimane quello dei muscoli artificiali (paragrafo 5.1.3).

5.1.3. Applicazioni

Data la facilità nella lavorazione dei materiali polimerici, gli EAPs si possono realizzare in svariate forme conferendo loro un'elevata versatilità.

Le loro particolari caratteristiche, soprattutto quelle di bassissima densità ed elevata capacità di deformazione, li hanno resi delle interessanti soluzioni nei settori aerospaziale, medico (sistemi bionici), dei muscoli artificiali, delle strutture gonfiabili e degli attuatori.

Tra le potenziali applicazioni troviamo sicuramente i muscoli artificiali, i sistemi MEMS per attuatori *smart*, sensori, superfici modellabili, display tattili, robot, ecc.

Nel settore aerospaziale, i dispositivi realizzati comprendono tergicristalli, bracci robotici (leve e sistemi di presa), interfacce tattili, attuatori. In questo campo le realizzazioni sono sottoposte alle condizioni operative più ardue (microgravità, carichi di lancio gravosi, gradienti di temperatura, ecc.) e ai requisiti più stringenti (elevate durabilità, robustezza ed affidabilità dei sistemi).

Ad esempio, il tergicristallo fu scelto come tecnologia di base per la missione MUSES-CN nel 1999 (per riportare un campione di asteroide a terra). Il programma iniziale includeva l'uso di un paio di superfici tergicristallo in EAP per la rimozione di piccole particelle di polvere dalla *visual/IR window* del nanorover (Fig. 5-3). La missione alla fine fu cancellata, ma il fatto di aver scelto i polimeri elettroattivi come tecnologia di base per tali dispositivi fu di fondamentale importanza per lo sviluppo di questi materiali.



Fig. 5-3 Prototipo del tergicristallo in EAP.

Un'altra applicazione riguarda gli specchi a film sottile. Essi rappresentano soluzioni interessanti per sistemi ottici leggeri a grandi aperture e per antenne a microonde, operanti in

ambientanti con micro-gravità [53]. La forma della superficie di queste strutture *deployable* richiede un controllo di posizione molto accurato per garantire il rispetto di precisi limiti, dipendenti dalla specifica applicazione. Gli EAPs dielettrici sono una potenziale classe di materiali per questi dispositivi.

Uno dei vantaggi dell'uso degli EAPs per gli specchi a film sottile è che essi possono fungere contemporaneamente sia da materiale strutturale sia di attuazione dello specchio. Di solito, i polimeri elettroattivi sono prodotti sotto forma di film sottili, con elettrodi sulle superfici principali. Secondo la riflettività degli elettrodi e della scabrezza della superficie del polimero, possono essere anche prodotti con una finitura a specchio. Il maggior vantaggio è la capacità di realizzare un azionamento distribuito sull'intera superficie dello specchio. Attuatori *bimorph* in fluoruro di polivinilidene (PVDF *bimorph*) vengono suggeriti per il controllo della forma; per il controllo della curvatura in due direzioni sulla superficie dello specchio i *bimorph* vengono eccitati su entrambi i lati. È così realizzato uno specchio controllabile con singolo strato di film in EAP. L'applicazione di una tensione distribuita nella parte posteriore dello specchio controlla la forma dello stesso.

Da decenni i ricercatori stanno studiando con l'obiettivo di trovare un materiale che abbia delle caratteristiche simili a quelle di un muscolo, con l'intento di impiegarlo nella realizzazione dei robot. Un muscolo ha la particolarità che, cambiando semplicemente la propria lunghezza come risposta ad uno stimolo nervoso, è in grado di esercitare un determinato tipo di forza controllata. La forza può essere di qualsiasi entità, entro i limiti del muscolo stesso. Un'altra peculiarità dei muscoli è quella dell'invarianza di scala: un muscolo lavora con la stessa efficienza in qualunque posizione e in tutte le dimensioni. Una caratteristica che contraddistingue gli ESPs è proprio la loro somiglianza operativa con il funzionamento dei muscoli naturali, trovando quindi nel settore dei muscoli artificiali il campo applicativo più fertile. Allo stesso modo di quelli naturali, i quali utilizzano per il proprio funzionamento l'energia chimica, anche i muscoli artificiali hanno bisogno di energia per contrarsi oppure allungarsi. Inoltre, la peculiarità di essere sensibili a diversi tipi di stimolo rende i polimeri elettroattivi ancor più attrattivi per i muscoli artificiali, poiché offrono una maggiore flessibilità nella scelta del meccanismo di attuazione.

Parlando di muscoli artificiali, il passo verso la robotica è breve. Infatti questa tecnologia è ampiamente sfruttata per robot che sono in grado di camminare, nuotare, volare, strisciare, afferrare (Fig. 5-4), ecc..



Fig. 5-4 Mano robotica dimostrativa degli attuatori in EAP (Jet Propulsion Laboratory, JPL) [50].

Costruire robot che imitino le operazioni e le sembianze umane o degli animali è una sfida che sembra riguardare il mondo della finzione, ma con l'attuale sviluppo della scienza ingegneristica, chimica e dei materiali ciò non è affatto lontano dalla realtà. Questi robot prendono il nome di biomimetici (*biomimetic robots*).

I grandi spostamenti che si possono ottenere impiegando gli EAPs, a fronte di piccola massa, bassa potenza e a volte anche bassa tensione di attuazione, li rendono materiali molto attraenti per gli attuatori, che sono i dispositivi alla base della movimentazione dei vari componenti di un robot.

Oltre alla realizzazione di bracci robotici, una tendenza è di creare robot simili agli insetti. Ciò è utile in quelle operazioni di ricerca e ispezione in zone difficili da raggiungere con aerei o simili. Essi vengono lanciati nell'area di interesse per monitorare determinati parametri i cui valori possono essere o archiviati in dispositivi di memoria o direttamente trasmessi ad una centrale operativa.

Lo stesso discorso vale anche per mini-robot terrestri che possono essere inviati in zone pericolose da raggiungere per l'uomo o difficilmente esplorabili dai mezzi di grandi dimensioni.

Gli obiettivi di queste missioni variano dall'ambito scientifico di ricerca ed esplorazione a quello militare di ricognizione e spionaggio.

Recentemente, un'estensione dei suddetti concetti si è rivolta nei confronti di robot e simulatori comandati a distanza, capaci di "sentire" in remoto gli stimoli o l'ambiente virtuale che li circonda. A questo scopo i ricercatori puntano allo sviluppo di sistemi tattili di feedback realizzati in EAPs [50].

Un altro ambito in cui trovano impiego gli EAPs, e soprattutto i LCEs, è quello dei display aptici. Ci si riferisce a una tecnologia che si interfaccia con l'utente attraverso il tatto (un movimento o l'applicazione di una forza). Tuttavia, il tempo di risposta degli elastomeri è basso (dell'ordine dei minuti) e ciò non è consentito in queste applicazioni. Per rendere la velocità di risposta appropriata alle esigenze, vengono inseriti all'interno dei polimeri dei segmenti di nano-tubi di carbonio (*carbon nanotube*, CNT), formando quelli che vengono definiti compositi CNT-LCE [52].

Un problema si presenta quando si rimuove il calore dal pezzo, poiché il processo risulta lento a causa delle proprietà isolanti degli elastomeri. Per accelerare il raffreddamento, una tecnica usata è quella di includere particelle conduttive nel polimero. Purtroppo però, in generale, la presenza di particelle di carbonio nella miscela di pre-polimerizzazione inibisce la formazione di un reticolo con proprietà di un cristallo liquido. Diverse soluzioni sono in via di sviluppo per eliminare questa limitazione, ma non sembra ancora del tutto risolta.

Concludendo, la letteratura disponibile è ricca di informazioni che riguardano gli EAPs e molti studi sono in corso per capire ancor meglio il loro comportamento e cercare di ottimizzarlo soprattutto in termini di robustezza e bassa efficienza di conversione.

In <http://ndea.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/aa-hp.htm> si possono trovare diversi articoli riguardanti le applicazioni degli EAPs in campo aerospaziale e per i muscoli artificiali.

5.2. Gel a memoria di forma

Alla grande famiglia degli *SMART materials* appartengono anche i gel a memoria di forma (*shape memory gels*, SMGs) [54].

I gel sono dei materiali soffici e bagnati che hanno dato vita da qualche anno ad una nuova branca della scienza dei materiali. Diverse sono le caratteristiche esclusive che essi presentano: elevata capacità di assorbire acqua, morbidezza, trasparenza e attrito estremamente basso. La trasparenza non è importante solamente dal punto di vista estetico o per il settore oculistico, ma anche per l'analisi della struttura interna del gel che è resa possibile attraverso tecniche di DLS (*dynamic light scattering*).

Vi sono diverse tipologie di gel a memoria di forma. I gel a doppia-rete sono costituiti da componenti polimerici rigidi e flessibili che mostrano un comportamento meccanico superiore nonostante il grande contenuto d'acqua. Gel contenenti particelle fluorescenti potrebbero diventare materiali promettenti nel campo delle nanotecnologie. Di recentissima realizzazione sono i gel a memoria di forma, capaci di memorizzare la forma originale che avviene durante il processo di gelificazione.

Molte sono le proprietà degli SMGs che sono state studiate e discusse, ma vi sono delle lacune nella trattazione del comportamento dinamico. In generale, essendo entrati da poco nello scenario ingegneristico, per questi materiali non sono disponibili grandi quantità di informazioni sulle loro proprietà meccaniche e fisiche.

A titolo di esempio, si riportano alcune osservazioni sullo studio condotto da Hasnat Kabir and al. [54]. La soluzione trasparente di SMG è preparata con la tecnica senza solvente. I monomeri impiegati sono stati: N, N-dimetil-acrilamide (agisce anche da solvente essendo allo stato liquido a temperatura ambiente) e stearilacrilato (con caratteristiche cristalline); come agente reticolante è stato impiegato il metilen-bis-acrilammide. Altri elementi sono stati aggiunti per implementare alcune proprietà [54]. Dai test eseguiti, hanno dimostrato che il gel è capace di propagare la luce, rendendolo un possibile materiale per applicazioni ottiche. Inoltre hanno indicato il suo ciclo di recupero della forma, schematizzato in Fig. 5-5.

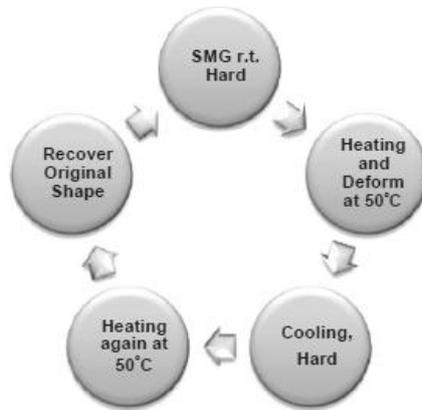


Fig. 5-5 Ciclo di recupero della forma di uno SMGs [54].

Si osserva come il gel si presenti duro a temperatura ambiente e sia deformato quando sottoposto a riscaldamento ad una temperatura di 50 °C. Il gel viene poi raffreddato, ritornando duro. In seguito viene riscaldato di nuovo a 50 °C, manifestando il recupero della configurazione originale. Se portato nuovamente alla temperatura ambiente esso ritorna duro. Ciò ha dimostrato che la struttura reticolare ricorda la propria forma durante il processo di gelificazione.

Anche analizzando il ciclo precedente si può dire che il gel diventa tenero alle alte temperature potendolo così deformare, a differenza dei precedenti gel che presentavano un comportamento fragile. Hanno anche dimostrato che la trasparenza si mantiene sia alle basse sia alle alte temperature.

Le potenziali applicazioni riguardano: bendature per ossa fratturate, lenti ottiche, bulbi oculari artificiali, pulsanti *smart* come dispositivi di input.

Sebbene non sembrano esempi che riguardino l'ambito aerospaziale, con un futuro sviluppo, si può pensare che i gel a memoria di forma possano diventare dei possibili candidati per dispositivi ottici e particolari pulsanti *smart* capaci di essere sensibili ad uno stimolo e trasmettere la relativa informazione come input ad un sistema di acquisizione.

5.3. Ceramiche a memoria di forma

Si è già detto come i materiali a memoria di forma siano una classe di materiali capaci di convertire calore in una deformazione meccanica, o viceversa, in virtù di una trasformazione martensitica. Questa trasformazione tra fasi cristallografiche può essere indotta termicamente (effetto a memoria di forma) o per applicazione di una tensione (superelasticità). Alcuni materiali fragili, come quelli intermetallici o ceramici, mostrano sì una trasformazione martensitica, ma si fratturano danneggiandosi in modo permanente, con deformazioni minime e solamente dopo l'applicazione di pochi cicli di carico. La comparsa delle fratture è dovuta alle eccessive distorsioni in grani adiacenti, che provocano grandi tensioni disaccoppiate e l'innescare di cricche.

Prendendo come esempio la zirconia (ossido di zirconio), essa presenta la trasformazione martensitica tra una fase tetragonale e una monoclinica, con deformazione di taglio fino al 15%. Tuttavia, le tensioni disaccoppiate in questa struttura policristallina impediscono il

comportamento di memoria di forma. A deformazioni del solo 2%, dopo pochissimi cicli di trasformazione, si osservano già alcune fratture. Questo è un comportamento completamente differente rispetto a quello, ad esempio, del Nitinol.

Dal momento che è stato dimostrato che la causa di queste fratture nelle ceramiche risiede nello sviluppo di stress disaccoppiati di trasformazione, la strategia per eliminarle è quella di ridurre queste tensioni seguendo due approcci [55]. Il primo consiste nel ridurre la scala di grandezza del campione stesso: un pezzo piccolo ha un maggiore rapporto superficie/volume e le superfici libere possono contribuire alla distensione delle tensioni. Nel secondo approccio invece, si vuole ridurre il numero di cristalli nel volume del campione. In questo modo si ottiene una struttura “oligo-cristallina” (con pochi cristalli) o addirittura mono-cristallina contenente pochissimi grani e quindi bordi grano, zone dove concorreranno le deformazioni di trasformazione. Seguendo entrambi i concetti è possibile conferire a particolari ceramiche proprietà di memoria di forma e di superelasticità.

In [55] sono stati svolti diversi test su campioni in scala micrometrica per dimostrare il comportamento di una ceramica superelastica CeO_2-ZrO_2 con struttura “oligo-cristallina”. A titolo di esempio si riporta in Fig. 5-6 un diagramma stress-strain relativo a questa ceramica superelastica caricata in compressione. Il carico viene applicato alla struttura quando si trova nella fase tetragonale (per similitudine con le SMAs viene chiamata austenite) e dopo un iniziale tratto lineare elastico, viene raggiunta una tensione critica che induce il cambiamento di fase, passando a quella monolitica (a cui ci si riferisce con il termine di martensite, per il precedente motivo); questo passaggio si identifica nel diagramma in una riduzione della pendenza della curva, che evolve al progredire della trasformazione fino a deformazioni del circa 7%. Lungo il percorso di scarico, la risposta della fase martensitica è lineare fino a un'altra tensione critica, corrispondente alla trasformazione in austenite e relativa ad un plateau sulla curva. Al termine dello scarico vi è un completo recupero della deformazione. L'energia totale dissipata durante il ciclo è quantificata dall'area compresa tra le due curve di carico.

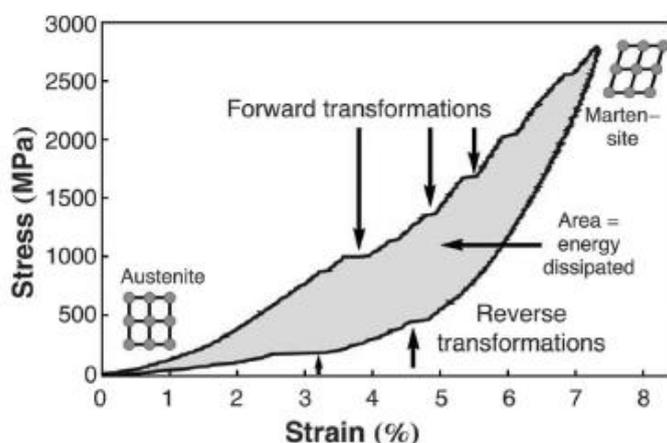


Fig. 5-6 Diagramma stress-strain per una SMC [55].

Hanno constatato che un tale diagramma è caratteristico di centinaia di varietà di ceramiche in zirconia con struttura “oligo-cristallina”, dimostrando le loro buone proprietà di superelasticità.

Sempre riferendosi allo studio condotto in [35], hanno dimostrato che il comportamento superelastico è mantenuto anche dopo l'esecuzione di molteplici cicli.

Per quanto riguarda l'effetto a memoria di forma, hanno osservato che se la ceramica in esame si trova nella fase tetragonale (austenite) esso si manifesta per temperature comprese tra quelle di transizione di austenite e martensite.

In Fig. 5-7 viene riportata un'immagine captata al microscopio elettronico che permette di cogliere l'effetto di memoria. Nella figura A è raffigurato il campione nella fase austenitica a temperatura ambiente; in queste condizioni viene sottoposto ad un carico di flessione e si vede una variazione di forma determinata da una trasformazione indotta da stress, verso la martensite (Fig. 5-7 B), con una deformazione di circa l'8%. Un successivo riscaldamento sopra la temperatura di trasformazione dell'austenite (500 °C per 2 ore) causa il ritorno alla fase austenitica, costringendo quindi il campione a recuperare la forma originale.

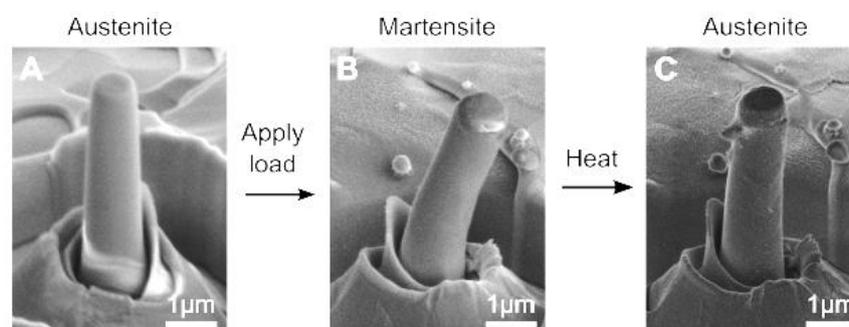


Fig. 5-7 Dimostrazione dell'effetto a memoria di forma [55].

Le osservazioni appena fatte confermano come le ceramiche di zirconia dimostrino sia l'effetto a memoria di forma sia la superelasticità.

Una nuova classe di materiali a memoria di forma basati su ceramiche “micro-oligo-cristalline” è potenzialmente interessante da un punto di vista tecnologico in quanto andrebbe a occupare una regione nello “spazio delle proprietà” che nessun altro materiale è in grado di soddisfare. Si potrebbero ottenere materiali con elevata resistenza, con effetto a memoria di forma e superelasticità anche a elevati livelli di carico rispetto ai tradizionali metalli a memoria di forma. La Fig. 5-8 mostra delle curve singole di superelasticità che mettono a confronto le ceramiche testate in [55] con leghe NiTi e CuNiAl (dati presi dalla letteratura). La stessa figura rende evidente l'opportunità di impiegare le ceramiche a memoria di forma per applicazioni di smorzamento. La quantità di energia meccanica dissipata in calore durante il ciclo è rappresentata dall'area di isteresi del diagramma. Dato che le ceramiche sono molto rigide e sopportano grandi tensioni, hanno l'opportunità di espandere l'area di isteresi e quindi di dissipare maggiore energia rispetto ai tradizionali metalli a memoria di forma.

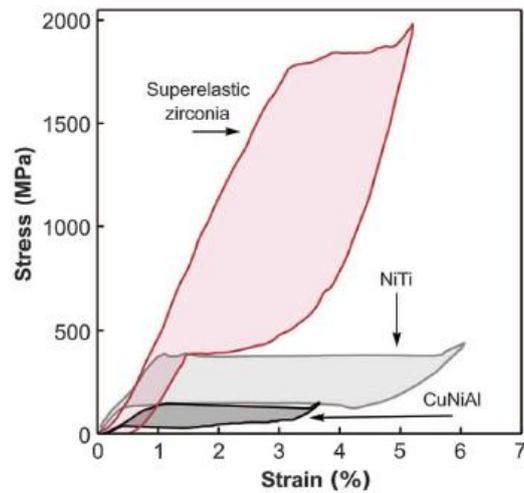


Fig. 5-8 Curve stress-strain per SMCs in zirconia, leghe NiTi e leghe CuNiAl [55].

Altro parametro cruciale per la caratterizzazione di un materiale è la tensione di attuazione. Per le ceramiche è 4 volte maggiore rispetto agli altri due materiali riportati in figura. Una valutazione più completa della tensione di attuazione si può avere osservando la Fig. 5-9, dove vengono riportati i valori per diverse categorie di materiali.

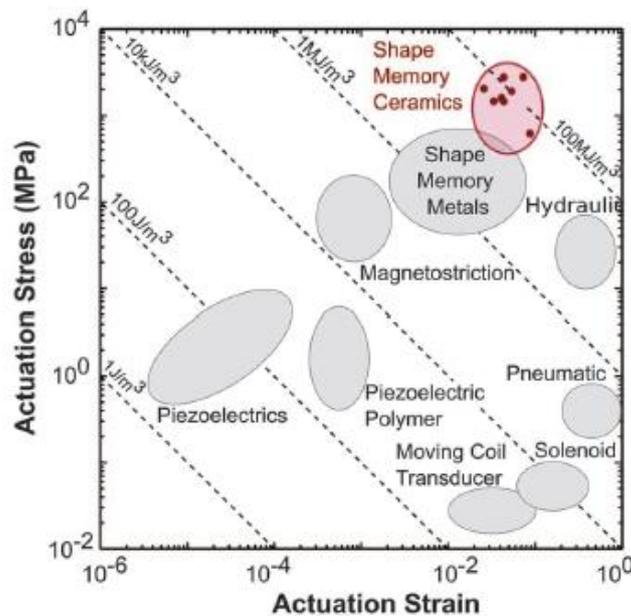


Fig. 5-9 Curva tensione di attuazione-deformazione di attuazione per diverse categorie di materiali [55].

Un'altra importante peculiarità delle SMCs, che le distingue dagli altri materiali, riguarda il comportamento alle alte temperature. Solitamente le ceramiche tradizionali sono molto più refrattarie rispetto ai metalli e come tali, le SMCs potrebbero diventare una potenziale classe di materiali a memoria di forma adatta ad applicazioni alle alte temperature. Modificando opportunamente la composizione delle ceramiche in zirconia, esse possono esibire temperature di trasformazione che variano da 0 °C fino a 1200 °C. In Fig. 5-10 si confrontano le temperature di fine martensite M_f di diversi SMMs. È evidente come le SMCs superino di

gran lunga tutte le altre leghe esaminate, rendendole delle ottime candidate ad applicazioni in campo aeronautico, aerospaziale, propulsivo ed energetico.

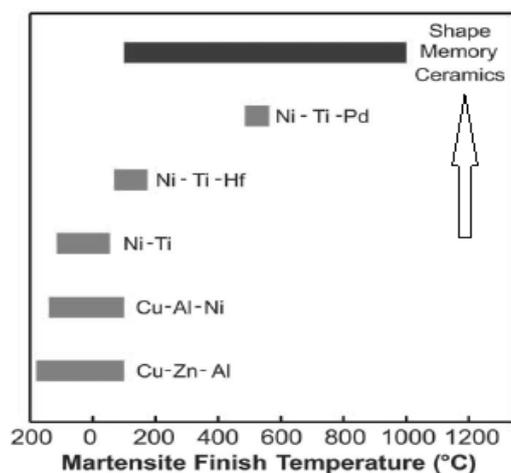


Fig. 5-10 Temperature di fine martensite M_f per diversi SMMs [55].

La ricerca rivolta alle SMCs è ancora ai primi step di sviluppo e molti aspetti devono essere chiariti e approfonditi. Gli studi sino ad ora condotti sembrano limitarsi a campioni microscopici, quindi una sfida futura è sicuramente quella di allargare i risultati su una scala maggiore. Anche la creazione di un database più fornito di dati è richiesto per poter completare la progettazione di un dispositivo in SMC.

Concludendo, questa categoria di materiali potrà quindi portare allo sviluppo di nuove categorie di materiali *SMART* con proprietà avanzate in termini di elevata energia di output, elevata energia di smorzamento e possibilità di impiego alle alte temperature.

5.4. Metamateriali

Questa categoria di materiali esula da tutte le precedenti in termini di materiali impiegati, microstruttura, proprietà meccaniche, ma soprattutto ottiche, elettriche e magnetiche. Si è deciso di inserirli nella presente trattazione poiché si ritiene che possano essere classificati come *SMART* a fronte delle loro caratteristiche uniche, come verrà di seguito spiegato.

Un metamateriale è un tipo di materiale creato artificialmente con proprietà elettromagnetiche peculiari che lo differenziano dagli altri. Le sue caratteristiche macroscopiche non dipendono solo dalla sua struttura molecolare, ma anche dalla sua geometria realizzativa. In altri termini, esso guadagna le sue proprietà dalla struttura piuttosto che direttamente dalla composizione chimica.

Le relazioni che governano i particolari fenomeni che caratterizzano questi materiali sono complesse e richiedono robuste conoscenze fisico-chimiche di base. In questo elaborato si tratterà l'argomento in modo generale e solamente a titolo esplicativo.

Il termine metamateriale fu coniato nel 1999 da Rodger M. Walser, che definì i metamateriali come compositi macroscopici aventi un'architettura cellulare tridimensionale periodica e

sintetica, progettata per produrre una combinazione ottimizzata, non disponibile in natura, di due o più risposte a una specifica sollecitazione [56].

Il più grande potenziale di questi materiali è la possibilità di creare una struttura con un indice di rifrazione negativo, proprietà quest'ultima che non si trova naturalmente in nessun materiale. I materiali con indice di rifrazione negativo “piegano” la luce in direzione opposta rispetto ai materiali ordinari. Quasi tutti i materiali utilizzati in ottica, come vetro o acqua, hanno valori positivi sia per la permittività elettrica ϵ che per la permeabilità magnetica μ . Un materiale avente ϵ o μ negative (non entrambi) è opaco alla radiazione elettromagnetica. L'indice di rifrazione N può essere determinato mediante:

$$N = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$$

La ricerca e gli studi in corso che riguardano questa speciale categoria di materiali sono molto numerosi e altrettanto recenti. Molti dei progetti avviati sono ancora a livelli preliminari, se non a una step ancora teorico. Si riportano dunque, a titolo di esempio, alcune potenziali applicazioni o ipotetiche idee di sviluppo.

Un'applicazione dei metamateriali potrebbe essere nella manipolazione delle frequenze comprese tra i 300 [GHz] e i 10 [THz]. Queste frequenze non possono essere gestite dalle apparecchiature elettroniche convenzionali per via della frequenza eccessivamente elevata, e nel contempo hanno frequenze troppo basse per essere trattate da quelle ottiche.

Inoltre, un materiale rifrangente-negativo sarebbe capace di comportarsi come una lente perfetta a causa delle sue proprietà:

un'onda propagandosi in un mezzo rifrangente-negativo esibisce un avanzamento di fase invece che un ritardo di fase come nei materiali convenzionali;

le onde evanescenti in un mezzo rifrangente-negativo incrementano in ampiezza appena si allontanano dalla loro origine.

Tali dispositivi sembrano garantire una risoluzione molto migliore rispetto alle lenti tradizionali e ciò significherebbe riuscire a realizzare telescopi in grado di vedere molto più lontano e microscopi in grado di spingersi a livello molecolare.

Sfruttando ancora la loro proprietà di avere rifrazione negativa, i metamateriali possono essere un punto di partenza possibile per costruire dispositivi mascheranti o dispositivi di occultamento (*cloaking device*) ai radar e alla radiazione ottica di velivoli o di navi.

La proprietà di far scorrere lungo di essi la luce piuttosto che rifletterla in direzione della fonte luminosa, permette quindi di farli agire come una sorta di “mantello dell'invisibilità”.

Un gruppo di ricercatori dell'Imperial College di Londra è riuscito a creare un metamateriale che si comporta in modo analogo, nei confronti però dei campi magnetici, che vengono fatti scorrere attorno alla regione protetta dal metamateriale. La struttura che hanno realizzato è sostanzialmente composta da un reticolo di piastre di piombo spaziate, a livello nanometrico, secondo una particolare disposizione. Per quanto già detto, le specifiche proprietà sono

conseguenza della configurazione geometrica, oltre che della microstruttura. È noto come sia già possibile proteggere una regione dello spazio dai campi magnetici, circondandola con un materiale opportuno, ma un “mantello magnetico” terrebbe il campo magnetico all'esterno di quella regione, senza peraltro disturbare il campo magnetico esterno.

In [57], Wood riprende il discorso dell'invisibilità legata ai metamateriali, anche lui sottolineando l'interessante applicazione per problemi di occultamento, dove lo scopo sarebbe quello di rendere un oggetto invisibile alla radiazione elettromagnetica entro un certo intervallo di frequenze. Nell'articolo sono riassunti i concetti che stanno alla base di questi fenomeni e le possibili alternative che ci sono per progettare un metamateriale.

Un metamateriale dotato di due stati metastabili potrebbe manifestare, per un certo intervallo di forze applicate, una transizione di fase nella quale rivelerebbe una comprimibilità negativa, proprietà ritenuta finora impossibile. Il comportamento si può riassumere con la seguente frase: “Se lo comprimì si allunga, se lo tendi si accorcia”. Questa è la controintuitiva proprietà di un nuovo materiale progettato, per ora solo in via teorica, da ricercatori della Northwestern University. Questo tipo di risposta – contrazione sotto tensione e allungamento sotto pressione – si sa che può manifestarsi per alcuni particolari materiali quando questi sono sottoposti a una forza che varia molto rapidamente in modo sinusoidale; ma in realtà, in questo caso ci si trova di fronte solamente a uno sfasamento temporale tra la forza applicata e la deformazione che ne consegue. Finora infatti si riteneva che un materiale dotato di una “comprimibilità negativa” in risposta a una forza costante fosse semplicemente impossibile: se si prende una bacchetta di qualsiasi materiale normale e si applica una tensione, il materiale si allunga leggermente, esercitando una forza di richiamo che bilancia la tensione, così da raggiungere un nuovo stato di equilibrio. Se applicando la tensione un materiale rispondesse riducendosi, la tensione aumenterebbe, inducendo il materiale a contrarsi ancora di più, fino al collasso. Una tensione anche minima porterebbe quindi alla distruzione del materiale stesso. Lo stesso avverrebbe nel caso di una pressione. Tuttavia, hanno scoperto che un materiale dotato di comprimibilità negativa può esistere, quanto meno per un piccolo intervallo di valori, cioè attraverso quella che rappresenta una transizione di fase. La sua realizzazione potrebbe trovare innumerevoli applicazioni pratiche in attuatori e dispositivi di protezione meccanici, a partire per esempio dalle cinture di sicurezza.

Si osserva inoltre come alla base di queste potenziali applicazioni vi sia tutta una serie di modelli e algoritmi matematici che cercano di simulare e rappresentare i fenomeni caratteristici di questi materiali.

La ricerca futura si focalizzerà sui modi di realizzazione di questi materiali, cercando di prediligere soluzioni monostrato piuttosto che multistrato o introducendo geometrie totalmente nuove e innovative. Inoltre si dovranno implementare i modelli e gli algoritmi esistenti per ottenere degli strumenti sempre più precisi ed efficaci nel simulare e caratterizzare i metamateriali.

6. ESEMPIO APPLICATIVO: TAPE SPRING

La parte finale di questo lavoro di tesi si focalizza sull'analisi agli elementi finiti di una *tape spring* mediante l'utilizzo dei software MSC Patran, MSC Nastran e MSC Marc Mentat [34, 58-62].

In primo luogo s'introducono le *tape spring*, descrivendone le caratteristiche principali e come queste vengano sfruttate nei sistemi di dispiegamento a bordo di satelliti.

Nel paragrafo 6.1.2 sarà analizzata una *tape spring* in CFRP, basandosi su un precedente lavoro di tesi [68].

In seguito invece si prenderà in considerazione sempre una *tape spring* in CFRP, ma con inseriti elementi in lega a memoria di forma, analizzandone diversi aspetti.

6.1. Tape spring

6.1.1. Introduzione

Nel settore aerospaziale, una delle maggiori sfide riguarda il *packaging* di grandi strutture che poi devono essere dispiegate una volta che il satellite si trova in orbita [63-64]. I volumi disponibili all'interno di un lanciatore sono ridotti e la compattezza del satellite è fondamentale per rispettare tali limiti. Le strutture *deployable* vengono quindi largamente utilizzate per soddisfare questi requisiti. È necessario dunque un meccanismo di dispiegamento che sia abbastanza robusto da garantire un funzionamento affidabile ed efficiente. I principali requisiti che un sistema *deployable* deve garantire sono:

- accuratezza, controllabilità e ripetibilità del dispiegamento;
- rigidità e stabilità (statica e dinamica) della configurazione dispiegata;
- impatto sulle risorse del satellite e integrabilità con esso;
- affidabilità.

Sono richiesti snodi affinché la struttura del satellite possa essere piegata in modo compatto, e meccanismi di *deployment* per il dispiegamento. All'inizio, questi componenti venivano pensati e progettati separatamente dalla struttura del satellite e applicati ad essa solo dopo la fabbricazione. Sebbene questa soluzione garantisca le idonee proprietà meccaniche (rigidità, stabilità e ripetibilità), essa implica delle masse rilevanti che si vorrebbero evitare. I progetti successivi iniziarono a considerare l'utilizzo di strutture che semplificassero i meccanismi di stivaggio e dispiegamento, impiegando diverse tipologie di materiali, dai metalli ai materiali compositi. Furono così introdotte *tape spring* (o *carpenter tape*) e *spring hinges*. Missioni che si avvalgono di questa tecnologia sono EXOMARS (antenna MARSIS) e il MARS RECONOISSANCE ORBITER (radar SHARAD).

Oltre ai primi modelli metallici, di cui si parlerà nel seguito, si svilupparono alcuni dispositivi in *elastic memory composites* (EMCs) ([65]); tale materiale viene in un primo momento riscaldato e piegato sopra la sua temperatura di transizione vetrosa, T_g , e successivamente viene raffreddato sotto la T_g in modo che mantenga la configurazione piegata. Il materiale ritorna alla forma iniziale piana se viene nuovamente riscaldato sopra la T_g . Un'alternativa è rappresentata dalle strutture gonfiabili che offrono una massa ridotta e una buona efficienza di

impaccamento; essi però non possono operare con sistemi pesanti e hanno una bassa accuratezza di puntamento. Tuttavia, una volta in orbita, queste soluzioni si devono confrontare con molti aspetti delicati e gravosi (range critici di temperatura, assenza di gravità, micro-detriti e micro-meteoriti, ecc.) che non sempre riescono a superare o controllare; per questo motivo, vengono in generale preferite altre soluzioni.

I metodi di dispiegamento usati sono quello controllato e quello libero o *self-deployment* [66]. Il primo caso solitamente richiede un'espansione della struttura per mezzo di cavi e motori, mentre il dispiegamento libero implica semplicemente il rilascio dell'energia elastica immagazzinata all'interno della struttura piegata in precedenza. I meccanismi di *self-deployment* sono sviluppati per ridurre il numero di componenti, la complessità ed il costo, e contemporaneamente migliorare le prestazioni del satellite. A quest'ultima categoria fanno parte le *tape spring* e le loro varie configurazioni.

Una *tape spring* è un componente che viene piegato in una determinata posizione, che sarà mantenuta sino al momento del *deployment*; a quel punto, essa andrà a riprendere la configurazione piana posseduta prima del piegamento garantendo così il dispiegamento di un sottosistema ad esso collegato. Questi elementi offrono notevoli vantaggi in termini di *self-deployment*, *self-locking* e accuratezza nel blocco alla posizione finale.

I primi modelli furono realizzati in materiale metallico (rame-berillio, Cu-Be [66] o acciaio ad alta resistenza) e furono impiegati per diversi anni, fino a quando non iniziarono a diffondersi i materiali compositi. La tendenza odierna è quella rivolta all'utilizzo di *carbon fibre reinforced plastic* (CFRP) poiché hanno proprietà adattabili, massa ridotta, basso coefficiente di espansione termica ed elevata rigidità specifica; inoltre permettono di ottenere soluzioni più semplici, economiche ed affidabili. Si trovano anche esempi di *tape spring* in polietilene a bassa densità (*low-density polyethylene*, LDPE) ([65], [67]). Fattore rilevante per questi materiali è la dipendenza dal tempo dovuta al comportamento viscoelastico. Per i dettagli si rimanda agli articoli [65] e [67] di riferimento.

6.1.2. Caratteristiche e proprietà

Le *tape spring* sono strisce di materiale, a pareti sottili, con sezione trasversale curvata, dove l'angolo sotteso α è minore di 180° . Sono caratterizzate dai seguenti parametri geometrici [68] (Fig. 6-1): lunghezza L , raggio di curvatura R costante, angolo sotteso α e spessore t . Si evidenzia anche la curvatura longitudinale r , cui si farà riferimento nel seguito.

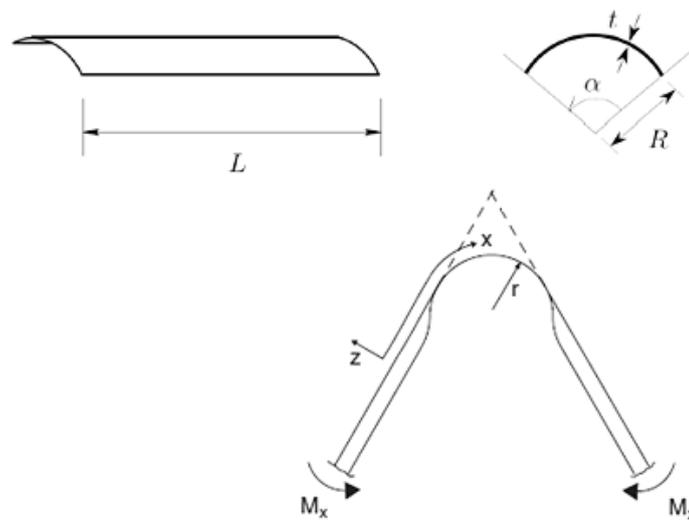


Fig. 6-1 Geometria di una tape spring [68].

Una *tape spring* può essere piegata in due versi (Fig. 6-2), distinguendo:

- una piegatura *equal sense*: la configurazione flessa ha la stessa convessità di quella piana;
- una piegatura *opposite sense*: le convessità sono opposte.

Per convenzione le rotazioni e i momenti applicati sono considerati positivi per una prova *opposite sense bending* e negativi per una prova *equal sense bending* (Fig. 6-2).

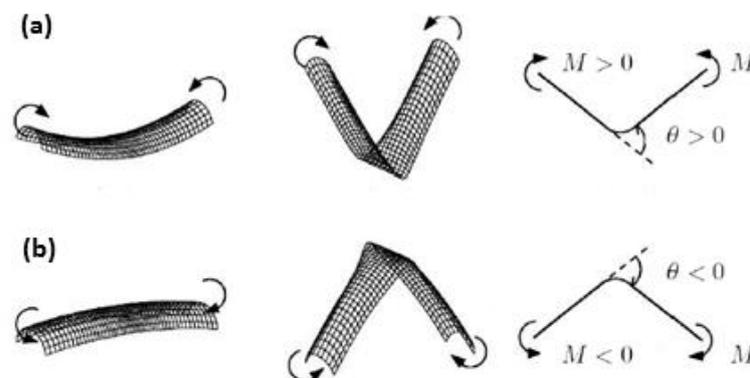


Fig. 6-2 Piegatura di una tape spring: (a) *opposite sense*. (b) *equal sense* [63].

Una peculiarità delle *tape spring* è il comportamento momento-rotazione [68], che può essere descritto come lineare-elastico per piccole rotazioni e a momento costante per grandi rotazioni. L'andamento caratteristico è descritto in Fig. 6-3.

Per una prova *opposite sense*, per piccoli angoli di rotazione si ha un andamento lineare della curva (elevata rigidità del materiale, rappresentata dalla pendenza della curva); aumentando la rotazione, si manifesta un appiattimento della sezione centrale con conseguente comportamento di *snap through* quando si raggiunge il valore massimo di momento nel diagramma. Incrementando ancora la rotazione delle estremità, il momento si attesta a un valore costante (momento di propagazione); la curvatura longitudinale r nella piegatura

centrale è costante e circa uguale a R, e solo la lunghezza dell'arco della piegatura stessa aumenta. Per una prova *equal sense*, inizialmente si ha il medesimo comportamento lineare (con minor rigidezza) che termina anch'esso a un valore di momento massimo (inferiore al caso *opposite*), indotto da un modo torsionale, successivamente al quale ci si atesta su un momento di propagazione costante con l'aumentare dell'angolo di rotazione.

Se dalla configurazione piegata si analizza il dispiegamento, si nota come per la prova *opposite sense* venga ripercorsa la linea di carico fino ad un valore caratteristico di rotazione rispetto al quale si passa direttamente sul tratto lineare della curva, saltando il passaggio attraverso il momento massimo. Per la prova *equal sense*, il percorso di scarico ripercorre quello di carico.

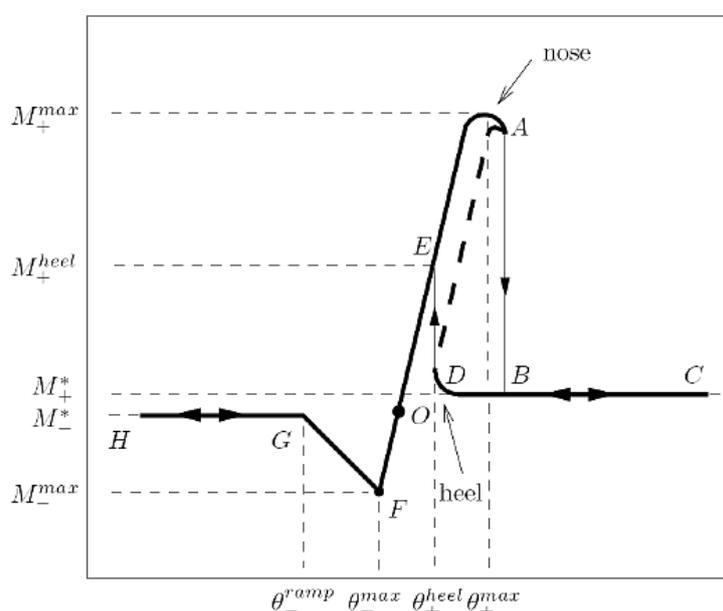


Fig. 6-3 Curva momento-rotazione di una tape spring [68].

Riferendosi sempre alla Fig. 6-4 si individuano i seguenti valori caratteristici per schematizzare la curva $M - \theta$ di una *tape spring*:

- M_+^{\max} momento massimo per prova *opposite sense*;
- θ_+^{\max} angolo di dispiegamento relativo a M_+^{\max} ;
- M_+ momento di propagazione nel caso *opposite sense*;
- θ_{heel} angolo cui avviene il ritorno al tratto lineare durante il percorso di scarico per l'*opposite sense bending*;
- M_-^{\max} momento massimo per una prova *equal sense*;
- θ_{ramp} angolo di dispiegamento per cui la prima volta si annulla il gradiente del momento nel caso *equal*;
- M_- momento di propagazione nel caso *equal sense*.

L'effetto chiave in una *tape spring* di lunghezza limitata è quindi dato dal fatto che l'aumento graduale del momento flettente, che induce trazione ai lati e compressione al centro, causa un'ovalizzazione della sezione trasversale [64]; ciò comporta una graduale riduzione nella

rigidezza flessionale, definita come la pendenza della curva di equilibrio $M-\theta$. Al raggiungimento del momento limite la rigidezza si annulla e la deformazione del componente si localizza nella parte centrale, che si appiattisce (piegatura elastica).

Altro aspetto fondamentale è che durante l'intero processo di piegatura, la deformazione rimane elastica ed è completamente reversibile dopo la rimozione del carico applicato.

Si possono individuare delle importanti caratteristiche di tale comportamento:

- le piegature elastiche in entrambi i sensi hanno un raggio di curvatura longitudinale r (Fig. 6-1) che risulta indipendente dalle rotazioni (o momenti) imposte alle estremità;
- tensioni e deformazioni massime in una *tape spring* piegata sono indipendenti dalle rotazioni (o momenti) imposte;
- dopo la distensione, una *tape spring* manifesta un comportamento di *snap back* verso la configurazione iniziale.

Sono stati condotti diversi studi relativi all'influenza della lunghezza della *tape spring* sui parametri caratteristici, sia sulle realizzazioni in Cu-Be ([66]) che in quelle in CFRP ([65]).

Per entrambe si può concludere che, al diminuire della lunghezza:

- M_+^{\max} aumenta;
- θ_{heel} è circa il medesimo per componenti corti;
- M_+ e M_- non variano con L .

Inoltre si può anche affermare che:

- M_+^{\max} aumenta con α ;
- θ_+^{\max} aumenta al diminuire di α ;
- M_-^{\max} aumenta in valore assoluto con α ;
- θ_{ramp} aumenta in valore assoluto con α .

Si fanno ora alcune considerazioni riguardanti la resistenza del materiale ([66]). Per evitare che la *tape spring* raggiunga la tensione di snervamento in corrispondenza della piegatura, per il rapporto R/t deve essere rispettata la seguente relazione:

$$\frac{R}{t} \geq E \frac{E}{\sigma_y(1 + \nu)}$$

dove R è il raggio, t lo spessore, E il modulo di Young, σ_y la tensione di snervamento e ν il coefficiente di Poisson. Tale relazione vale sia per le leghe Cu-Be sia per i compositi CFRP.

Viene fatta un'osservazione anche sull'entità dell'angolo sotteso, α . È stato dimostrato che per elementi con $\alpha > 180^\circ$ è impossibile creare una piegatura applicando delle coppie in *opposite sense* alle estremità. L'angolo α deve quindi mantenersi tra i 90° e i 170° .

Si fa un breve accenno al comportamento dinamico [66]. Il dispiegamento libero di una *tape spring* è governato dall'energia immagazzinata nel componente e dalla direzione in cui è stata piegata; si assume che la massa della *tape spring* sia trascurabile rispetto alla massa del corpo, che non vi siano variazioni dell'energia gravitazionale del corpo e che infine i vincoli di estremità impediscano ogni spostamento della zona di piegatura sulla lunghezza.

S'immagini di rilasciare una *tape spring* piegata in senso *equal* di un angolo $\theta = \theta_0$. L'energia di deformazione associata alla configurazione piegata è equivalente all'area sottesa dalla curva momento-rotazione (Fig. 6-4 (a)); quest'energia va a convertirsi in energia cinetica al procedere del dispiegamento fino ad annullarsi per la configurazione indeformata. A questo punto l'inerzia della massa va a sollecitare la piastra nel senso opposto a quello di partenza (cioè *opposite*), la velocità della massa diminuisce e si ha una riconversione dell'energia cinetica in energia di deformazione. Se l'area della porzione di curva fino al momento massimo di prova *opposite* risulta inferiore all'area sottesa iniziale, il momento massimo viene superato e il nastro si piega secondo la dinamica di *snap through*. Successivamente il momento applicato passa dal punto A (Fig. 6-4), a quello stazionario A' relativo alla medesima rotazione: questo fenomeno è definito *overshoot*. Il sistema prosegue l'immagazzinamento di energia di deformazione fino a quando l'energia cinetica non si annulla e a quel punto il sistema torna elasticamente verso la configurazione indeformata, con la particolarità che non si passa per il momento massimo, ma in prossimità dell'angolo di piegatura θ_{heel} , si salta direttamente al tratto lineare della curva M- θ : se si va a verificare l'energia cinetica del sistema si osserverà che risulta ridotta poiché l'area sottesa in Fig. 6-4 (a) è inferiore all'area sottesa iniziale; ciò in virtù del differente comportamento della *tape spring* in fase di carico e di scarico. Proseguendo con questa sequenza, l'energia del sistema progressivamente diminuisce fino alla scomparsa del fenomeno di *overshoot*; in seguito a questo si hanno piccole oscillazioni che indicano che ci si sta muovendo sul tratto lineare della curva momento-rotazione.

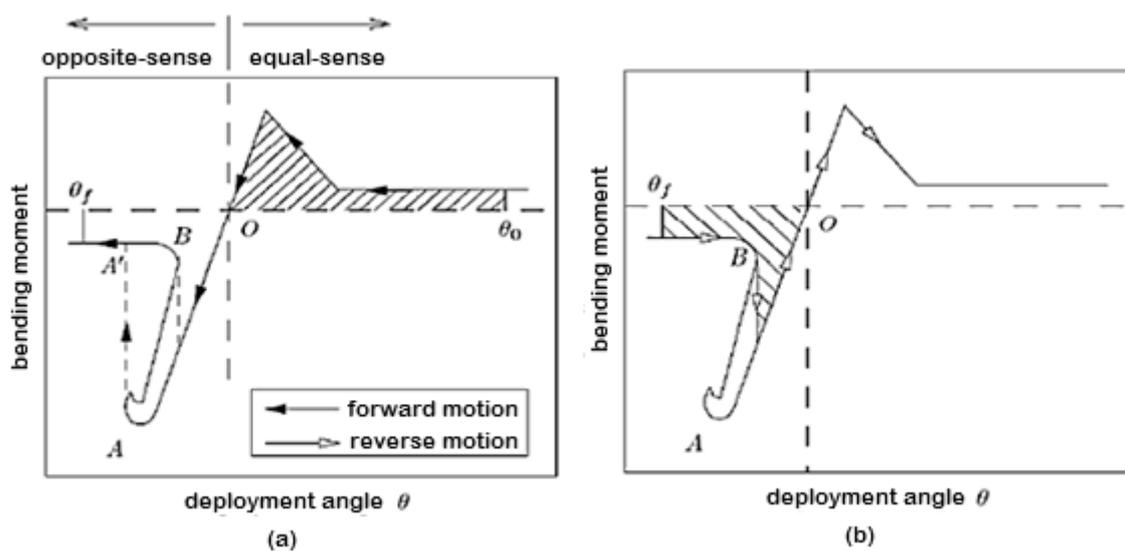


Fig. 6-4 Diagrammi M- θ "ribaltati": (a) equal sense. (b) opposite sense [68].

6.1.3. Configurazioni

Solitamente le *tape spring* non sono impiegate singolarmente, ma accoppiate tra loro in differenti configurazioni per far fronte alla differenza tra i momenti massimi raggiunti nelle due configurazioni *opposite* e *equal* ed ottenere una rigidezza di *deployment* simmetrica, per migliorare le proprietà meccaniche e di dispiegamento. Possono essere collegate in parallelo (Fig. 6-5 (a)) a formare delle cerniere chiamate *composite hinges* ([16],[70]) o, in modo

alternativo, possono essere ricavate da tubi continui (Fig. 6-5 (b)) con aperture laterali. In letteratura vi sono molti esempi di studi effettuati su questi dispositivi (ad esempio [64],[66]).

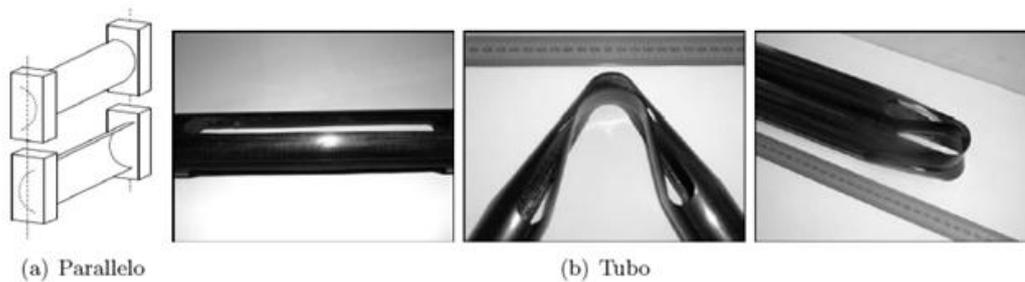


Fig. 6-5 Configurazioni per le tape spring: (a) in parallelo. (b) Tubo [68].

In Fig. 6-6 si riportano altri dispositivi che impiegano *tape spring*.

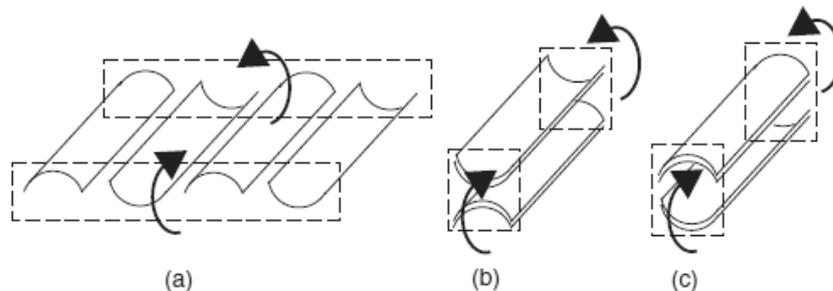


Fig. 6-6 Dispositivi con tape spring: (a) in serie; (b) in parallelo [69].

Qualunque sia la disposizione delle *tape spring*, il comportamento segue a grandi linee quello già descritto sopra per i singoli elementi, con simili grandezze caratteristiche.

Tuttavia, alcune proprietà variano, e ad esempio, la cerniera in Fig. 6-6 (c) è superiore rispetto alla altre per le seguenti ragioni:

- connettendo due *tape spring* in parallelo, poco separate tra loro, il momento richiesto per “sbloccare” la cerniera aumenta dal momento che i nastri agiscono prevalentemente in trazione e compressione, invece che in flessione come nel caso (a);
- la rigidità della cerniera bloccata è molto maggiore e può essere variata cambiando la distanza tra le *tape* (maggiore flessibilità).

Nella configurazione piegata, questi elementi hanno bisogno di adeguati vincoli per essere mantenuti nella giusta posizione e garantire poi il corretto *deployment*.

In Fig. 6-7 sono riportate diverse configurazioni di *tape hinges* studiate in [16].

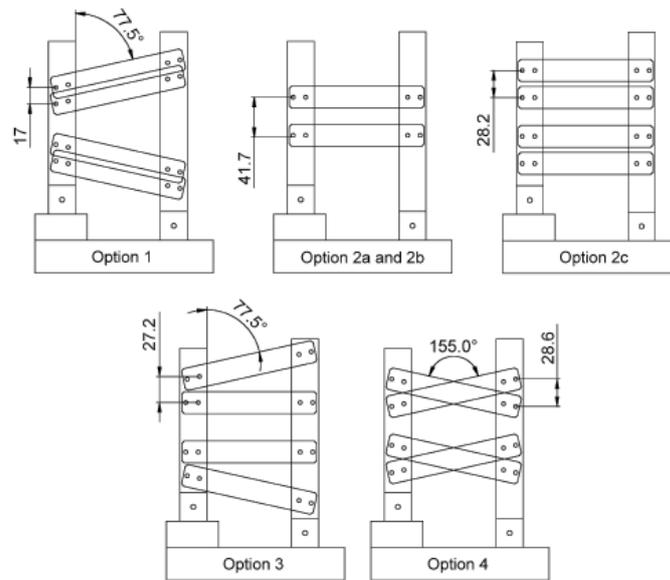


Fig. 6-7 Configurazioni di tape hinges [16].

A titolo di esempio, in Fig. 6-8, è rappresentato un diagramma momento-rotazione relativo alle opzioni 1 e 4 di Fig. 6-7. È stato osservato come il comportamento sia fortemente non lineare; il momento si mantiene lineare per piccole rotazioni, come per le *tape spring*, ma presenta un angolo relativo al momento massimo maggiore rispetto ad esse. Per le specifiche configurazioni in esame, la piegatura avviene alle estremità. All'aumentare della rotazione, avviene il contatto tra gli elementi. Le dinamiche di piegatura dipendono molto dalla conformazione esaminata; per i particolari si faccia riferimento a [16].

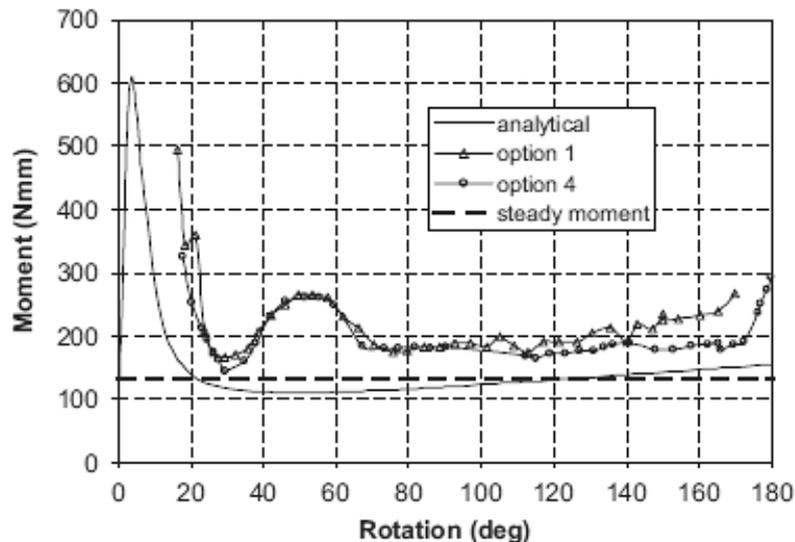


Fig. 6-8 Esempio di diagrammi momento-rotazione [16].

Si è detto come uno dei miglioramenti richiesti per le *tape spring* sia di aumentare la rigidezza di dispiegamento, ma bisogna fare attenzione perché un valore eccessivo può portare ad un altrettanto valore elevato di energia cinetica, che può causare un comportamento catastrofico

di *deployment* con conseguenti danneggiamenti ai sottosistemi circostanti o al dispositivo stesso.

Diverse soluzioni sono state sviluppate per far fronte a questa limitazione, ma ognuna di esse rappresenta una soluzione di compromesso. Il CNES (Agenzia Spaziale Francese) ha sviluppato delle cerniere denominate MAEVA [63] composte di tre *tape spring* posizionate in una configurazione asimmetrica (Fig. 6-9). L'intenzione è di sfruttare il posizionamento asimmetrico per ottenere una rigidità di dispiegamento anisotropa, in modo da prevenire un'eccessiva corsa dopo la posizione dispiegata piana. Nonostante le MAEVA abbiano dimostrato di essere efficienti per tale scopo, esse non garantiscono un buon comportamento in termini shock di blocco.

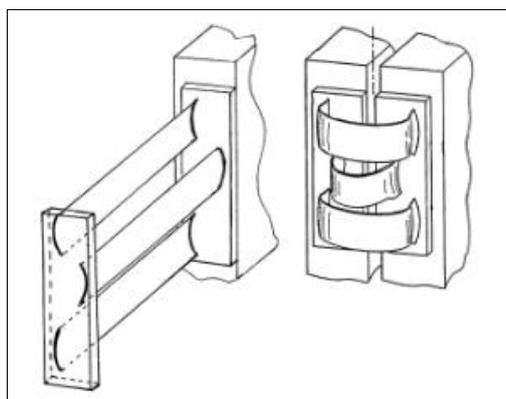


Fig. 6-9 MAEVA tape spring [63].

Un'altra configurazione nella quale vengono impiegate le *tape spring* è quella parzialmente arrotolata [70] (Fig. 6-10) e vengono denominate a stabilità neutra (*neutrally stable tape spring*). Esse presentano la stessa energia di deformazione sia nella configurazione arrotolata sia in quella piana, quindi non tendono a raggiungere la forma finale quando sono parzialmente arrotolate e non hanno bisogno di particolari vincoli quando ripiegate. Questa stabilità neutra viene indotta attraverso particolari sequenze di piegatura e di pretensionamenti. Il dispiegamento è poi innescato con forze di basse entità mediante attuatori modesti. Per la definizione di stabilità neutra all'inizio ci si riferiva alle configurazioni completamente arrotolate o completamente dispiegate. In [70] invece, il concetto è esteso considerando anche situazioni intermedie di piegatura. Per raggiungere questo comportamento, un ruolo importante è svolto dalla sequenza delle lamine nel laminato composito, dalla resina e dal processo di formatura seguito.

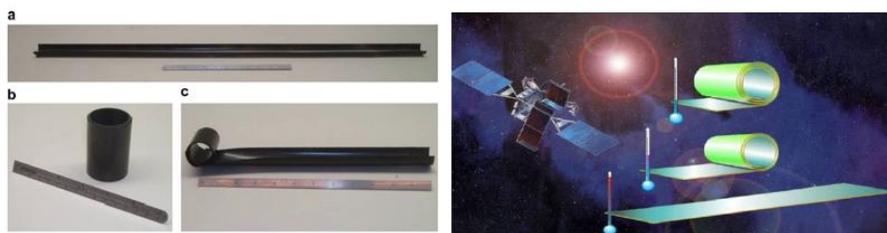


Fig. 6-10 Tape spring a stabilità neutra: (a) dispiegata. (b) completamente arrotolata. (c) parzialmente arrotolata [70].

Per l'attivazione di questi componenti è stato testato un prototipo con un filo in lega a memoria di forma (Fig. 6-11).

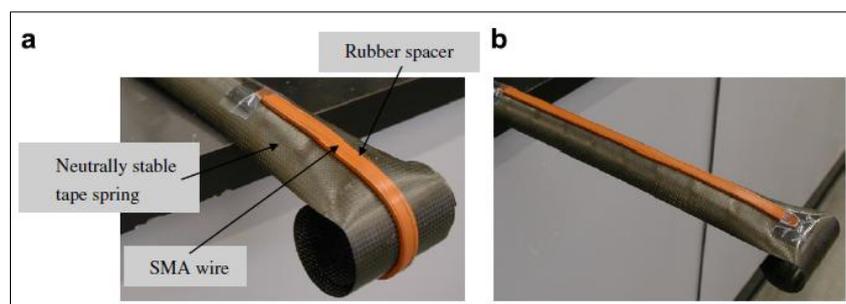


Fig. 6-11 Filo di SMA all'interno della tape spring [70].

Per fornire al filo di SMA un certo braccio per il momento hanno applicato un distanziatore di gomma tra esso e la *tape spring*. Al passaggio della corrente elettrica nel filo, esso si contrae e induce il dispiegamento del nastro. Proprio per la stabilità neutra, la *deployment* può essere attivato e sbloccato regolando il passaggio di corrente in qualsiasi step dell'arrotolamento.

L'impiego di tali dispositivi offre diversi vantaggi rispetto alle tradizionali *tape spring*: gli input di energia per l'arrotolamento e lo srotolamento sono minori; gli attuatori necessari sono più piccoli, leggeri, semplici ed economici; non servono particolari meccanismi di vincolo o rilascio per permettere il dispiegamento; infine, nella configurazione completamente piana presentano una elevata rigidità specifica.

Le applicazioni sono simili a quelle delle classiche *tape spring*.

6.1.4. Applicazioni

I sistemi di *deployment* che sfruttano le capacità delle *tape spring* sono molteplici e si possono riassumere nei seguenti casi:

- *synthetic aperture radar* (SAR);
- antenne;
- pannelli solari;
- booms.

I sistemi SAR [69] sono stati utilizzati con diversi scopi: per la mappatura e il monitoraggio dell'ambiente ed anche per osservazioni di carattere militare. La teoria su come operi un SAR è molto complessa, ma il concetto di interesse per questa trattazione è che le sue prestazioni dipendono dalle dimensioni: più grande è il dispositivo, maggiori sono le performance. E ciò si ripercuote sulle modalità di stivaggio, poiché è impensabile che un dispositivo così grande possa essere portato da un lanciatore nella sua configurazione finale. È quindi richiesto un sistema che consenta un efficiente *deployment* del componente, opportunamente stivato, una volta raggiunta l'orbita operativa. E sotto quest'aspetto rientra l'impiego delle *tape spring*.

Per le altre applicazioni si faccia riferimento ai paragrafi 2.6 e 2.7.

6.2. Analisi agli elementi finiti

6.2.1. Tape spring in CFRP

Il primo obiettivo delle simulazioni effettuate è stato quello di riprodurre i risultati di un precedente lavoro di tesi in cui è stato analizzato il comportamento statico di una *tape spring* in composito polimerico rinforzato con fibre di carbonio [68].

Nello studio condotto in [68] è stato utilizzato il software ABAQUS, che nella maggioranza dei casi pratici si è dimostrato essere lo strumento di analisi più robusto, e quindi più impiegato, per questa tipologia di fenomeni. Nel presente lavoro invece s'impiegano i software MSC Patran come pre- e post-processore, MSC Nastran come solutore ed infine MSC Marc Mentat.

6.2.1.1. Modellazione *tape spring*

In [68] è stata analizzata tutta una serie di modelli con diversi parametri geometrici, con il fine di capire la loro influenza nei confronti del comportamento del dispositivo.

Per gli scopi di questo lavoro, si considera un modello con le seguenti caratteristiche geometriche:

lunghezza	$L = 130$ [mm]
spessore	$t = 0.12$ [mm]
angolo sotteso	$\alpha = 90^\circ$
raggio	$R = 20$ [mm]

Tab. 6-1 Parametri geometrici della *tape spring*.

La realizzazione del modello si è basata sul lavoro svolto da Ligustri [68] e soprattutto prendendo per valide le relazioni che garantiscono sia il non raggiungimento della tensione massima ammissibile, sia i corretti rapporti tra le diverse grandezze. Si è già detto come il comportamento di una *tape spring* sia vincolato principalmente dalle sue proprietà geometriche, ossia L , α , R e t . Ci si avvale della relazione

$$\frac{R}{t} \geq \frac{E}{\sigma_y(1+\nu)} \quad (\text{Eq.50})$$

per verificare che le combinazioni di raggio di curvatura e spessore siano tali da non causare il superamento della tensione massima ammissibile per il composito, σ_y . Nel caso in esame, avendo considerato $\sigma_y = 527$ [MPa], i valori geometrici suddetti soddisfano tale condizione. La lunghezza L è stata ottenuta dal parametro adimensionale di rapporto di aspetto l definito tramite

$$l = \frac{L}{R\alpha} \quad (\text{con } \alpha \text{ in radianti}) \quad (\text{Eq.51})$$

Nelle diverse prove eseguite in [68] prendono in considerazione diversi valori di l , che viene fatto variare tra 4, 6, 8 e 16. Per i modelli studiati in questa sede, si considera solo il caso $l = 4$, cioè $L = 125,7 \approx 130$ [mm] (per $\alpha = \pi/2$ e $R = 20$ [mm]).

Il modello geometrico è stato costruito utilizzando il pre-processore MSC Patran, con solutore impostato su MSC Marc.

In Fig. 6-12 si riporta il modello della la *tape spring*.

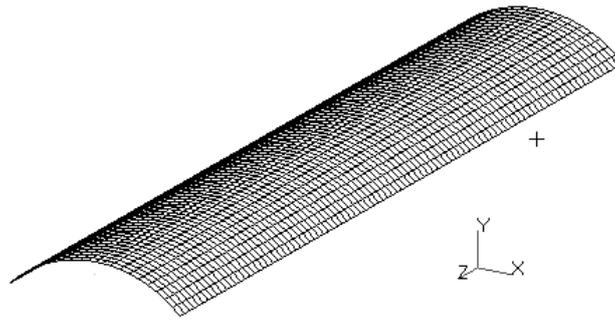


Fig. 6-12 Modello geometrico della *tape spring*.

Il materiale impiegato è un composito polimerico rinforzato con fibre di carbonio (CFRP) le cui proprietà sono riportate in Tab. 6-2, dove:

- E_{11} , E_{22} ed E_{33} sono i moduli di Young nelle direzioni principali;
- ν è il coefficiente di Poisson;
- G_{12} , G_{13} e G_{23} rappresentano i moduli di taglio.

t [mm]	E_{11} [MPa]	E_2 [MPa]	E_{33} [MPa]	$G_{12} = G_{23} = G_{13}$ [MPa]	ν
0.12	$7.8 \cdot 10^4$	$7.8 \cdot 10^{10}$	$7.8 \cdot 10^4$	$6.9 \cdot 10^3$	0.04

Tab. 6-2 Proprietà del materiale CFRP.

Il sistema di riferimento ha l'asse z che percorre la lunghezza della *tape spring*, mentre gli assi x e y giacciono sulla sezione trasversale, come mostrato in Fig. 6-12.

Dopo aver costruito la geometria, si sono impostate le proprietà del materiale (2D *orthotropic*) e quelle degli elementi (*thin shell*).

Per quanto riguarda la mesh, a differenza di quella adottata in [68], si considerano un numero maggiore di elementi in quanto i software utilizzati per queste simulazioni sono meno robusti di ABAQUS e richiedono quindi una discretizzazione più fine. S'impiega dunque una mesh di 20×96 elementi *QUAD4* con un bias di -1.03 per garantire un infittimento nella parte centrale, quella più critica per l'analisi. Particolare attenzione è stata posta nella scelta della mesh in modo tale da mantenere il rapporto d'aspetto delle singole celle inferiore a 2.

Per dimostrare l'insensibilità dei risultati nei confronti della discretizzazione, si è creato anche un modello con una mesh più fine nella parte centrale, dove si sono quadruplicati gli elementi

QUAD 4, inserendone anche di tipo *TRIA 3*, per garantire la continuità nella trasmissione delle tensioni tra gli elementi. Svolgendo un'analisi con entrambe le tipologie di mesh si è notato che i risultati sono insensibili al grado di discretizzazione, come si può osservare dalla Fig. 6-13 dove le curve M- θ per i due casi si sovrappongono.

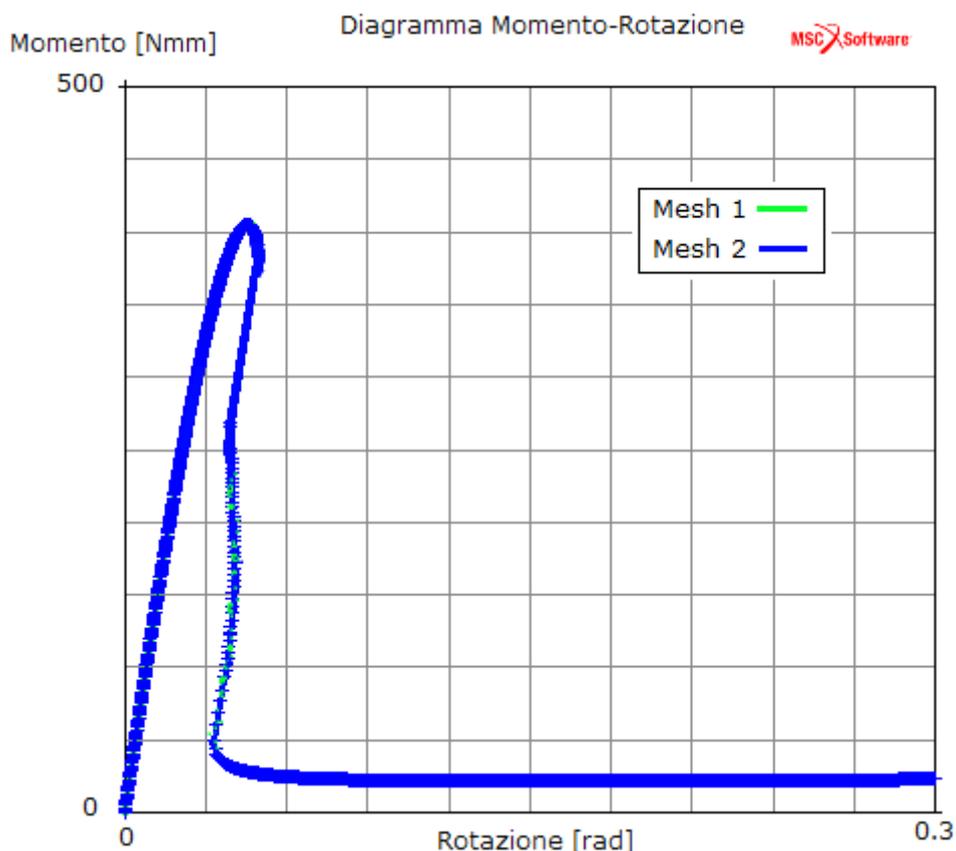


Fig. 6-13 Confronto dei risultati tra la mesh di base (Mesh 1) ed una più fine (Mesh 2).

I nodi di estremità del lato corto sono vincolati da elementi *multi point constraint* (MPC) a due nodi di controllo posti sullo stesso piano della sezione e posti sull'asse neutro. Gli MPC impongono ai nodi dipendenti di muoversi come se fossero collegati al nodo indipendente attraverso delle travi rigide (Fig. 6-14).

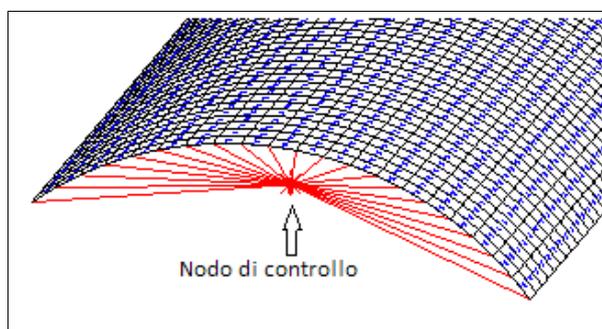


Fig. 6-14 Rappresentazione dell'elemento MPC.

L'asse neutro è localizzato, rispetto alla geometria, in base alle relazioni sviluppate in [66]. Facendo riferimento alla Fig. 6-15 si definiscono le due distanze d_1 e d_2 dall'asse neutro:

$$d_1 = \frac{R}{\alpha} \left[\alpha - \sin \frac{\alpha}{2} \right] \quad (\text{Eq. 52})$$

$$d_2 = -\frac{R}{\alpha} \left[2 \sin \frac{\alpha}{2} - \alpha \cos \frac{\alpha}{2} \right] \quad (\text{Eq. 53})$$

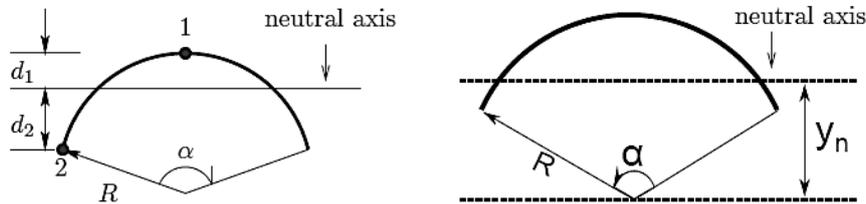


Fig. 6-15 Asse neutro della tape spring [66].

Per i casi analizzati l'asse neutro, si posiziona ad un valore pari a $y_n = 0.18$ [mm].

Ai nodi indipendenti delle MPC sono imposte le condizioni di vincolo ed i momenti, e rispetto ad essi vengono valutati i risultati. Una delle due estremità è vincolata in modo da permettere solo le rotazioni attorno all'asse x , mentre l'altra ha libere sia le rotazioni in x sia gli spostamenti lungo z .

Nelle prime simulazioni si sono scelte le soluzioni SOL 400 e SOL 600 (solutore implicito di MSC Patran) con metodo di Riks-Ramm [60-62]. Dopo diversi tentativi, si è giunti alla conclusione che le due tipologie di soluzione non sono abbastanza robuste per questo tipo di problema e quindi si è scelto di utilizzare il software MSC Marc Mentat [35, 58-59].

La scelta di impiegare il metodo Riks-Ramm (una delle tipologie dell'*arc length method*) risiede nella sua capacità di seguire l'andamento delle sollecitazioni in funzione degli spostamenti (e viceversa) per il fenomeno dello *snap through*. Per chiarire l'efficienza di questa soluzione si riportano in Fig. 6-16 i diagrammi relativi al medesimo modello, con la differenza che nel primo viene impostato, per gli incrementi, il metodo *fixed*, mentre nel secondo è stato utilizzato l'*arc length method*. Dalla figura si nota come, pur essendo comparabili i valori caratteristici di M_+^{\max} e θ_+^{\max} , nel secondo caso l'andamento del momento è seguito correttamente, a differenza del primo in cui si osserva un salto netto in corrispondenza dello *snap through*.

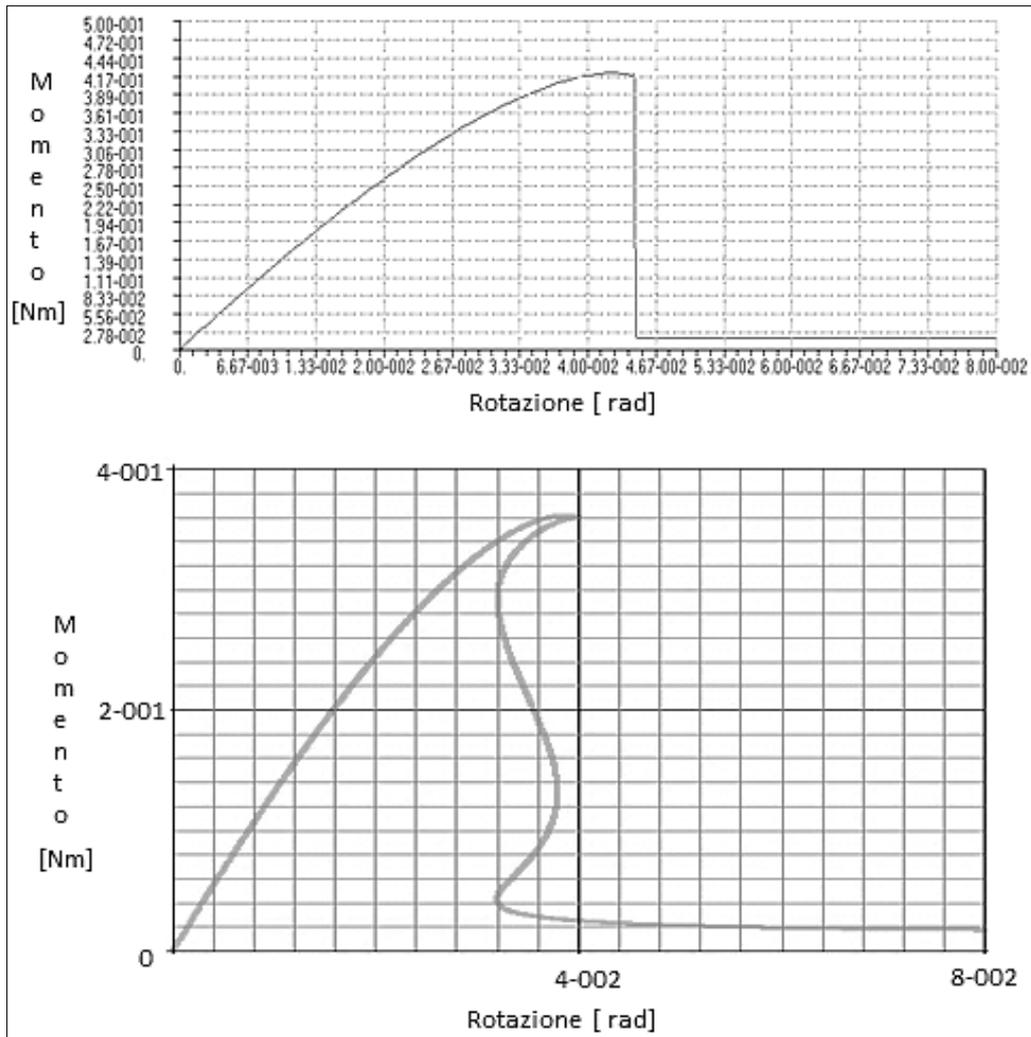


Fig. 6-16 Confronto fra metodo Fixed e arc length method.

Scelto dunque di utilizzare MSC Marc Mentat, una volta importato il modello, è stato fatto un controllo per verificare che tutti i parametri fossero stati passati da MSC Patran nel modo corretto.

L'analisi è stata fatta impostando adeguati valori per il *loadcase* e per il *job* in modo da garantire l'ottenimento dei risultati ricercati. Nelle Tab. 6-3 e Tab. 6-4 si riportano i dati che si riferiscono all'analisi.

<u>PROPRIETÀ LOADCASE</u>	
Massimo numero di incrementi nel <i>job</i>	9999
Massimo numero di iterazioni per incremento	100
Procedura iterativa	Full Newton-Raphson
Tolleranza sulla forza relativa	0.01
Nello specifico: <u>Arc Length Method</u>	
Metodo	Riks-Ramm

Frazione iniziale del carico	0.001
Massima frazione di carico in un incremento	0.5 (costante)
Numero max di incrementi nel loadcase	9998
Iterazioni desiderate per incremento	50
Rapporto max tra lunghezza d'arco e lunghezza iniziale dell'arco	10
Rapporto minimo tra lunghezza d'arco e lunghezza iniziale dell'arco	10e-7
Numero max di cutbacks	1000

Tab. 6-3 Parametri di controllo del loadcase.

<u>PROPRIETÀ DEL JOB</u>	
Procedura non lineare	Large Strain
Large Strain	Update Lagrange

Tab. 6-4 Parametri di controllo del job.

Per questo modello si sono compiute delle simulazioni sia per il caso *opposite sense* che per il caso *equal sense*.

6.2.1.2. Risultati

Per entrambi i casi di piegatura considerati, per facilitare la formazione della piega, si è preliminarmente fatta un'analisi di buckling da cui si è presa la deformata (dell'ordine dei decimi di millimetro) come punto di partenza per l'analisi vera e propria. Anche dalle osservazioni fatte in [68], si può dire che le imperfezioni così inserite non influenzano i risultati finali.

Dalla simulazione del caso *opposite sense* si sono ricavati i seguenti valori dei parametri caratteristici:

$$M_+^{max} = 0.3620 [Nm]$$

$$\theta_+^{max} = 0.0398 [rad]$$

$$M_+ = 0.0179 [Nm]$$

Si sottolinea come il valore di θ_+^{max} ricavato dalle simulazioni sia riferito all'asse x del modello, mentre quello relativo alle formule è considerato come in Fig. 6-1. Per confrontare i valori si deve moltiplicare per 2 il valore ottenuto dall'analisi, ottenendo così un valore pari a 0.0796 [rad].

Nei successivi esempi si riporterà direttamente il valore moltiplicato per 2.

Si riportano in Tab. 6-5 gli scarti riguardanti valori trovati in [68].

Parametri	Valori di riferimento [68]	%
M_+^{max} [Nm]	0.3902	7.8
θ_+^{max} [rad]	0.0878	10.3

Tab. 6-5 Scarti riferiti ai valori ricavati in [68].

Per il momento di propagazione, non avendo un termine di paragone nello studio di Ligustri, si fa un confronto con il valore ricavato dalla formula che lo definisce:

$$M_+ = D(1 + \nu)\alpha \quad (\text{Eq. 54})$$

dove D è la rigidezza flessionale della piastra:

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)}$$

Si ottiene:

M_+^{FEM} [Nm]	$M_+^{formula}$ [Nm]	% M_+
0.0179	0.0184	2.8

In generale, si osserva come i risultati ottenuti siano abbastanza aderenti a quelli in [68]. Tra le cause degli scostamenti calcolati, si deve considerare il fatto di aver impiegato software differenti per l'analisi. Inoltre, sia la mesh sia i parametri di controllo sono diversi, scelta che si è resa necessaria in quanto, per questo particolare tipo di problema, MSC Marc è meno robusto di ABAQUS.

Si calcola inoltre il valore della rigidezza di *deployment*, utile per i successivi confronti:

$$\frac{M_+^{max}}{\theta_+^{max}} = 4.55 \text{ [Nm/rad]}$$

In Fig. 6-17 si riporta il diagramma caratteristico M- θ .

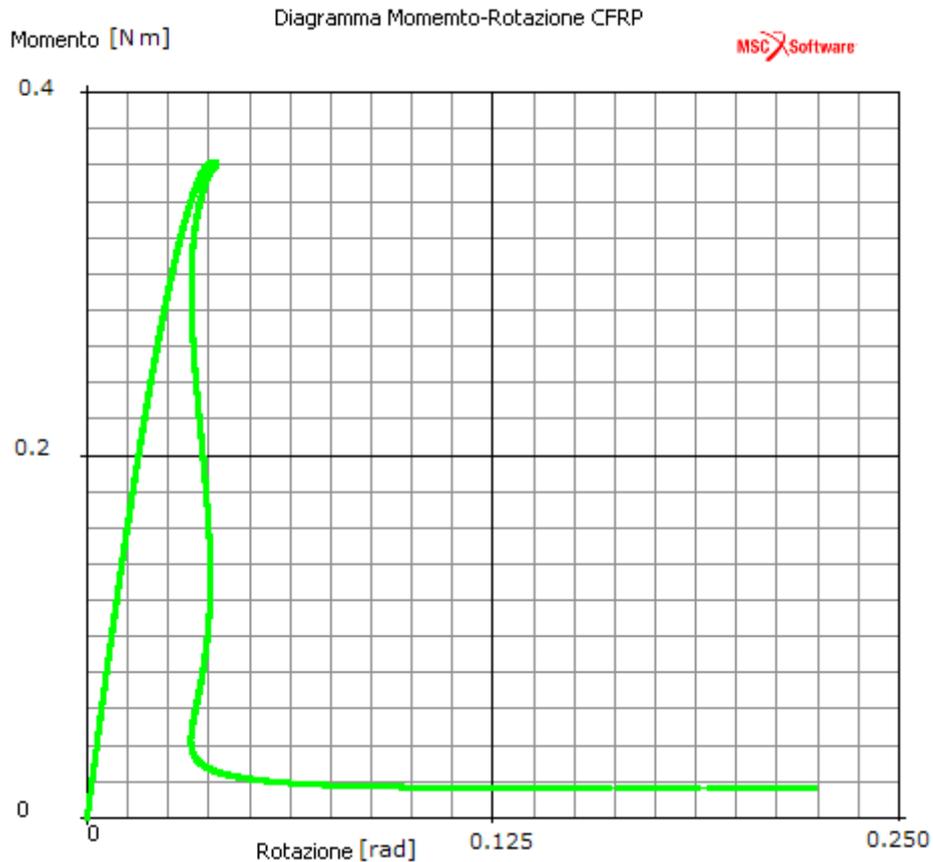


Fig. 6-17 Diagramma M- θ per il caso opposite sense.

Come previsto dalla teoria, il comportamento è lineare elastico nel primo tratto fino a $\theta = 0.0796$ [rad] $\approx 4.56^\circ$ dove si raggiunge il valore massimo del momento. In corrispondenza di questo punto si manifesta la piegatura e l'appiattimento della sezione centrale (Fig. 6-18 (a)). Poi la curva scende e la deformazione si localizza al centro della *tape spring* (Fig. 6-18), mantenendo un valore costante del momento.

In Fig. 6-18 si riportano due *snapshot* della deformata.

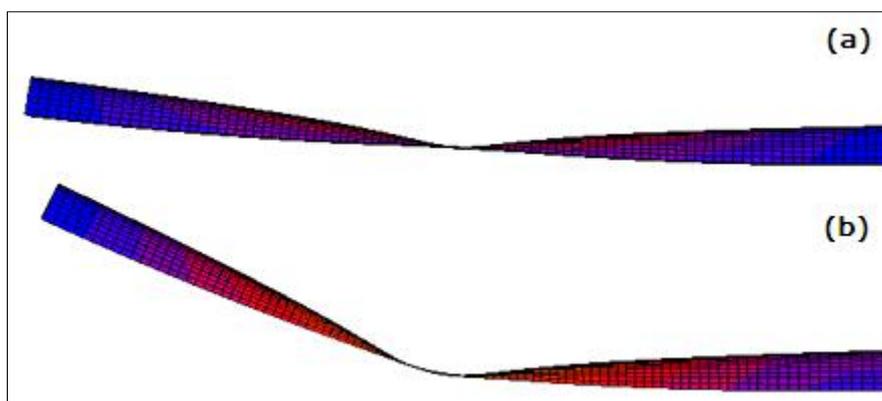


Fig. 6-18 Snapshot della deformata: (a) appiattimento sezione. (b) posizione generica.

Per la prova *equal sense*, la deformazione indotta per aiutare il solutore a formare la piegatura è stata significativa; inoltre, la durata dell'analisi si è rivelata alquanto lunga. A fronte di

queste osservazioni si è deciso di portare l'esempio della piegatura *equal sense* solamente per il caso della *tape spring* in CFRP, considerato anche il fatto che nella pratica comune si sfrutta maggiormente la piegatura *opposite sense*.

Si sono ricavati i seguenti valori caratteristici:

$$M_-^{max} = -0.0925 [Nm]$$

$$\theta_-^{max} = -0.0155 [rad]$$

$$\theta_{ramp} = -0.3940 [rad]$$

$$M_- = -0.0188 [Nm]$$

Si riportano in Tab. 6-6 gli scarti che si riferiscono ai dati trovati in [68].

Parametri	Valori di riferimento [68]	%
M_-^{max} [Nm]	- 0.0956	3.5
θ_{ramp} [rad]	- 0.3714	5.7

Tab. 6-6 Scarti.

Anche in questo caso si confronta il valore di M_- con quello che si ricava dalla formula [66]:

$$M_- = -D(1 - \nu)\alpha$$

e se ne riporta lo scarto:

M_-^{FEM} [Nm]	$M_-^{formula}$ [Nm]	% M_-
-0.0188	-0.0169	10.1

In Fig. 6-19 si riporta il diagramma M- θ . Come previsto dalla teoria, inizialmente si ha un tratto elastico lineare fino a un valore massimo del momento in corrispondenza di $\theta = -0.0155$ [rad] $\approx 0.88^\circ$. Poi la curva si attesta ad un valore di momento di $M_- = -0.0188$ [Nm].

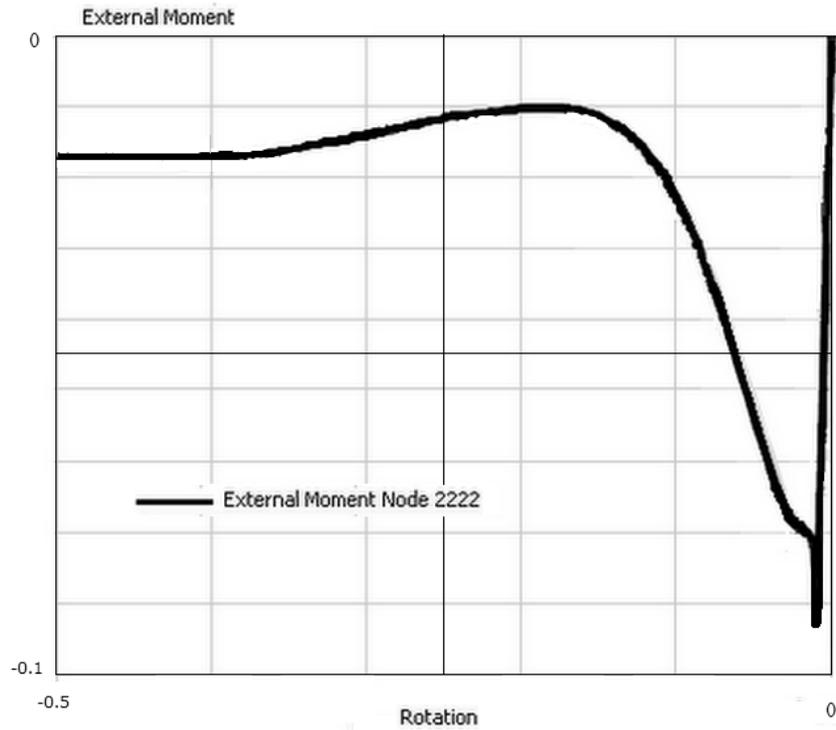


Fig. 6-19 Diagramma M- θ per il caso equal sense.

Fig.

La simulazione si è dimostrata onerosa e una causa risiede anche nel fatto che il solutore fa fatica a cogliere il modo torsionale che porta alla formazione della piega. Si riporta in Fig. 6-20 il diagramma M- θ relativo ad uno dei primi tentativi, dove i parametri di controllo sono più rilassati e anche la mesh risultava più grezza. Si osserva come il picco di momento mantenga il valore esatto, ma corrisponda a un fenomeno di buckling locale e non di natura flessionale. Il momento al quale poi si attesta il momento non è concorde con quello previsto, come anche l'angolo θ_{ramp} .



Fig. 6-20 Diagramma M-θ incompleto

La necessità di introdurre una forte deformazione nella configurazione iniziale rispecchia un fenomeno che s'instaura nella realtà. Ovvero, a differenza del caso *opposite sense*, la piegatura elastica non si localizza al centro, ma inizialmente si formano due pieghe laterali (Fig. 6-21) che, all'avanzare della deformazione, si spostano nella zona centrale fino ad unirsi.

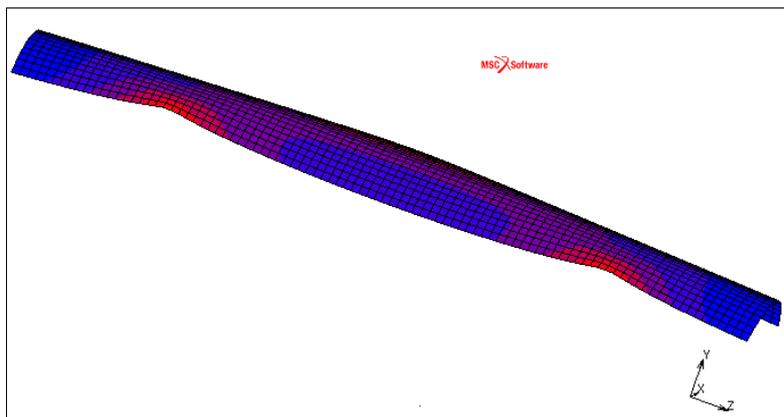


Fig. 6-21 Doppia piegatura nel caso equal sense.

6.2.2. Tape spring in CFRP con SMA

In questa seconda parte si considera una *tape spring* che mantiene le caratteristiche geometriche di quella precedente e prevede l'inserimento di elementi a memoria di forma.

6.2.2.1. Introduzione

Come già spiegato, uno dei limiti delle *tape spring* in CFRP riguarda la controllabilità del processo di dispiegamento, poiché si possono manifestare indesiderate instabilità dinamiche alla fine del *deployment*. Per far fronte a quest'aspetto, una delle soluzioni adottate è quella di inserire degli elementi in lega a memoria di forma.

Nel recente studio condotto da Ju Won Jeong *and al.* [71] considerano un sistema di *tape spring hinge* con uno smorzatore in lega a memoria di forma che, se opportunamente riscaldato, guida il dispiegamento senza provocare bruschi effetti dinamici (Fig. 6-22). In questo modo si converte il comportamento di *deployment* da dinamico instabile a stabile quasi-statico. Inoltre, rispetto a una tradizionale *tape spring*, si ottengono valori maggiori di rigidità e momento di dispiegamento.

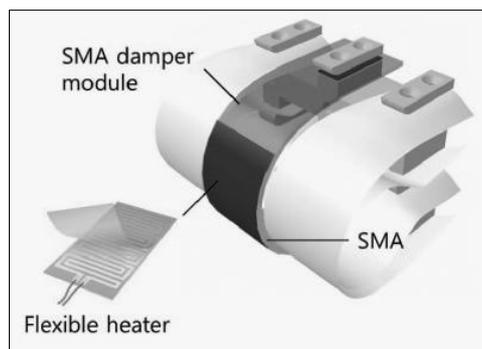


Fig. 6-22 Sistema di *tape spring* più smorzatore in SMA [71].

Lo scopo dello studio condotto in [71] è la realizzazione di una *tape spring* che non sia una soluzione di compromesso, ma che riesca a soddisfare contemporaneamente requisiti funzionali di elevata rigidità di dispiegamento (o di *deployment*), elevata coppia di dispiegamento e minimo shock di blocco.

L'idea è quindi quella di sfruttare l'effetto a memoria di forma di una SMA per controllare in modo attivo il dispiegamento.

Tra i casi pratici in cui si realizzano dispositivi completamente in lega a memoria di forma, l'unico caso rilevante nel settore aerospaziale è una cerniera in SMA adottata a bordo del satellite EO-1 per il dispiegamento di un pannello solare flessibile e leggero (*lightweight flexible solar array*, LFSA) [72]. La cerniera è composta di un paio di *tape spring* in NiTi e da due riscaldatori per la loro attivazione (Fig. 6-23). Il LFSA è dispiegato quasi-staticamente mano a mano che la SMA recupera gradualmente la forma originale. Questa modalità di *deployment* elimina le problematiche relative sia al verificarsi di indesiderate instabilità di blocco sia quelle per la corsa oltre la configurazione piana dispiegata; tuttavia, si ha una bassa rigidità in quanto nella fase operativa la lega a memoria di forma si trova sotto forma di martensite, che ha un modulo elastico di 28 [GPa]. Questo valore è molto minore di quello

assunto, ad esempio, per il modulo di Young dell'acciaio (200 [GPa]), materiale solitamente impiegato per le *tape spring* prima dell'utilizzo dei compositi. Risulta inferiore anche alla rigidità che può presentare un CFRP (circa 78 [GPa]).

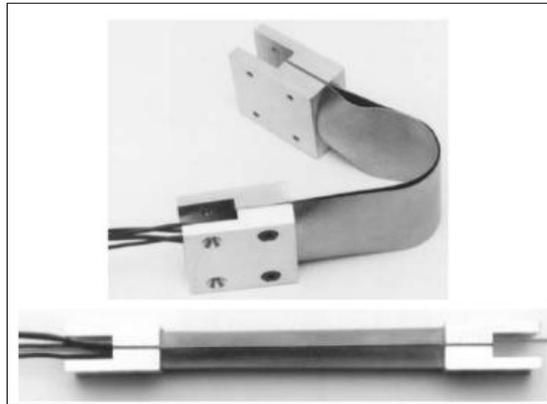


Fig. 6-23 Cerniera in SMA per il dispiegamento di un LFS [72].

Dopo queste osservazioni, si può pensare che la miglior soluzione sia quella che unisce le proprietà dei compositi CFRP e quelle delle SMAs. In Tab. 6-7 si riportano i parametri caratteristici di alcuni dispositivi di *deployment* che impiegano differenti materiali costruttivi.

Deployment device	Type	Deployed stiffness (N m/rad)	Deployment torque (N m)	Controllability	Mass (g)
SMADTSH	Flexible	2895	>0.773	SMA damper; Quasi-static deployment	176
Maeva	Flexible	1000	>0.15	No controllability	85
Arirang series TSH	Flexible	932	>0.2	Stopper; overtravel is limited to 3°	
FRED	Rigid	3626	1.48	Constant torque spring; no controllability	
SH-9010	Rigid	32-418	>1.1	Torsion bar soft stop; trade-off between FRs	540 (unit)
AH-9066	Rigid	>323	>3.38	Paraffin motor; quasi-static deployment	280

Tab. 6-7 Confronto delle prestazioni di alcuni dispositivi di dispiegamento [71].

Il primo dispositivo riportato in tabella è quello realizzato nello studio [71] e denominato SMADTSH, *shape memory alloy dampened tape spring hinge*. Si osserva come la sua rigidità di dispiegamento sia circa tre volte maggiore rispetto alle altre cerniere flessibili. Anche per quanto concerne la coppia di dispiegamento, essa è superiore rispetto agli altri dispositivi. Inoltre, il comportamento di *deployment* di una SMADTSH è quasi-statico mentre negli altri casi non è possibile controllare in maniera attiva il dispiegamento.

Dal punto di vista della controllabilità, per garantire una velocità di dispiegamento controllata e coerente con il satellite stesso, molte delle cerniere richiedono uno smorzatore, dove il controllo termico è essenziale a causa della sensibilità alla temperatura. Il modulo con lo smorzatore in SMA invece, se la A_s viene scelta in modo da essere maggiore della temperatura operativa, non viene influenzato dalla temperatura.

Un altro fattore rilevante è sicuramente la massa, che per lo smorzatore in SMA è considerevolmente minore rispetto a quelli convenzionali.

Per quanto riguarda l'attrito, la soluzione SMADTSH non ne presenta, a differenza delle altre cerniere in cui c'è attrito nei giunti scorrevoli, richiedendo così una tecnologia avanzata di lubrificazione e controllo con conseguenti aumenti di complessità e costo.

Riassumendo, una *tape spring* realizzata anche con elementi in lega a memoria di forma permette di raggiungere i seguenti requisiti funzionali:

- elevata rigidità di dispiegamento;
- elevata coppia di dispiegamento;
- minimo shock di blocco dopo il *deployment*.

6.2.2.2. Modello *tape spring*

A fronte delle osservazioni fatte nel paragrafo precedente, si è deciso di riprodurre prima una *tape spring* in lega a memoria di forma e poi una in CFRP con inseriti elementi in SMA (Nitinol).

Per il primo caso si vuole verificare il comportamento dell'elemento in SMA e studiare i parametri che lo possono influenzare, ma il caso d'interesse è sicuramente il secondo. Lo scopo principale sarà quello di dimostrare gli effetti positivi della presenza della SMA in termini di:

- aumento della rigidità di dispiegamento;
- aumento del momento di dispiegamento.

Inoltre si studierà il comportamento della *tape spring* al variare:

- della tipologia della SMA;
- del posizionamento della SMA;
- dello spessore dell'elemento in lega a memoria di forma;
- della configurazione del laminato.

Saranno fatte alcune osservazioni relativamente:

- alla presenza d'imperfezioni geometriche;
- all'applicazione di carichi non simmetrici o eccentrici;
- a geometrie alternative per la *tape spring*.

6.2.2.2.1. Tape spring in SMA

Come prima cosa si è costruito un modello totalmente in SMA per osservare il comportamento nel caso di piegatura *opposite sense*.

In generale, il processo delle trasformazioni di fase di una *tape spring* in SMA durante le operazioni di piegatura e dispiegamento sono le seguenti (Fig. 6-24):

- configurazione iniziale piana: martensite *twinned*;

- posizione serrata: martensite *detwinned*;
- subito dopo il dispiegamento (dopo riscaldamento): austenite;
- fase operativa: martensite *twinned*.

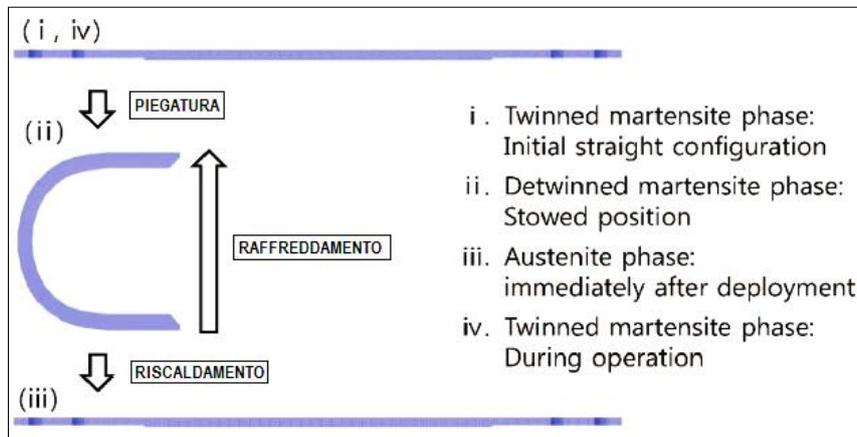


Fig. 6-24 Processo delle trasformazioni di fase per una tape spring in SMA.

In MSC Marc Mentat, come già detto nel paragrafo 2.7.3, sono implementati i due modelli costitutivi di Auricchio per le leghe a memoria di forma. In questa sede sarà utilizzato il modello termomeccanico.

I parametri dell'analisi sono gli stessi impiegati nel caso precedente; fa eccezione il parametro *Matrix Solver* (Fig. 6-25) relativo al *job* che, per le leghe a memoria di forma, è consigliabile settare su *Nonsymmetric* per migliorare la convergenza, in quanto il modello termomeccanico usa una matrice jacobiana non simmetrica [34 vol. A].

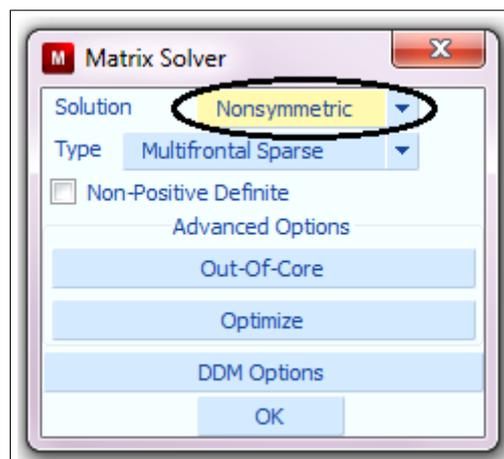


Fig. 6-25 Impostazione parametro Matrix Solver.

Si sono messe a confronto due SMA, con differenti moduli elastici, per capirne l'influenza sul diagramma $M-\theta$. I valori considerati sono volutamente distanti in modo da accentuare le differenze nei risultati:

$$E^{SMA1} = 70000 \text{ [MPa]}$$

$$E^{SMA2} = 28000 \text{ [MPa]}$$

Dalla Fig. 6-26 si osserva come il grafico ricalchi l'andamento caratteristico delle *tape spring*. La curva in verde (SMA1) rappresenta la lega a memoria di forma con modulo maggiore, mentre quella rossa si riferisce alla SMA con un modulo inferiore (SMA2). Come ci si poteva aspettare, si può affermare che tanto maggiore è il modulo della lega a memoria di forma, tanto maggiore sarà la sua rigidezza di *deployment*:

$$\left. \frac{M_+^{max}}{\theta_+^{max}} \right|_{SMA1} = 4364 \text{ [Nmm/rad]}$$

$$\left. \frac{M_+^{max}}{\theta_+^{max}} \right|_{SMA2} = 3556 \text{ [Nmm/rad]}$$

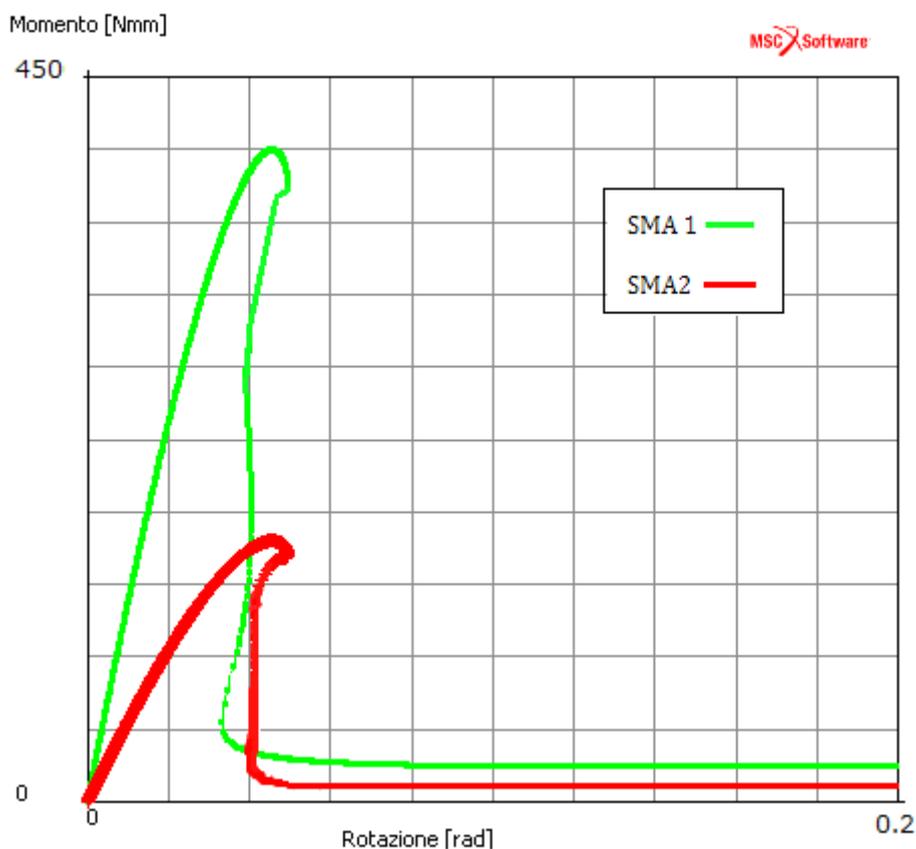


Fig. 6-26 Confronto fra diagrammi M-θ di SMAs con differenti moduli elastici.

In Tab. 6-8 si riportano i parametri caratteristici della curva M-θ ed i relativi scarti rispetto ai valori che si ottengono dalle formule. Nel caso specifico delle SMAs, essendo considerate materiali isotropi, vengono utilizzate le formule ricavate per le leghe CuBe in [66] e non quelle per i materiali CFRP [68]. Tenendo conto che le formule non sono formulate *ad hoc* per le leghe a memoria di forma, gli errori che si ottengono non sono così elevati. Si sottolinea come il confronto con le formule sia stato fatto per capire se i risultati ottenuti dall'analisi agli elementi finiti si potevano ritenere affidabili o meno. A fronte dei dati ottenuti si può concludere che, in prima approssimazione, l'analisi ha fornito dei buoni risultati.

	M_+^{max} [Nmm]	%	θ_+^{max} [rad]	%	M^+ [Nmm]	%
SMA1	405.00	27	0.0928	14	22.53	4.3
SMA2	165.00	4.5	0.0928	14	11.25	16

Tab. 6-8 Valori caratteristici del grafico M- θ per SMA con differenti moduli elastici.

In Fig. 6-27 si riportano due step durante la piegatura dell'elemento; anche in questo caso si può notare l'appiattimento della sezione centrale e la conseguente concentrazione delle deformazioni nella parte centrale.

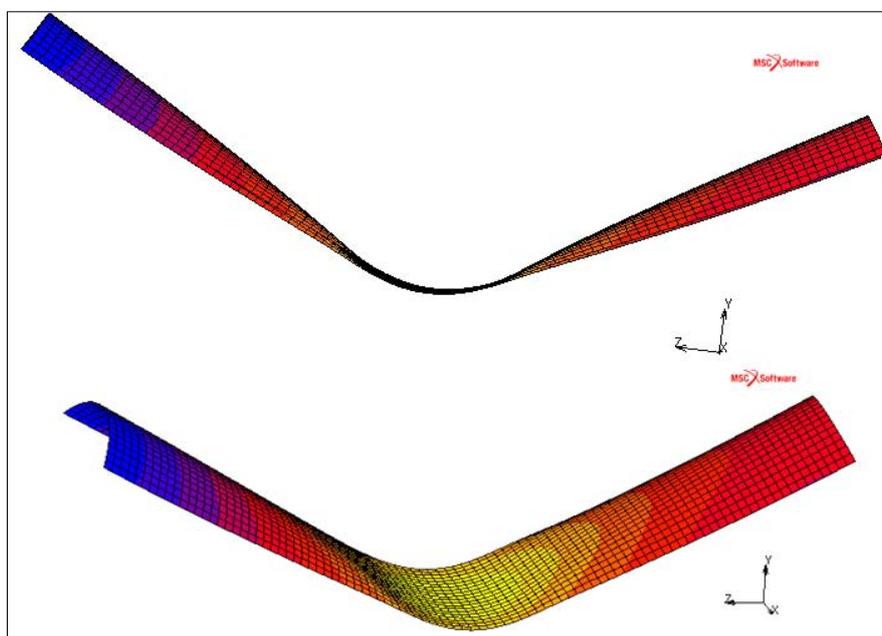


Fig. 6-27 Snapshot della deformata.

Considerando il materiale SMA2, con proprietà più aderenti a quelle delle leghe realmente impiegati, si osserva come la sua rigidezza (3556.0 [Nmm]) sia inferiore a quella di una stessa *tape spring* in CFRP (9095.5 [Nmm]). Ciò conferma quanto già detto in precedenza e porta alla soluzione di impiegare una combinazione di CFRP e SMA.

6.2.2.2.2. Tape spring in CFRP con SMA

Le dimensioni della *tape spring* sono le stesse del modello precedente (Tab. 6-1), come anche le proprietà per il materiale CFRP (Tab.6-2).

Per l'elemento in lega a memoria di forma si utilizzerà una lega NiTi (Nitinol) di cui si riportano le proprietà in Tab. 6-9, che corrispondono ai valori impostati nel modello termomeccanico di Auricchio implementato in MSC Marc per le SMAs.

AUSTENITE	
E_A [MPa]	70000
v_A	0.33
A_S [°C]	5
A_f [°C]	20
C_A [MPa/°C]	8
α_A [°C⁻¹]	1.1E-5
σ_A [MPa]	300
MARTENSITE	
E_M [MPa]	40000
v_M	0.33
M_S [°C]	-50
M_f [°C]	-100
C_M [MPa/°C]	6
α_M [°C⁻¹]	6E-6
σ_M [MPa]	150
ALTRI PARAMETRI	
g-a	-4
g-b	2
g-c	0
g-d	+2.75
g-e	0
g-f	3
g-0	1000
g-max	1
Stress a g-max [MPa]	10e+20

Tab. 6-9 Caratteristiche della SMA considerata.

Per tutti i modelli realizzati, si è posta particolare attenzione nel definire l'orientazione del materiale, fattore importante in ambiente MCS Marc. Dal menù “*Material Properties, Orientation*” di MSC Marc Mentat si è scelta l'opzione *YZ Plane*, con un angolo di rotazione di 180°.

Per studiare l'influenza delle leghe a memoria di forma sul comportamento in fase di piegatura si sono studiate diverse configurazioni:

- *tape spring* in CFRP con striscia centrale di SMA posta o all'interno o all'esterno: Modello 1;
- *tape spring* in CFRP con striscia centrale di SMA posta all'esterno con diversi valori di spessore: Modello 2;
- *tape spring* in composito laminato di CFRP e SMA: Modello 3;
- laminato con due strati, uno di CFRP e uno di SMA $[0^\circ/0^\circ]$: Modello 4.

Nelle analisi condotte si è preso in considerazione solamente il caso *opposite sense*.

Per lo studio dei modelli si fa riferimento ai seguenti requisiti:

- rigidezza di *deployment*, definita come il rapporto tra M_+^{\max} e θ_+^{\max} (pendenza iniziale della curva $M-\theta$);
- coppia di *deployment*, definita come il momento alle estremità della *tape spring*.

Modello 1

Si è innanzitutto condotta un'analisi su una *tape spring* identica a quella in CFRP, con una striscia di lega a memoria di forma posizionata longitudinalmente al centro, lunga quanto la *tape spring*, larga 5 [mm] e con uno spessore di 0.12 [mm] (Fig. 6-28).

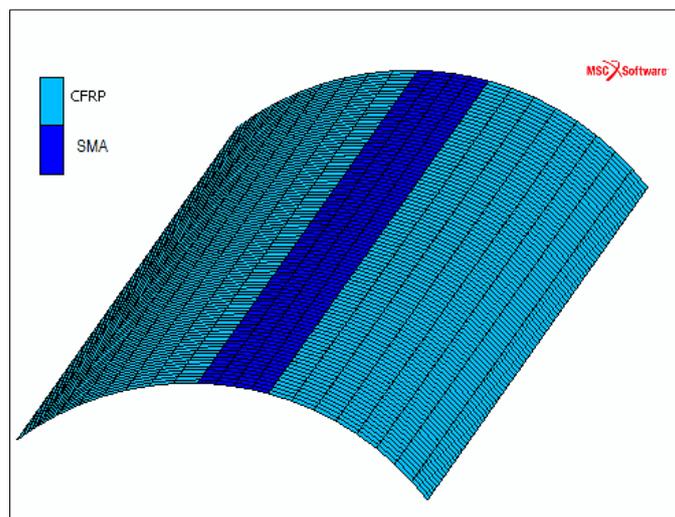


Fig. 6-28 Proprietà materiali.

Vengono analizzate due configurazioni:

- striscia di SMA posta sulla superficie interna;
- striscia di SMA posta sulla superficie esterna.

Lo scopo è di capire quale sia la configurazione migliore per raggiungere la maggiore rigidezza di *deployment*.

Considerando il primo caso, in Fig. 6.29 si riporta il corrispondente diagramma M- θ , messo a confronto con quello della *tape spring* solo in CFRP. Si osserva come l'inserimento dell'elemento SMA porti ad un aumento della rigidezza di circa il 20% (Tab. 6-10) e del momento di *deployment* rispetto al caso senza SMA, a confermare quindi quanto già detto precedentemente.

I valori caratteristici trovati sono:

$$M_+^{max} = 498.2 \text{ [Nmm]}$$

$$\theta_-^{max} = 0.090 \text{ [rad]}$$

$$M_+ = 30.7 \text{ [Nmm]}$$

Rigidezza di <i>deployment</i>	Solo CFRP	CFRP + striscia di SMA	%
$M_+^{max} / \theta_-^{max}$ [Nmm/rad]	4550	5536	18

Tab. 6-10 Rigidezze di *deployment*.

Per quanto concerne invece il momento di propagazione, questo non è particolarmente influenzato dall'aggiunta della lega a memoria di forma.

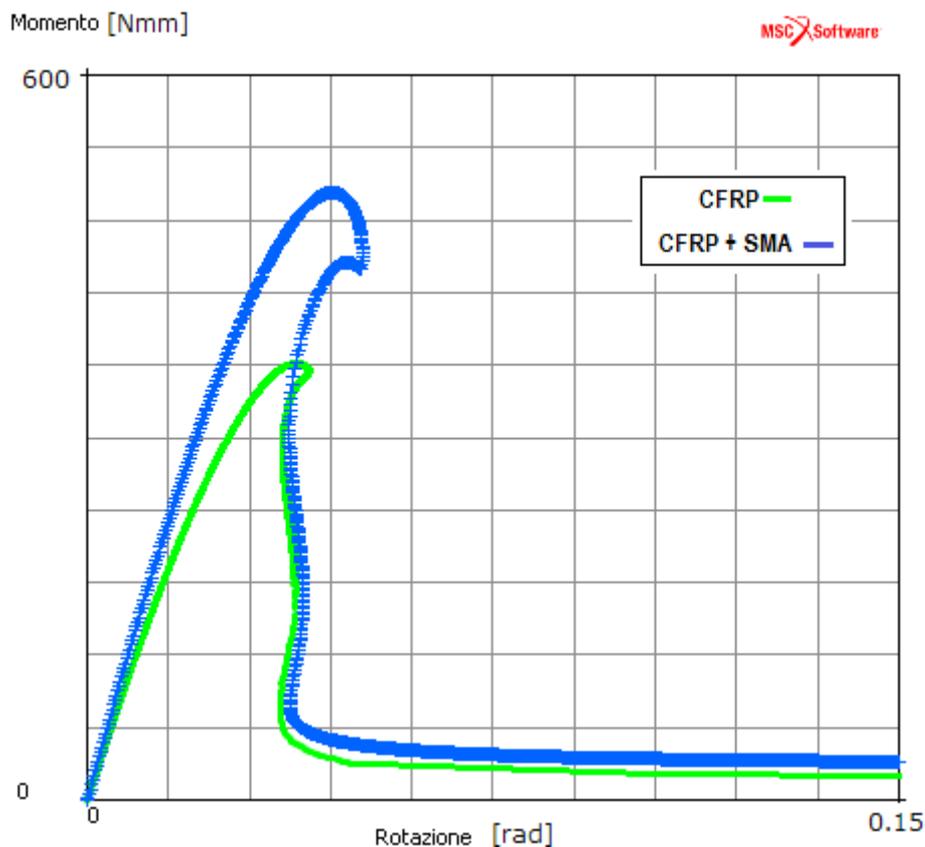


Fig. 6-29 Confronto tra curve M- θ di *tape spring* in CFRP e CFRP+SMA.

Non essendo disponibili delle formule apposite per una tipologia di materiale come quella in esame, si è scelto, in prima approssimazione, di usare le formule ricavate in [68] per i CFRP per avere un'idea dell'affidabilità dei risultati ottenuti.

Per utilizzare le suddette formule è necessario disporre del modulo di elasticità del materiale e dei parametri geometrici della *tape spring* (spessore t , raggio R e lunghezza L). Per determinare delle proprietà equivalenti del materiale in esame, pur non essendo propriamente un laminato, s'impiegano le formule della teoria classica dei laminati per la parte centrale (Materiale 2: SMA+CFRP) e successivamente quella della lamina unidirezionale considerando come "fibra" il Materiale 2 e come matrice il Materiale 1 (CFRP) (Fig. 6-30).

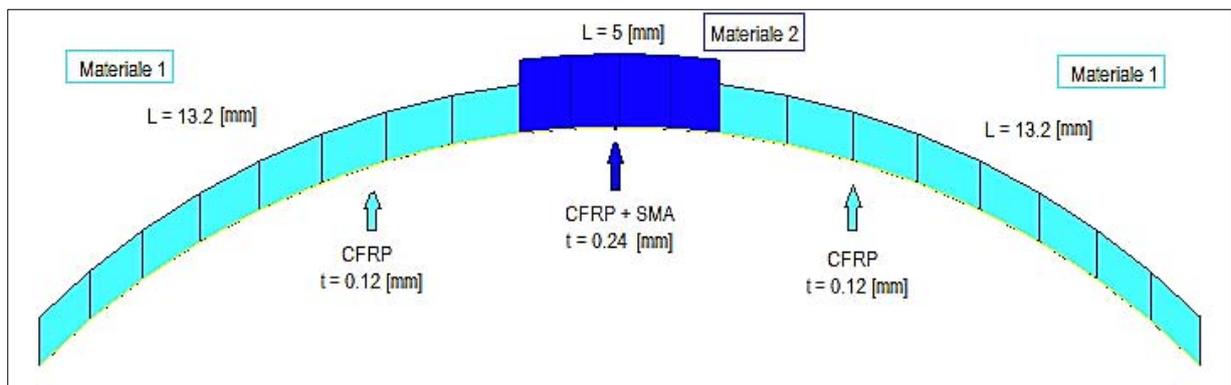


Fig. 6-30 Sezione per la determinazione dei parametri equivalenti.

Per il Materiale 2 sono stati calcolati i seguenti parametri equivalenti:

$$E'_{Materiale\ 2} = 7.56 \times 10^4 [MPa]$$

$$\nu'_{Materiale\ 2} = 0.185$$

Si definiscono le seguenti aree (Fig. 6-30 sopra), utili per la determinazione delle proprietà equivalenti:

$A_{Materiale\ 2} [mm^2]$	1.17
$A_{Materiale\ 1} [mm^2]$	3.19
$A_{totale} [mm^2]$	4.36

Per il materiale complessivo, considerando come componenti il Materiale 1 ed il Materiale 2, si sono definite le loro frazioni di volume:

$$V_{Materiale\ 1} = \frac{A_{Materiale\ 1}}{A} = 0.73$$

$$V_{Materiale\ 2} = \frac{A_{Materiale\ 2}}{A} = 0.27$$

Il modulo elastico equivalente e il coefficiente di Poisson equivalente sono stati ricavati dalle seguenti espressioni:

$$E' = V_{Materiale\ 1} E + V_{Materiale\ 2} E'_{Materiale\ 2}$$

$$\nu' = V_{Materiale\ 1} \nu + V_{Materiale\ 2} \nu'_{Materiale\ 2}$$

Sostituendo questi nuovi valori nelle formule di M_+^{max} e θ_+^{max} e considerando uno spessore “equivalente” di 0.14 [mm] si ottiene quanto riportato in Tab. 6-11, assieme agli scarti relativi ai risultati ottenuti dall’analisi agli elementi finiti. Per quanto riguarda il momento di propagazione, si confronta il valore ottenuto dall’analisi con quello che si ricava dall’Eq. 54 inserendovi il valore di D equivalente.

M_+^{max} [MPa]	%	θ_+^{max} [rad]	%	M_+ [MPa]	%
522.01	4.8	0.0569	36.8	29.6	3.5

Tab. 6-11 Valori ottenuti dalle formule e relativi scarti.

Il secondo caso prevede invece che l’elemento in SMA sia posto esternamente alla *tape spring*. Dalla Fig. 6-31 si nota come questa configurazione presenti un maggior valore di coppia di dispiegamento rispetto.

Dai valori ricavati per la rigidezza di *deployment*, per una prova *opposite sense* è quindi più conveniente mettere la SMA nella parte esterna (sopra):

$$\left. \frac{M_+^{max}}{\theta_+^{max}} \right|_{SMA\ sotto} = 5535.6 \text{ [Nmm/rad]}$$

$$\left. \frac{M_+^{max}}{\theta_+^{max}} \right|_{SMA\ sopra} = 5651.5 \text{ [Nmm/rad]}$$

Sapendo che il momento di propagazione dipende solo dalle proprietà materiali ed essendo quest’ultime uguali per entrambe le configurazioni, M^+ è lo stesso per tutti e due i casi e vale 32.73 [Nmm].

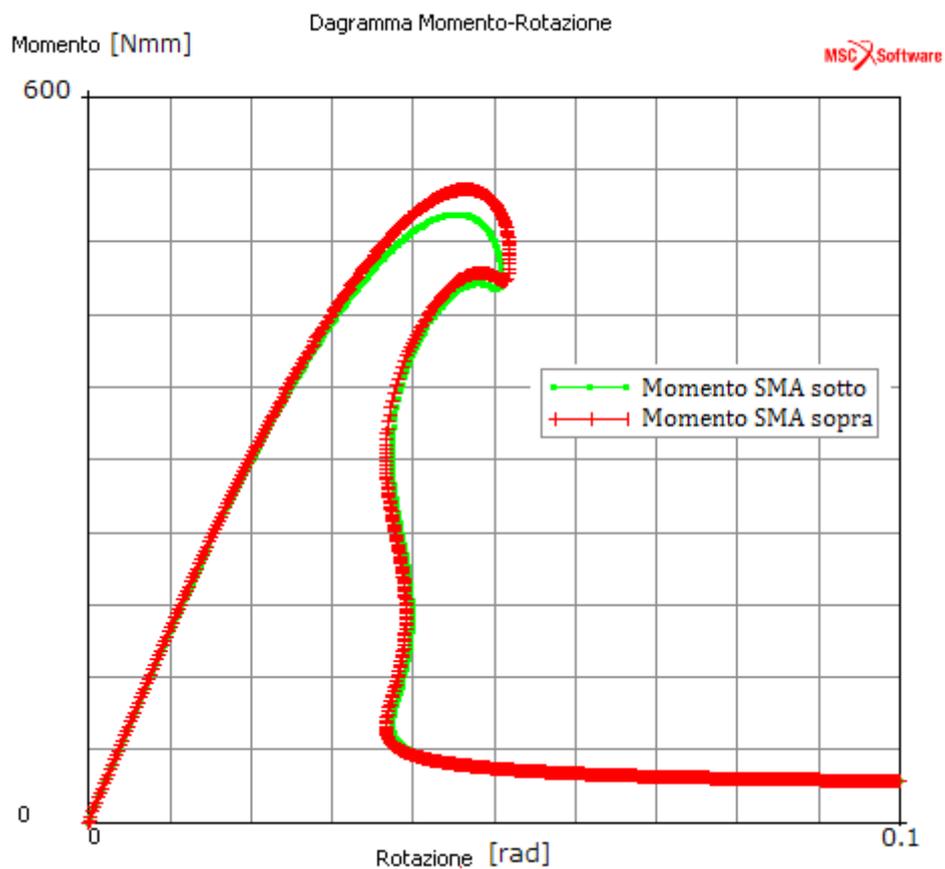


Fig. 6-31 Diagramma M- θ per due diversi spessori dell'elemento in SMA.

Riassumendo, la Fig. 32 rappresenta le curve di momento dei due casi appena trattati, messi a confronto con quella della *tape spring* in CFRP.

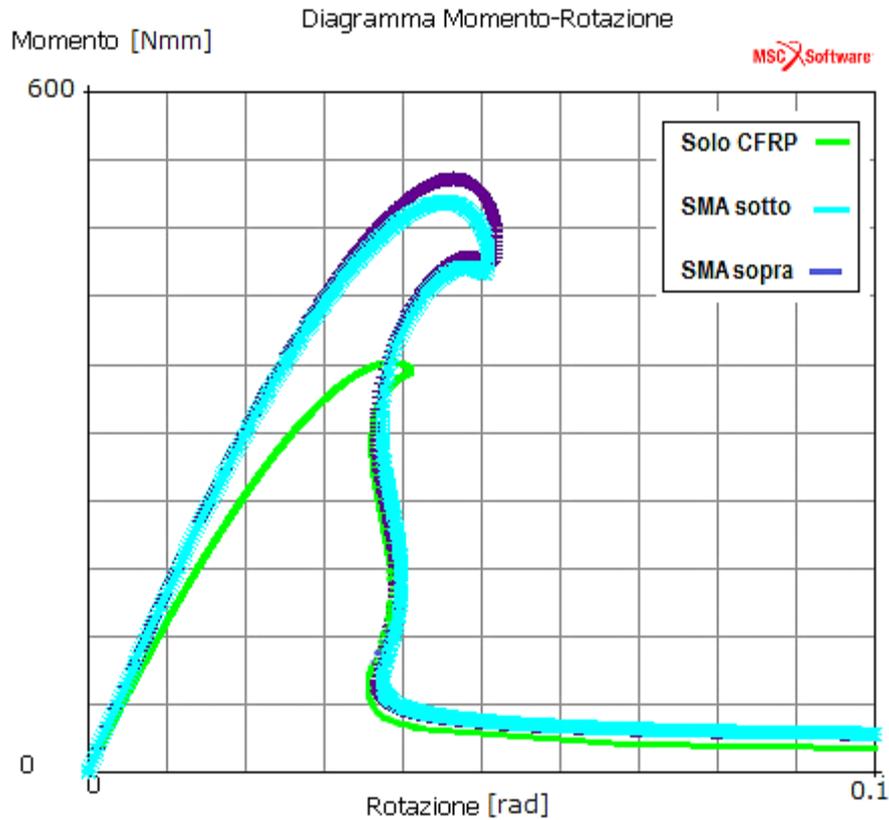


Fig. 6-32 Confronto.

Modello 2

Con questo modello si vuole studiare l'influenza dello spessore della striscia in SMA.

A fronte delle conclusioni tratte nel precedente paragrafo, si considera la configurazione con la lega a memoria di forma posta all'esterno della *tape spring*, sempre per una prova *opposite sense*.

Nella configurazione piegata, l'elemento in CFRP è stivato elasticamente, mentre quello in SMA è piegato con una deformazione, apparentemente plastica. Affinché il comportamento di dispiegamento possa essere completamente governato dalla velocità della trasformazione di fase della lega, il momento plastico della SMA deve essere maggiore del momento medio di *deployment* della singola *tape spring* [71].

Il momento plastico può essere valutato attraverso la seguente relazione:

$$M_p = \frac{bt^2}{4} \sigma_y$$

dove b è la larghezza dell'elemento in SMA, t lo spessore e σ_y la tensione di snervamento della martensite. Si considera la fase martensitica in poiché il dispositivo, nella fase operativa, si trova in tale fase.

Si considerano due valori dello spessore, $t_1 = 0.12 [mm]$ e $t_2 = 0.23 [mm]$.

Per la geometria e la lega in esame si hanno i seguenti valori:

$t_1 = 0.12$ [mm]	$t_2 = 0.23$ [mm]
$b = 31.42$ [mm]	$b = 31.42$ [mm]
$\sigma_y = 150$ [MPa]	$\sigma_y = 150$ [MPa]
$M_p = 16.97$ [Nmm]	$M_p = 62.33$ [Nmm]

Se per la *tape spring* in CFRP consideriamo un momento medio di *deployment* di 50 [Nmm], si osserva come nel primo caso non si soddisfi la condizione, mentre per t_2 essa sia verificata.

Si sottolinea come tali relazioni non siano state sviluppate appositamente per questa categoria di materiali e che in questo studio vengono utilizzate con il solo scopo di capire se i risultati ottenuti si possano considerare ragionevoli ed affidabili. In certi casi gli scostamenti quindi potranno essere elevati.

In Fig. 6-33 si riportano le curve $M-\theta$ per i due casi analizzati. Si osserva come il caso riferito allo spessore maggiore t_2 dia una rigidezza e una coppia di *deployment* più elevati

$$\left. \frac{M_+^{max}}{\theta_+^{max}} \right|_{t_1} = 5651.5 \text{ [Nmm/rad]}$$

$$\left. \frac{M_+^{max}}{\theta_+^{max}} \right|_{t_2} = 6011 \text{ [Nmm/rad]}$$

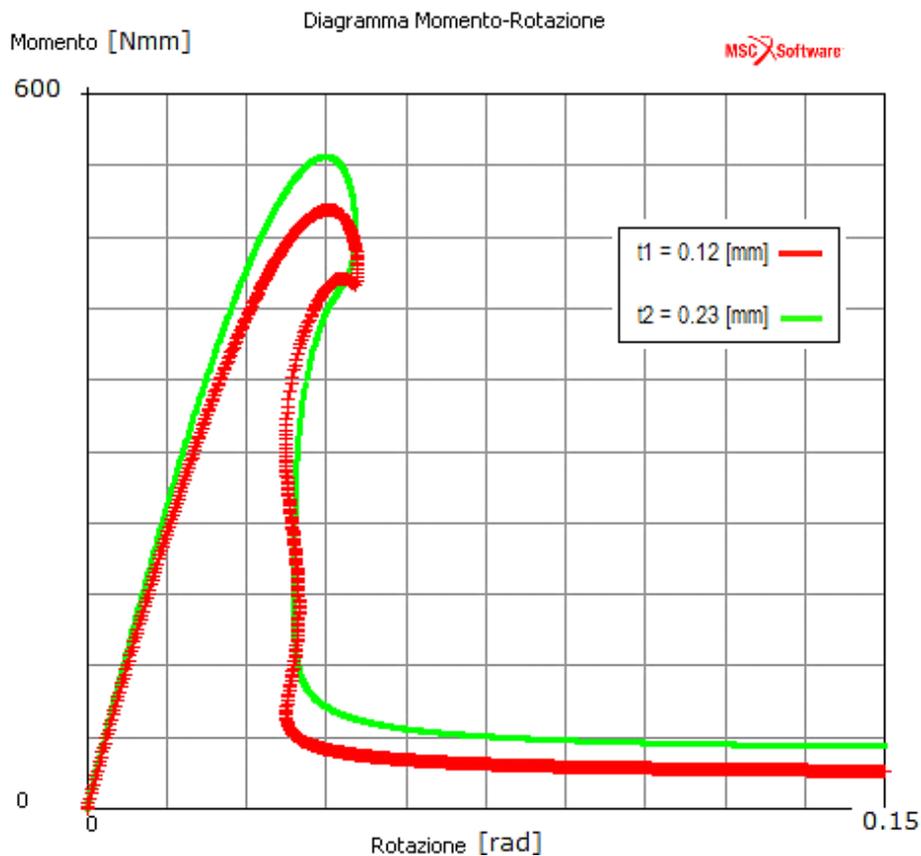


Fig. 6-33 Confronto tra spessori differenti.

Concludendo, per una prova *opposite sense* si raggiungono i migliori risultati inserendo un elemento in SMA nella parte esterna della *tape spring*, con uno spessore che sia tale da garantire un momento plastico maggiore della coppia media di dispiegamento della sola *tape spring* in CFRP.

Modello 3

In questo caso l'elemento è stato pensato come laminato composto di due lamine di CFRP con inserita nel mezzo una striscia più stretta di lega a memoria di forma, tutte con direzione principale lungo z (Fig. 6-34) e orientazione di 0° rispetto ad essa. L'idea è di avere l'elemento in SMAs immerso tra i due strati di composito.

Il materiale è stato modellato definendo due proprietà con le seguenti caratteristiche (Fig. 6-34):

composito 1	composito 2
t = 0.24 [mm]	t = 0.44 [mm]
CFRP	CFRP/SMA/CFRP

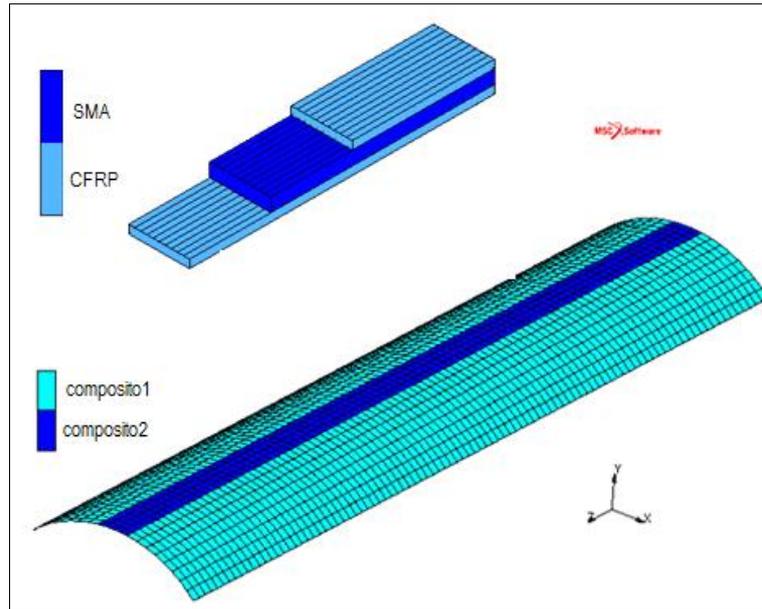


Fig. 6-34 Proprietà del laminato.

La mesh è costituita sempre da 20x96 elementi *QUAD4*.

Dall'analisi si sono ottenuti i seguenti valori:

$$M_+^{max} = 1602 \text{ [Nmm]}$$

$$\theta_-^{max} = 0.1441 \text{ [rad]}$$

$$M_+ = 199.8 \text{ [Nmm]}$$

$$\frac{M_+^{max}}{\theta_+^{max}} = 11117.3 \text{ [Nmm]}$$

La Fig. 6-35 rappresenta le curve M- θ del laminato e del caso di *tape spring* in CFRP con striscia esterna di SMA. Come ci si poteva aspettare, la rigidità è molto maggiore nel caso del laminato, che presenta inoltre un maggior valore anche dell'angolo θ_+^{max} ; ciò vuol dire che la sezione trasversale si appiattirà nella zona centrale per una rotazione maggiore rispetto all'altro caso riportato nel diagramma.

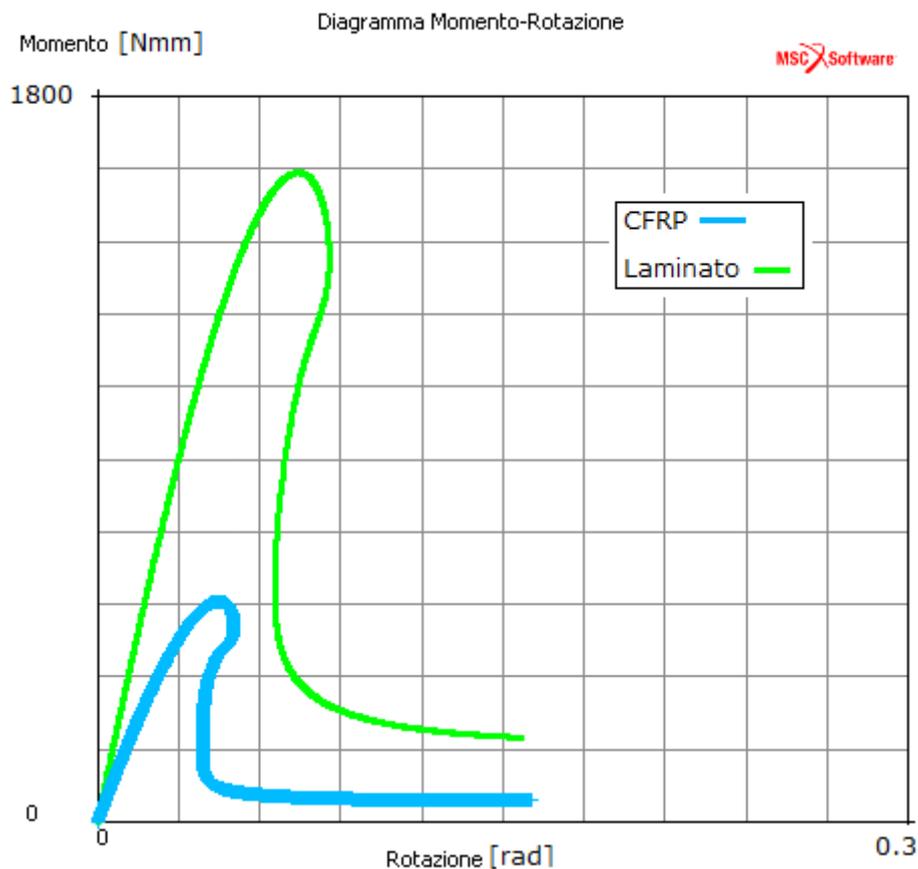


Fig. 6-35 Confronto tra il laminato e la tape spring in CFRP con la striscia di SMA.

In Fig. 6-36 si riporta uno *snapshot* della deformata del laminato dove si osserva l'appiattimento della sezione nella zona centrale della *tape spring*, senza evidenti effetti di distorsione causati dalla presenza della striscia in lega a memoria di forma.

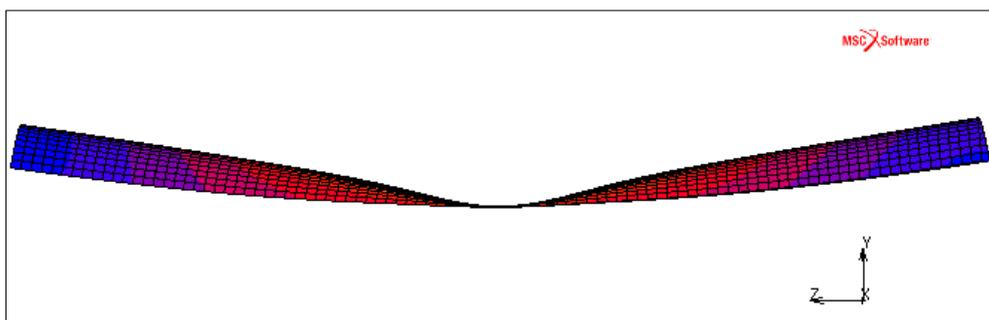


Fig. 6-36 Deformata del laminato, con appiattimento della sezione trasversale.

Modello 4

In questo caso, il modello è stato costruito come un laminato composto di due lamine, una in CFRP ed una in SMA, entrambe con orientazione 0° . Le proprietà sono le medesime dei modelli già trattati e per i parametri equivalenti da inserire nelle formule si adotta il medesimo procedimento del caso precedente.

In Fig. 6-37 si riporta il diagramma M- θ , che presenta il tipico andamento caratteristico delle *tape spring*. I parametri principali sono:

$$M_+^{max} = 1380 \text{ [Nmm]}$$

$$\theta_-^{max} = 0.144 \text{ [rad]}$$

$$M_+ = 149 \text{ [Nmm]}$$

$$\frac{M_+^{max}}{\theta_+^{max}} = 9583.3 \text{ [Nmm]}$$

Com'è intuitivo aspettarsi dopo le considerazioni fatte precedentemente, la rigidezza di *deployment* è maggiore rispetto ai casi già trattati.

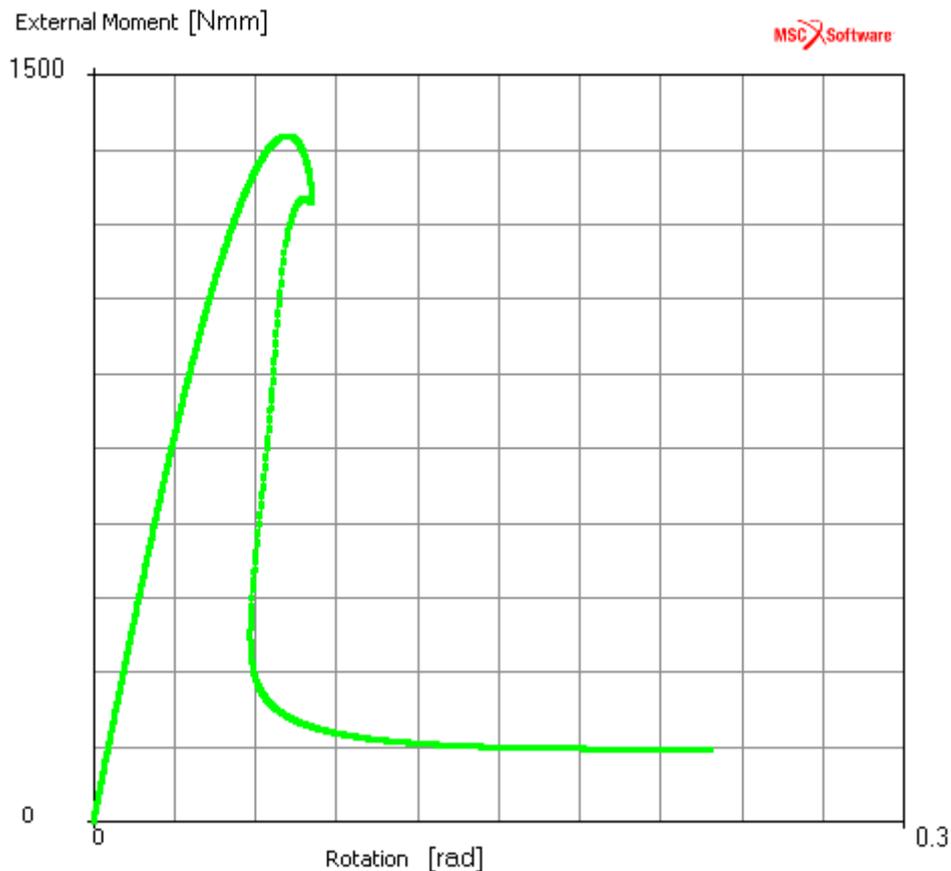


Fig. 6-37 Diagramma M- θ per il laminato.

6.2.3. Effetti di imperfezioni geometriche e carichi asimmetrici

Come già accennato, il processo di dispiegamento di una struttura deve essere affidabile e ripetibile, soprattutto per le applicazioni aerospaziali dove si devono garantire posizionamento e puntamento precisi di un certo sottosistema (antenne, pannelli solari, ecc.). Per soddisfare tali requisiti, il *deployment* della *tape spring* deve essere il più possibile preciso e ciò dipende sia dalla forma e dal materiale della stessa *tape spring*, che dalla fase di piegatura.

Durante la realizzazione dell'elemento, come in tutti i processi di produzione, vi possono essere dei fenomeni che inducono la formazione d'imperfezioni, geometriche o nelle caratteristiche del materiale.

Nelle fasi di fabbricazione ad esempio, le fibre potrebbero essere inserite in modo non perfettamente allineato, o la matrice potrebbe presentare dei micro-difetti. Anche a livello d'interfaccia tra CFRP e SMA si possono riscontrare dei problemi che inducono imperfezioni. Anche i difetti geometrici, assieme ai precedenti, influenzano notevolmente la configurazione piegata della *tape spring*.

Inoltre, un altro fattore che pesa sul comportamento in piegatura è la precisione nell'applicazione dei carichi alle estremità. Le prove sperimentali sono condotte sia in controllo di spostamento che di forza. In entrambi i casi, i carichi applicati non devono presentare eccentricità e devono avere valori identici alle due estremità per garantire una piegatura simmetrica, con appiattimento della sezione trasversale localizzata al centro *tape spring*.

A fronte delle precedenti osservazioni, si sono creati dei modelli per simulare alcuni difetti e studiarne qualitativamente l'influenza sulla piegatura della *tape spring*:

- Modello 5: *tape spring* con imperfezione geometrica localizzata;
- Modello 6: carico non simmetrico alle estremità;
- Modello 7: carico di torsione da una parte e di flessione dall'altra.

Modello 5

Come modello di base si è considerato quello della *tape spring* in CFRP (paragrafo 6.2.1). Per introdurre una generica imperfezione si sono spostati dalla loro posizione originale alcuni nodi della mesh, di una quantità pari al 10% dello spessore dell'elemento in esame (Fig. 6-38).

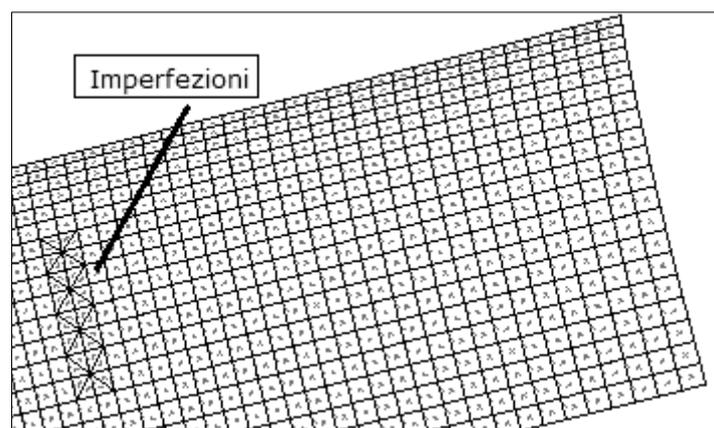


Fig. 6-38 Zoom sui nodi modificati.

Dall'analisi effettuata si è potuto osservare come la presenza del difetto influenza la posizione della piega, che in questo caso risulta spostata rispetto alla zona centrale in direzione opposta rispetto al difetto stesso (Fig. 6-39).

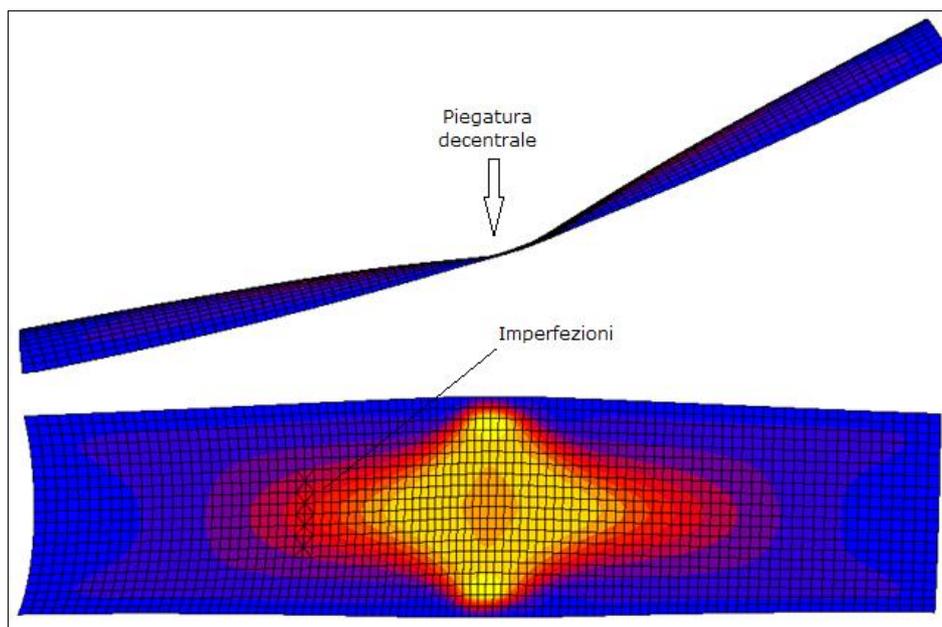


Fig. 6-39 Posizione decentrata della zona di piega causata dalla presenza delle imperfezioni.

In Fig. 6-40 si riporta il diagramma $M-\theta$ dove si mettono a confronto le curve relative al caso in esame e a quello della *tape spring* senza imperfezioni. Ovviamente, non variando le proprietà del materiale da uno all'altro modello, e avendo introdotto solo dei difetti minimi, le due curve sono identiche.

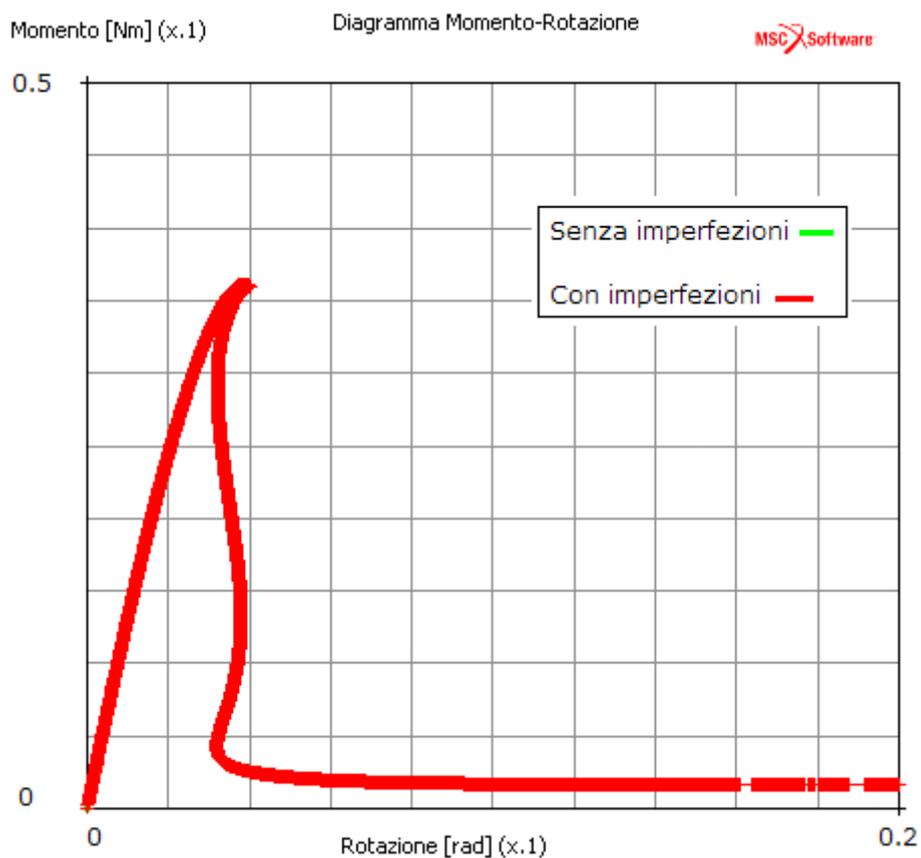


Fig. 6-40 Confronto tra il modello con e senza imperfezioni.

Modello 6

In questo caso il modello è quello riferito alla *tape spring* senza imperfezioni realizzata con il laminato di CFRP e SMA (Modello 3), ma i momenti applicati non presentano valori uguali, essendo pari a -2000 [Nmm] ad un'estremità e 2200 [Nmm] all'altra (Fig. 6-41). Dai risultati ottenuti si può osservare, com'era ovvio aspettarsi, che la zona di piegatura è spostata rispetto al centro verso l'estremità dove è applicato il momento maggiore (Fig. 6-42).

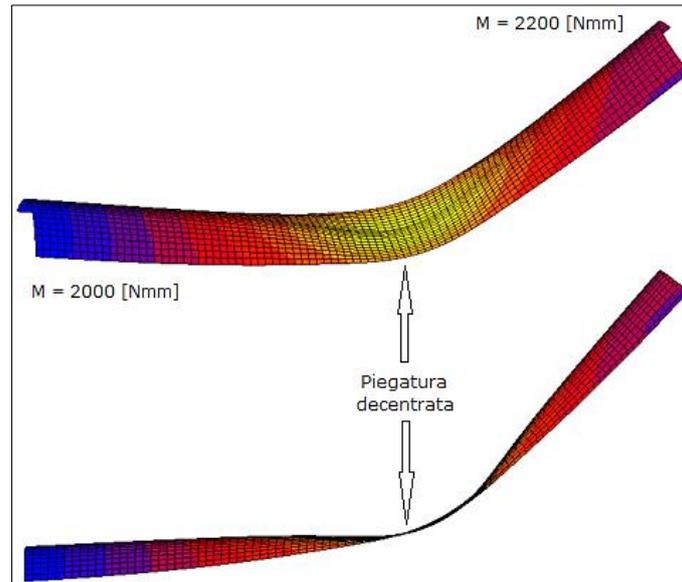


Fig. 6-43 Snapshot della deformata.

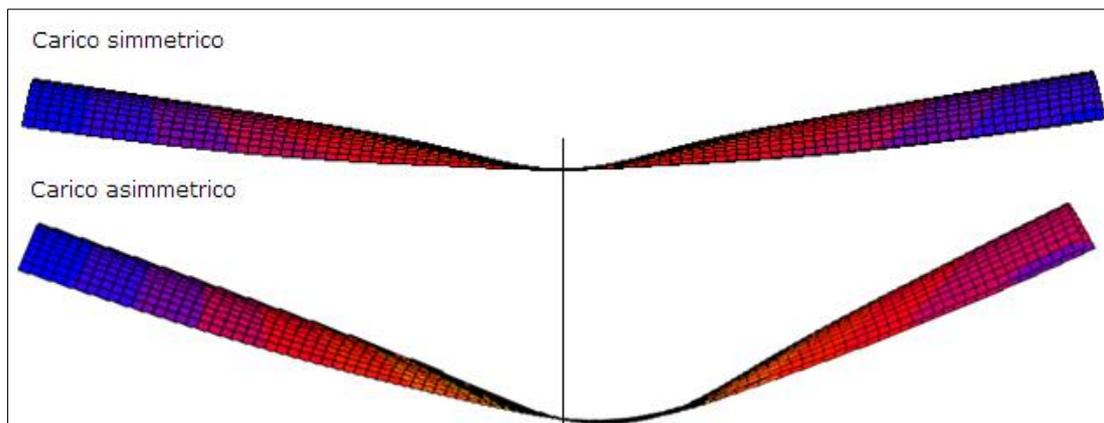


Fig. 6-44 Confronto tra il caso di carico simmetrico e quello di carico asimmetrico.

In Fig. 6-43 sono raffigurate le curve $M-\theta$ dei casi esaminati, con carico simmetrico ed asimmetrico.

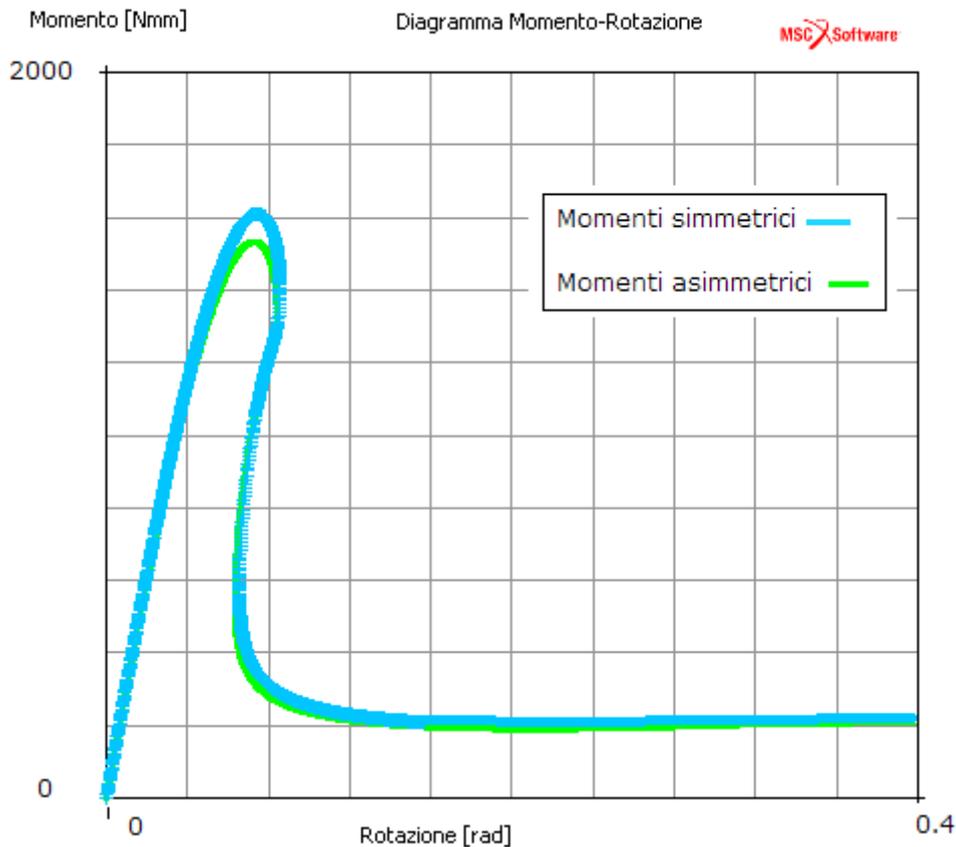


Fig. 6-45 Confronto tra il caso con i momenti simmetrici e quello con momenti asimmetrici.

Si può osservare come un carico asimmetrico, oltre all'errata posizione della piega, porti anche a una diminuzione del momento di dispiegamento e della relativa rigidezza (Tab. 6-12). Come per i casi precedenti, non variando né il materiale né la geometria, il momento di propagazione rimane invariato per entrambe le condizioni di carico.

	Momenti simmetrici	Momenti asimmetrici	%
M_+^{max} [Nmm]	1602	1536	4.3
θ_+^{max} [rad]	0.1441	0.1441	0
$M_+^{max} / \theta_+^{max}$ [Nmm/rad]	11117	10659	4.3

Tab. 6-12 Valori caratteristici per carichi simmetrici e asimmetrici.

Modello 7

Con questo modello si vuole sottolineare come la precisione nell'applicazione dei carichi sia fondamentale per evitare che la *tape spring* si deformi eccessivamente ed in modo non consono.

A titolo di esempio, per evidenziare quest'affermazione, al modello base in CFRP si sono imposte delle condizioni di carico diverse da quelle nominali: ad una estremità (Nodo 1) è stato applicato un momento flettente in x , mentre all'altra (Nodo 2) un momento torcente in z

(liberando, nel vincolo relativo, anche le rotazioni in z). Indicando con 0 un grado di libertà bloccato e con “,” uno libero, con T le traslazioni e con R le rotazioni, si riassumono così le condizioni al contorno, espresse nelle tre direzioni x , y e z :

- Nodo 1: T < 0 0 0 > R < , 0 0 > M = < -1200 0 0 > [Nmm]
- Nodo 2: T < 0 0 0 > R < , 0 , > M = < 0 0 1200 > [Nmm]

In Fig. 6-44 si riporta la deformata ottenuta dalla simulazione e si osserva come sia totalmente lontana da quella ricercata.

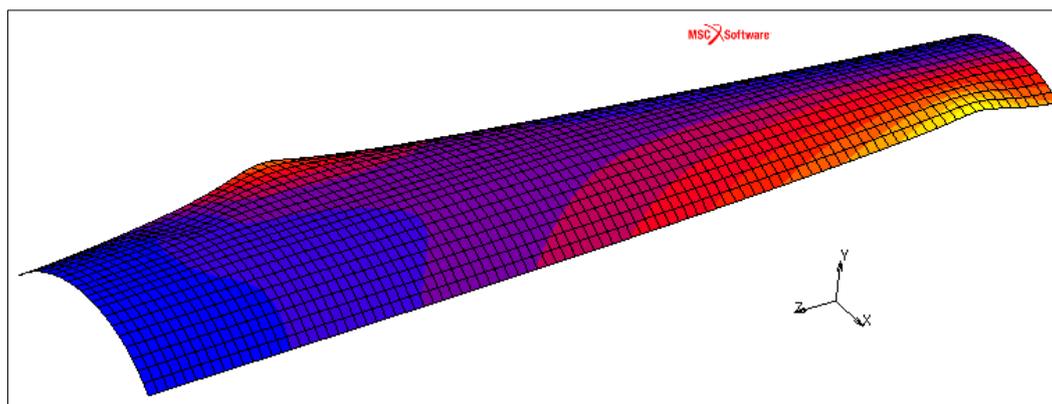


Fig. 6-46 Deformata (carico di torsione ad una estremità).

Fig.

Nella pratica, una situazione di questo genere si può avere nel caso di carichi eccentrici, siano essi forze/momenti o spostamenti/rotazioni imposte.

6.2.4. Geometrie alternative

Da quanto si è potuto osservare nel paragrafo precedente, diversi fattori vanno a influenzare la corretta formazione della piega nella parte centrale: difetti geometrici, non uniformità nel materiale, carichi asimmetrici, ecc. Avendo la necessità di realizzare un dispositivo che sia in grado di operare con affidabilità e ripetibilità elevate, l’influenza di questi fattori, inevitabili seppur minimi, deve essere ridotta il più possibile.

In quest’ultima parte si propone una geometria alternativa per la *tape spring*, pensata con lo scopo appunto di “forzare” la piegatura a localizzarsi al centro.

L’idea è di realizzare una *tape spring* con i lati lunghi leggermente incurvati per conferirle una forma “sciancrata”, partendo da un modello che mantiene le dimensioni di quelli già trattati (Fig. 6-45).

Per costruire la geometria sono stati creati dei punti a metà lunghezza (65 [mm]) con coordinate spostate “verso l’interno” rispetto a quelli originarie (Fig. 6-45):

Punto	Nuove coordinate [mm]
1	< -12 16 65 >
2	< 12 16 65 >

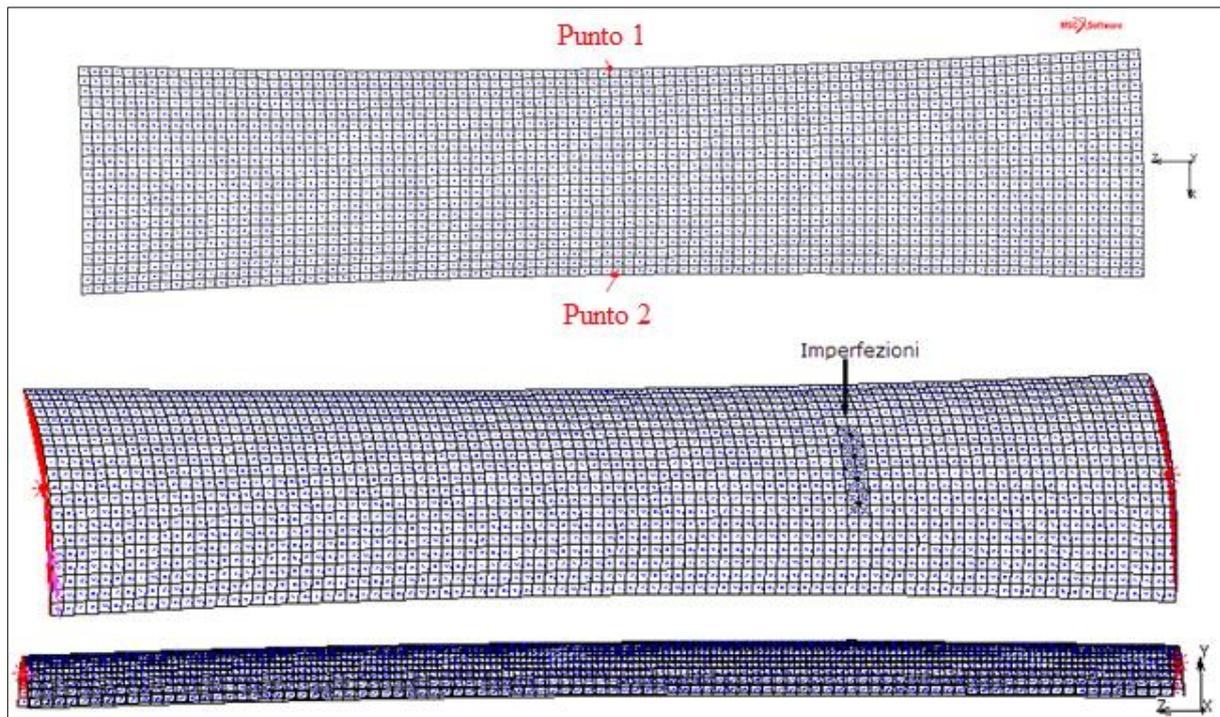


Fig. 6-47 Geometria sciancrata.

Al modello sono state aggiunte, nella stessa posizione, le medesime imperfezioni del Modello 5, con lo scopo di capire se una tale forma riesca a mantenere la piega nella parte centrale della *tape spring*.

Dai primi risultati ottenuti, nonostante sia stata indotta una deformazione iniziale (da una precedente analisi di buckling), non sembrerebbe che la nuova geometria sia adatta a questo scopo. Infatti, come si può osservare dalla Fig. 6-46, la piega si localizza a ridosso dell'imperfezione e non nel centro dell'elemento.

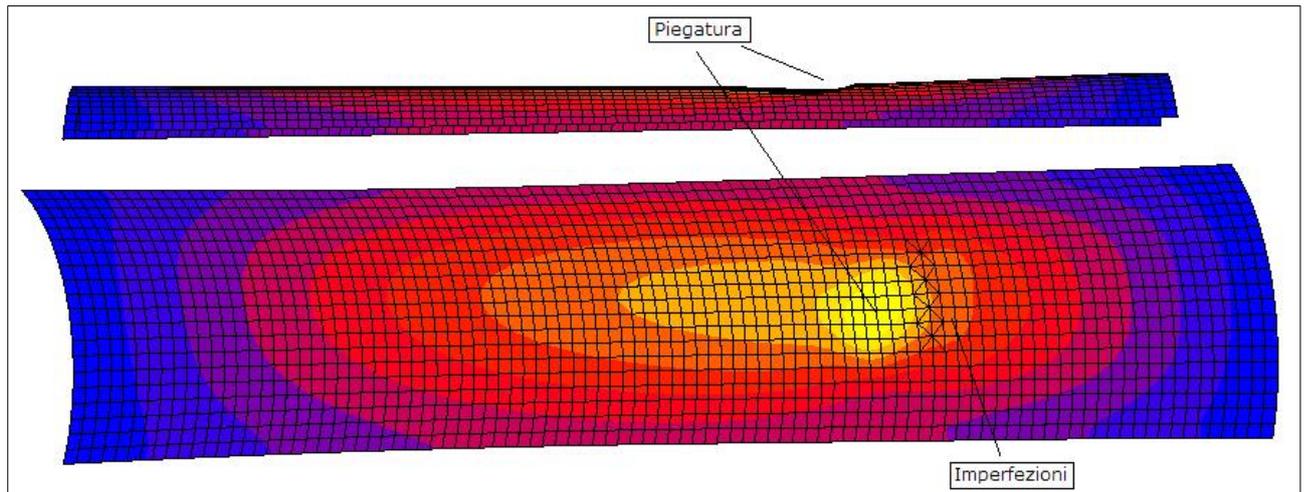


Fig. 6-48 Deformata.

Una possibile causa di questo comportamento potrebbe risiedere proprio nel modo in cui è stata creata la geometria. Infatti, osservando la Fig. 6-45, si vede come la *tape spring* risulti leggermente incurvata nella direzione opposta a quella di piegatura, essendo quindi d'ostacolo al processo.

Un altro motivo potrebbe essere che il livello di sciancratura impresso sia troppo basso per provocare un effetto rilevante.

6.2.5. Osservazioni

Un'osservazione viene fatta sulla temperatura di inizio austenite A_s alla quale la lega si attiva, inducendo il recupero della forma originale. La scelta di questa temperatura è un punto critico della progettazione e deve essere confrontata con la temperatura operativa. Infatti, se la temperatura dovesse raggiungere inavvertitamente la A_s (non per effetto Joule), allora verrebbe innescato l'effetto a memoria di forma e la *tape spring* tenderebbe a dispiegarsi in un istante che potrebbe non essere quello di progetto. Solitamente sono presenti degli appositi sistemi che tengono serrato l'elemento nella configurazione piegata, quindi il problema non è tanto il pericolo di un'apertura indesiderata, quanto il possibile accumularsi di tensioni all'interno della lega a memoria di forma. Infatti, una volta raggiunta la A_s , hanno inizio la trasformazione ed il recupero della forma, ma essendo la *tape spring* bloccata, essa accumulerà le relative tensioni di trasformazione.

Per questi motivi si è soliti scegliere una lega a memoria di forma con una temperatura d'inizio austenite A_s superiore alla massima temperatura operativa del dispositivo.

Considerando anche il processo di riscaldamento che si rende necessario per l'attivazione della SMA, si potrebbe utilizzare, come in [71], un riscaldatore flessibile da applicare direttamente all'elemento SMA. Come già notato nel capitolo 2 il riscaldamento per effetto Joule sembra essere il più idoneo per questi scopi. Riprendendo la Fig. 6-47, si vede che l'andamento crescente della temperatura della lega dimostra come la corrente direttamente applicata causi un riscaldamento per effetto Joule. Inoltre, si osserva una differenza di

temperatura tra la SMA e la superficie in CFRP e ciò indica che la corrente elettrica scorre maggiormente attraverso la SMA.

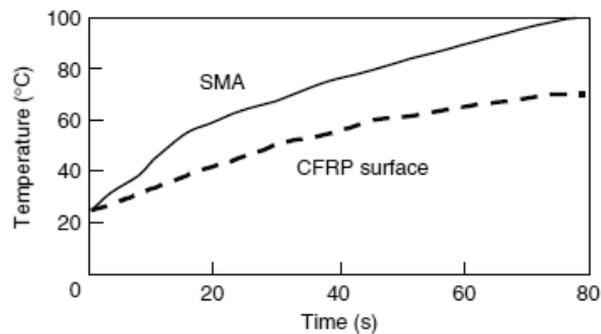


Fig. 6-49 Andamento della temperatura a causa del passaggio di corrente elettrica [21].

6.3. Conclusioni

Dalle analisi effettuate si può quindi trarre le seguenti conclusioni:

- l'inserimento di un elemento a memoria di forma permette di raggiungere maggiori valori della rigidità di *deployment* e della coppia di *deployment*;
- per il caso di piegatura *opposite sense*, la posizione dell'elemento in SMA che porta ai maggiori valori di rigidità di dispiegamento è quella che prevede l'inserimento nella parte esterna della *tape spring*;
- per quanto riguarda lo spessore, esso deve assumere un valore tale da garantire che il momento plastico della SMA risulti maggiore del momento medio di dispiegamento della sola *tape spring*;
- a parità di materiale e di dimensioni, uno spessore maggiore garantisce una maggiore rigidità di *deployment*;
- costruendo un laminato in CFRP con inserito un elemento di lega a memoria di forma permette il raggiungimento di rigidità maggiori rispetto al caso di un singolo strato di CFRP;
- la presenza di imperfezioni comporta una piegatura non simmetrica; se l'entità è piccola e il difetto è localizzato, i valori caratteristici della *tape spring* non vengono influenzati;
- un'applicazione non simmetrica o eccentrica dei carichi comporta una piegatura decentrata o perfino una configurazione deformata totalmente errata.

Dopo le considerazioni fatte su come le SMA possano aumentare rigidità e momento di *deployment* di una *tape spring*, si pone l'attenzione soprattutto sulla loro capacità di eliminare le instabilità di *latch-up* consentendo così un dispiegamento quasi statico e non più dinamico.

Infatti, una rigidità di *deployment* troppo elevata potrebbe portare a un eccessivo valore dell'energia cinetica con conseguente dispiegamento disastroso in termini di instabilità di blocco. Solitamente, dunque, si cerca un compromesso tra i requisiti di elevata rigidità e

minimi fenomeni di *latch-up*. Come già detto, l'impiego delle leghe a memoria di forma permette di ottenere contemporaneamente questi due requisiti.

L'elevata rigidità è stata dimostrata dalle analisi eseguite, mentre per il comportamento dinamico instabile è trattato basandosi sullo studio svolto in [71].

In letteratura si trovano ben pochi esempi di simulazioni numeriche del fenomeno di dispiegamento di una *tape spring* con inserti in SMA; nella maggior parte dei casi, gli studi di tale comportamento si basa sui dati raccolti da prove sperimentali. Ciò è dovuto alla complessità di base del fenomeno di semplice *deployment* (analisi dinamiche onerose), a cui si aggiunge quella del riscaldamento, con i svariati parametri che lo influenzano (tipologia di scambio termico con l'ambiente e con il composito, analisi termica tempovariante, ecc.).

Si considera dunque come riferimento lo studio condotto in [71]. Le prove eseguite per la valutazione del comportamento dinamico nel momento del blocco prevedono che la *tape spring* sia mantenuta nella configurazione piegata mediante un dispositivo di bloccaggio comprensivo di un filo di acciaio che, una volta tagliato, consente il dispiegamento. Hanno testato sia un campione senza SMA sia uno con SMA. Nel primo caso, hanno osservato che il dispiegamento avviene in un intervallo di 1 [s] con evidenti effetti dinamici al momento del blocco nella posizione dispiegata. Inoltre, a fine processo, nella zona di piegatura hanno rilevato un cedimento del materiale. Per eludere questo inconveniente si dovrebbe adottare una soluzione di progetto che diminuisca la rigidità di *deployment*, dovendo quindi trovare un compromesso, che però si vorrebbe evitare. Nel caso invece del dispositivo con lo smorzatore in SMA, la durata del processo è dell'ordine di 82.2 [s], avviene in modo quasi-statico, senza oltretutto dimostrare snervamento del materiale. Inoltre non sono state osservate corse della *tape spring* oltre la posizione piana dispiegata (*over-travel*).

In Fig. 6-48 si riporta il grafico degli spettri di risposta ricavato in [71] per entrambe le situazioni studiate. La curva rettilinea è rappresentativa del valore di soglia che, se superato, indica una condizione di shock alquanto severa. Si osserva come nel caso di *tape spring hinge* senza smorzatore SMA vi sia un intervallo di frequenze in cui viene superata la soglia, a differenza invece dell'altro caso dove ogni componente dello spettro si mantiene al di sotto della stessa.

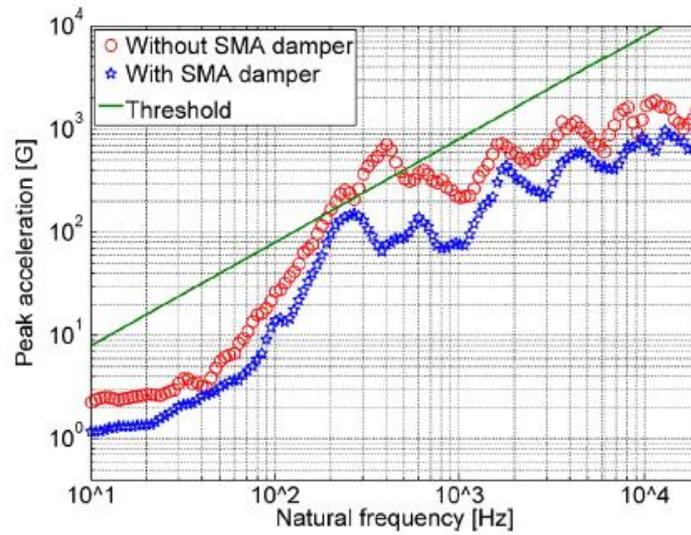


Fig. 6-50 Spettri di risposta con riferimento di soglia [71].

Concludendo, si può quindi affermare che le leghe a memoria di forma presentano un'ottima soluzione per la realizzazione delle *tape spring* in quanto permettono di raggiungere contemporaneamente i requisiti funzionali di elevata rigidezza di *deployment*, elevata coppia di dispiegamento e assenza di fenomeni dinamici instabili nella fase di blocco.

7. CONCLUSIONI

Il tema principale della presente tesi riguarda gli *SMART materials*, quale speciale categoria di materiali capaci di soddisfare simultaneamente requisiti strutturali e funzionali.

Nella prima parte è stata presentata una panoramica sulla molteplicità di materiali che appartengono a questo gruppo, presentandone una classificazione:

- leghe a memoria di forma (SMAs);
- polimeri a memoria di forma (SMPs);
- materiali ibridi a memoria di forma;
- polimeri elettroattivi (EAPs);
- ceramiche a memoria di forma (SMCs);
- metamateriali.

Sottolineando gli aspetti caratteristici e le proprietà uniche di cui godono queste categorie, si sono elencate le principali applicazioni nei diversi settori: aerospaziale ed aeronautico, medico, automobilistico, degli attuatori, civile, ecc.

Le loro potenzialità, unite ai vantaggi, rendono questi materiali delle ottime soluzioni in sistemi dove vi sia la necessità di svolgere più funzioni simultaneamente: strutturali e funzionali, di sensori e di attuazione, di sensori e di controllo, ecc.

Si è potuto constatare come vi sia una vastissima letteratura che si occupa di questa tipologia di materiali, ma che ancora molta ricerca deve essere fatta per colmare alcune lacune, dovute anche al loro recente sviluppo.

Oltre ad una maggiore conoscenza delle proprietà fisiche, meccaniche e chimiche, particolare attenzione andrà posta sulla formulazione di modelli costitutivi adatti e completi per offrire una caratterizzazione esauriente dei vari materiali.

Aspetto da tenere in considerazione è sicuramente quello legato alla modellazione. Nel processo di sviluppo di un prodotto, lo step delle simulazioni sta avendo sempre più rilievo e importanza. Affinché i risultati ottenuti da queste analisi siano accurati e affidabili, i modelli costitutivi devono essere il più possibile esaurienti e realistici.

Per i materiali *SMART* inoltre, si richiede una più chiara classificazione, che a oggi è alquanto contrastante ed in certi casi ambigua.

Si rendono dunque necessarie delle regole di unificazione e standardizzazione che permettano a questi materiali di raggiungere, con il tempo, il grado di affidabilità e conoscenza dei materiali tradizionali. A differenza di questi ultimi, per gli *SMART materials* non vi è un'esperienza consolidata nella progettazione e si devono sviluppare anche tutta una serie di prove sperimentali per ottenere un database di informazioni adeguato. Inoltre, parte della ricerca dovrà focalizzarsi sull'incremento delle conoscenze riguardanti l'affidabilità e la durabilità, fattori strettamente legati alla vita e alla manutenzione di un componente.

L'inserimento di materiali "nuovi" comporta sfide non indifferenti anche a livello di progettazione. Gli elementi che originariamente sono realizzati con materiali tradizionali non possono essere riprogettati nello stesso modo e con gli stessi parametri se invece si vogliono impiegare i materiali *SMART*. Particolari accorgimenti e specifiche procedure di progettazione devono essere affinate e consolidate per garantire una corretta realizzazione dei componenti.

Per la risoluzione di tali aspetti critici è richiesto ancora un intenso studio con lo scopo di uniformare e unificare i dati, le prove, la nomenclatura ed i criteri di fallimento e rottura.

Nell'ambito della ricerca non mancano quindi le idee per realizzare dispositivi con materiali *SMART*, ma si presentano diversi problemi per renderli poi commerciabili. Il coinvolgimento di personale esperto nel marketing è un altro punto chiave per rendere tali applicazioni adatte al mercato commerciale, utilizzando diverse strategie e approcci.

Un altro aspetto importante riguarda la necessità di realizzare una piattaforma informativa che possa rendere disponibili tutte le conoscenze di cui un esperto può aver bisogno per la progettazione di un sistema che implichi l'utilizzo di un materiale *SMART*. Ciò sarà possibile solo attraverso una forte interdisciplinarietà e un continuo dialogo tra esperti dei vari settori coinvolti. Inoltre, ciò sarebbe di fondamentale importanza per ridurre i costi e i tempi di sviluppo, minimizzando il rischio di produrre prodotti non idonei e identificando efficacemente le potenziali applicazioni analizzando i brevetti esistenti.

Le tendenze future sugli *SMART materials* riguardano inoltre lo sviluppo sia nuovi materiali che di combinazioni delle varie funzione che possono svolgere, assieme anche alla ricerca di nuovi mercati.

Ad oggi le applicazioni più diffuse riguardano settori alquanto di nicchia a causa anche degli elevati costi che implica l'utilizzo dei materiali *SMART*. Con una crescente diffusione di tali materiali, i costi potranno diminuire, rendendoli più accessibili anche per settori più comuni e commerciali.

Infine, nell'ultima parte della tesi si è illustrata una particolare applicazione delle leghe a memoria di forma nelle *tape spring*.

Mediante l'uso dei software MSC Patran, MSC Nastran e MSC Marc sono state eseguite delle analisi agli elementi finiti per studiare il comportamento di una *tape spring* quando in essa viene aggiunto un elemento in SMA.

Presentando i risultati ottenuti dalle simulazioni, si è osservato come l'impiego di componenti in SMAs in una *tape spring*, sfruttando l'effetto a memoria di forma, permetta il raggiungimento dei tre requisiti funzionali fondamentali, senza ricorrere ad una soluzione di compromesso:

- elevata rigidità di *deployment*;
- elevata coppia di *deployment*;
- minimi effetti dinamici di blocco.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] **Jani, J. M., Leary M., Subic A., Gibson M. A.**, A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities. *Materials and Design* (2013), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>.
- [2] **Sun L., Huang W. M., Ding Z., Zhao Y., Wangb C. C., Purnawali H., Tang C.**, Stimulus-responsive shape memory materials: A review. *Materials and Design*, Vol. 33, p. 577-640, 2012.
- [3] **Ölander A.**, An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys. *America Chemical Society*, 54, p. 3819-3833, 1932.
- [4] **Greninger A. B., Mooradian V. G.**, Strain Transformation in Metastable Beta Copper-Zinc and Beta Copper-Ti Alloys. *AIME TRANS*, 128, p. 337-369, 1938.
- [5] **Vernon L. B., Vernon H. M.**, Process of manufacturing articles of thermoplastic synthetic resins. US Patent 2234993, 1941.
- [6] **Kurdjumov G. V., Khandros L. G.**, First reports of the thermoelastic behaviour of the martensitic phase of Au-Cd alloys. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 66, p. 211-213, 1949.
- [7] **Chang L. C., Read T. A.**, Behavior of the elastic properties of AuCd. *Trans Met Soc AIME*, 191, p.47, 1951.
- [8] **Kauffman G., Mayo I.**, The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications. *Chem Educator*, 2, p. 1-21, 1997.
- [9] **McWilliams A.**, Smart Materials and Their Applications: Technologies and Global Markets. *BCC research Advanced Materials Report*, 161. 2011.
- [10] **Pinzoni L., Sala G., Airoidi A.**, Progetto di un rivestimento flessibile attuato per strutture con capacità di variazione di forma. Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria Industriale, Corso di Laurea in Ingegneria Aeronautica, A. A. 2012-2013.
- [11] **Lagoudas D. C.**, Shape Memory Alloys. Modelling and Engineering Applications. Ed. Springer, 2008.
- [12] **Hart D. J., Lagoudas D. C.**, Aerospace applications of shape memory alloys. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, p. 221-535, 2007.
- [13] **Ma J., Karaman I., Noebe R.**, High temperature shape memory alloys. *International Materials Reviews*, 55, p. 257-315, 2010.
- [14] **Weimin Huang**, Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures. University of Cambridge, Department of Engineering, 1998.

- [15] **Sofla A. Y. N., Meguid S. A., Tan K. T., Yeo W. K.**, Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges. *Materials & Design*, 31, p. 1284-1292, 2010.
- [16] **Pellegrino S., Green C., Guest S. D., Watt A.**, SAR Advanced Deployable Structure. Technical Report, Cambridge University, Engineering Department. CUED/D-STRUCT/TR191. 18 novembre 2000.
- [17] **Peffer A., Denoyer K., Fosness E., Sciulli D.**, Development and transition of low-shock spacecraft release devices. *Aerospace Conference Proceedings, 2000 IEEE*, Vol. 4, p. 277-284, 2000.
- [18] **Fragnito M., Vetrella S.**, A space release/deployment system actuated by shape memory wires. *Acta Astronautica*, Vol. 51, No. 11, p. 761-770, 2002.
- [19] **Carpenter B., Lyons J.**, Lightweight Flexible Solar Array Experiment Summary.
- [20] **Puig L., Barton A., Rando N.**, A review on large deployable structures for astrophysics missions. *Acta Astronautica*, No. 67, p. 12-26, 2008.
- [21] **Todoroki A., Kumagai K., Matsuzaki R.**, Self-deployable Space Structure using Partially Flexible CFRP with SMA Wires. *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 20, p. 1415-1424, August 2009.
- [22] **Stirling L., Yu C.-H., Miller J., Hawkes E., Wood R., Goldfield E., et al.**, Applicability of shape memory alloy wire for an active, soft orthotic. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20, p. 658-662, 2011.
- [23] **Motaharia S. A., Ghassemieha M., Abolmaalib S. A.**, Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations. *Journal of Constructional Steel Research*, No. 63, p. 1570-1579, 2007.
- [24] **Bernal Barbero L. I.**, Cyclic Behavior of Superelastic Nickel-Titanium and Nickel-Titanium-Chromium Shape Memory Alloys. Georgia Institute of Technology, 2004.
- [25] **Turner Travis L., Lach Cynthia L., Cano Roberto J.**, Fabrication and characterization of SMA hybrid composites. SPIE 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. Active Materials: Behavior and Mechanics, C. S. Lynch (Editor), SPIE Vol. 4333, Paper No. 4333-60, Newport Beach, CA, 4-8 March 2001.
- [26] **Turner T. L.**, Thermomechanical Response of Shape Memory Alloy Hybrid Composites, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [27] **Turner T. L.**, Thermomechanical Response of Shape Memory Alloy Hybrid Composites, NASA/TM-2001-210656, 2001.
- [28] **Turner T. L.**, A New Thermoelastic Model for Analysis of Shape Memory Alloy Hybrid Composites. *J. of Intell. Matl. Sys. & Stru.*, 2001.

- [29] **Turner T. L.**, Experimental Validation of a Thermoelastic Model for SMA Hybrid Composites. *Smart Structures and Materials 2001; Modeling, Signal Processing, and Control in Smart Structures*, SPIE Vol. 4326, Paper No. 4326-24, Newport Beach, CA, 2001.
- [30] **Turner Travis L., Hemant D.**, Analysis of SMA hybrid composite structures using commercial codes. *Smart Structures and Materials: Modelling, Signal Processing and Control, Proc. SPIE* Vol. 5383, Paper No. 12, San Diego, 2004.
- [31] **Mosele A., Bellin L.**, Modellazione di un laminato composito con inserite all'interno delle fibre lunghe in SMA (Shape Memory Alloy). Tesina, Laboratorio di strutture aerospaziali, A. A. 2011/2012.
- [32] **Auricchio F., Taylor R. L.**, Shape-memory alloy: modeling and numerical simulations of the finite-strain superelastic behavior, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 143, p. 175-194, 1997.
- [33] **Auricchio F.**, A robust integration-algorithm for a finite-strain shape-memory-alloy superelastic model, *International Journal of Plasticity*, Vol. 17, p. 971-990, 2001.
- [34] Marc[®] 2013. Vol. A-E. MSC Software.
- [35] **Harper Meng, Guoqiang Li**, A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites. *Polymer*, No. 54, p. 2199-2221, 2013.
- [36] **Jinlian Hu, Yong Zhu, Huahua Huang, Jing Lu**, Recent advances in shape-memory polymers: Structure, mechanism, functionality, modeling and applications. *Progress in Polymer Science*, No. 37, p. 1720-1763, 2012.
- [37] **Byung-Koog Jang, Teruo Kishi**, Thermomechanical response of TiNi fiber-impregnated CFRP composites. *Materials Letters*, No. 59, p. 2472-2475, 2005.
- [38] **Hu J. L., Chen S. J.**, A review of actively moving polymers in textile applications. *Journal of Materials Chemistry*, No. 20, p. 3346-3355, 2010.
- [39] **Gopi M., Ravi Kumar P., Sravanth P., Aravind S.**, Shape memory polymers.
- [40] **Santo L., Quadrini F., Mascetti G., Dolce F., Zolesi V.**, Mission STS-134: Results of Shape Memory Foam Experiment. *Acta Astronautica*, No. 91, p. 333-340, 2013.
- [41] Lightweight shape memory self-deployable structures for gossamer applications. *45th AIAA Structures, structural dynamics and materials conference. Gossamer spacecraft forum*. Palm Spring CA.
- [42] **Francis W. H., Lake M. S., Schultz M. R., Campbell D.**, Elastic Memory Composite Microbuckling Mechanics: Closed-Form Model with Empirical Correlation. *Multifunctional Materials and Devices II*, 2008.
- [43] **Campbell D., Rory, Barrett, Lake M. S., Adams L., Abramson E.**, Development of a Novel, Passively Deployed Roll-Out Solar Array Composite Technology. 2006.

- [44] **Ryan D., Siskind, Ralph C. Smith**, Model Development for Shape Memory Polymers. Department of Mathematics, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695.
- [45] **Rogers C. A., Robertshaw H. H.**, Shape Memory Alloy Reinforced Composites. *Engineering Science Preprints 25*, Society of Engineering Science, Inc., ESP25.8027, 1988.
- [46] **Gao X., Burton D., Turner Travis L., Brinson L. Catherine**, Finite Element Analysis of Adaptive-stiffening and Shape-control SMA Hybrid Composites. *Proc. SPIE 5761, Smart Structures and Materials 2005: Active Materials: Behavior and Mechanics*, 406, 2005.
- [47] **Turner Travis L.**, Analysis of SMA Hybrid Composite Structures in MSC.Nastran and ABAQUS.
- [48] **Turner Travis L.**, Input Files and Procedures for Analysis of SMA Hybrid Composite Beams in MSC.Nastran and ABAQUS. 2005.
- [49] **Ghosh P., Rao A., Srinivasa Arun R.**, Design of multi-state and smart-bias components using Shape Memory Alloy and Shape Memory Polymer composites. *Materials and Design*, No. 44, p. 164-171, 2013.
- [50] **Yoseph Bar-Cohen**, Electro-active polymers: current capabilities and challenges. *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium, EAPAD Conference*, Paper 4695-02, San Diego, CA, 2002.
- [51] **Buttolo M.** I polimeri elettroattivi e loro utilizzo nei muscoli artificiali.
- [52] **Pirc M., Čopič M., Petelin A.**, Nematic elastomer actuators. *Seminar*, Lubiana, 2012.
- [53] **Xiaoqi Bao¹, Yoseph Bar-Cohen, Zensheu Chang, Stewart Sherrit**, Numerical modeling of single-layer electroactive polymer mirrors for space applications. *Proceedings of the SPIE's EAPAD Conf., Smart Structures Symp.*, Paper 5051-45, San Diego, CA, 2003.
- [54] **Hasnat Kabir M., Jin Gong, Yosuke Watanabe, Masato Makino, Hidemitsu Furukawa**, Hard-to-soft transition of transparent shape memory gels and the first observation of their critical temperature studied with scanning microscopic light scattering. *Materials Letters*, No. 108, p. 239-242, 2013.
- [55] **Alan Lai, Zehui Du, Chee Lip Gan, Christopher A. Schuh**, Shape Memory and Superelastic Ceramics at Small Scales. *SCIENCE*, Vol. 341, p. 1505-1508, 27 settembre 2013.
- [56] **Walser R. M.**, Introduction to Complex Mediums for Electromagnetics and Optics. W.S. Weiglhofer and A. Lakhtakia (Eds.), *SPIE Press*, Bellingham, WA, USA, 2003.
- [57] **Wood B.**, Metamaterials and invisibility. *C. R. Physique*, No. 10, p. 379-390, 2009.
- [58] Marc[®] and Mentat[®] 2013, Release Guide. MSC Software.
- [59] Marc[®] 2013, User's Guide. MSC Software.

- [60] MCS Nastran[®] 2012, Implicit Nonlinear (SOL 600) User's Guide. MSC Software.
- [61] MCS Nastran[®] 2012, Quick Reference Guide. MSC Software.
- [62] MSC Patran[®] 2012, Release Guide. MSC Software.
- [63] **Yee J. C. H., Soykasap O., Pellegrino S.**, Carbon Fibre Reinforced Plastics Tape Springs. *Proceedings from 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference*, 19-22 April 2004.
- [64] **Soykasap Ö.**, Deployment analysis of a self-deployable composite boom. *Composite Structures*, No 20, p. 374-981, 2009.
- [65] **Kwok K., Pellegrino S.**, Folding, stowage, and deployment of viscoelastic tape springs. *AIAA Journal*, Vol. 51, No. 8, p. 1908-1918, Agosto 2013.
- [66] **Seffen K. A., Pellegrino S.**, Deployment of a Rigid Panel by Tape Springs. 1997.
- [67] **Kwok K., Pellegrino S.**, Viscoelastic Effects in Tape-Springs. California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125. 2011.
- [68] **Ligustri A., Zaccariotto M.**, Studio del deployment di Tape-Spring realizzate in CFRP. Tesi di laurea, Università degli studi di Padova, Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale, A. A. 2011/2012.
- [69] **Soykasap Ö.**, Analysis of tape spring hinges. *International Journal of Mechanical Sciences*, No 49, p. 853–860, 2007.
- [70] **Marc R. Schultz, Michael J. Hulse, Philip N. Keller, Dana Turse**, Neutrally stable behavior in fiber-reinforced composite tape springs. *Composites, Part A* 39, p. 1012–1017, 2008.
- [71] **Ju Won Jeong, Young Ik Yoo, Dong Kil Shin, Jae Hyuk Lim, Kyung Won Kim, Jung Ju Lee**, A novel tape spring hinge mechanism for quasi-static deployment of a satellite deployable using shape memory alloy. *Review of Scientific Instruments* 85, 025001, 2014.
- [72] **Carpenter B., Lyons J.**, EO-1 Technology Validation Report: lightweight flexible solar array experiment, Technical Report, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 2001.

SITOGRAFIA

<http://ndea.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/aa-hp.htm>

<http://wikipedia.com>

<http://mscsoftware.com>

<http://sciencedirect.com>

<http://engineeringvillage.com>

<http://researchgate.net>