

**POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in  
Ingegneria Meccanica



## Leghe SMA per applicazioni biomimetiche

Relatore: Prof. Gaetano CASCINI

Correlatore: Prof. Edoardo Giovanni Maria ROVIDA

Tesi di Laurea di:

Marco Piana Matr. 755557

Anno Accademico 2011 - 2012

# Indice Generale:

<b>1.</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>8</b>
<b>2.</b>	<b>LA BIOMIMETICA .....</b>	<b>9</b>
2.1.	Definizione e cenni storici .....	9
2.2.	Applicazioni biomimetiche .....	10
2.3.	Asknature.org e biomimicry taxonomy.....	17
<b>3.</b>	<b>LEGHE A MEMORIA DI FORMA (SHAPE MEMORY ALLOY) ...</b>	<b>19</b>
3.1.	Definizione e cenni storici .....	19
3.2.	Metallurgia delle leghe Shape Memory Alloy .....	21
3.3.	Caratteristiche del Nitinol .....	22
3.4.	Effetto memoria di forma monodirezionale, bidirezionale ed educazione.....	24
3.5.	Effetto superelastico.....	28
3.6.	Applicazioni SMA .....	30
3.6.1.	Applicazioni biomediche.....	30
3.6.2.	Applicazioni di fissaggio e giuntura.....	32
3.6.3.	Applicazioni per attuatori.....	33
3.6.4.	Applicazioni per il controllo di temperature e flussi.....	34
3.6.5.	Applicazioni per sistemi di sicurezza.....	35
3.6.6.	Applicazioni aerospaziali .....	36
<b>4.</b>	<b>BIOMIMICRY E SHALL MEMORY ALLOY .....</b>	<b>37</b>

---

4.1.	SMA per applicazione ispirata al pipistrello.....	37
4.2.	SMA per applicazioni ispirate al movimento dei pesci.....	41
4.3.	SMA per applicazioni ispirate al lombrico .....	45
4.4.	SMA per applicazioni ispirate alle ventose .....	48
4.5.	SMA per applicazione ispirata alla medusa.....	50
4.6.	SMA per applicazioni ispirate allo scarafaggio .....	52
4.6.1.	SMA per controllo rigidità.....	52
4.6.2.	SMA per movimentazione robot.....	53
4.7.	SMA per applicazione ispirata alla colonna vertebrale.....	54
<b>5.</b>	<b>APPLICAZIONI SMA E BIOMIMICRY TAXONOMY.....</b>	<b>55</b>
5.1.	Applicazione ispirata al pipistrello .....	55
5.2.	Applicazioni ispirate al movimento dei pesci .....	62
5.3.	Applicazioni ispirate al lombrico.....	64
5.4.	Applicazione ispirata alle ventose del polipo. ....	66
5.5.	Applicazione ispirata alla medusa .....	67
5.6.	Applicazioni ispirate allo scarafaggio.....	68
5.7.	Applicazione ispirata alla colonna vertebrale .....	69
<b>6.</b>	<b>RICERCA BIOMIMETICA PER APPLICAZIONI SMA INNOVATIVE.....</b>	<b>70</b>
6.1.	Campi della tassonomia eliminabili a priori .....	71
6.2.	Metodo di ricerca per applicazioni SMA bioispirate.....	75
6.3.	Esempio di ricerca non proficuo.....	76
6.4.	Esempi di ricerca di soluzioni SMA bioispirate.....	79
6.4.1.	Ricerca in "Get, store, or distribute resources" .....	80
6.4.2.	Ricerca in " Modify".....	82

6.4.3.	Ricerca in " Maintain phisical integrity" .....	83
6.4.4.	Ricerca in "Move or stay put" .....	89
6.5.	Elenco delle potenziali bioispirazioni individuate.....	92
6.6.	Diagrammi di flusso .....	93
<b>7.</b>	<b>SCELTA E SVILUPPO GRAFICO DI DUE SOLUZIONI</b>	
	<b>BIOISPIRATE.....</b>	<b>94</b>
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>100</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA:.....</b>	<b>102</b>

## Elenco delle Figure:

Figura 1: funzionamento del VELCRO® .....	9
Figura 2: acqua che rimane in gocce sul loto .....	11
Figura 3: effetto loto con ingrandimento .....	11
Figura 4: dalla macrostruttura alla nanostruttura del polpastrello del gecko .....	12
Figura 5: cornea artificiale .....	13
Figura 6: tana delle termiti e relativo palazzo bio-ispirato .....	14
Figura 7: copertura ispirata alle conifere .....	14
Figura 8: pellicola Fastskin® shark-inspired .....	15
Figura 9: gufo comune in volo .....	15
Figura 10: Particolare finale frastagliato dell'ala .....	16
Figura 11: struttura a sandwich con honeycomb .....	16
Figura 12: schema a livelli Asknature.org .....	18
Figura 13: biomimicry taxonomy con schema a mezza luna .....	19
Figura 14: leghe a memoria di forma .....	20
Figura 15: tabella comparativa Nitinol vs acciaio inox .....	21
Figura 16: diagramma di fase della lega Ni-Ti .....	22
Figura 17: deformazione permanente e reversibile .....	23
Figura 18: possibili varianti cristallografiche della martensite .....	24
Figura 19: %fase martensitica su temperatura .....	25
Figura 20: effetto di memoria a una via .....	26
Figura 21: effetto di memoria a due vie .....	26
Figura 22: imposizione forma molla elicoidale a un filo Ni-Ti .....	27
Figura 23: funzionamento molla sma monodirezionale .....	28
Figura 24: effetto superelastico o pseudoelastico .....	29
Figura 25: stent in lega a memoria di forma .....	31
Figura 26: filo sma per apparecchi ortodontici .....	31
Figura 27: giunto Sma per tubi .....	32
Figura 28: attuatore elettrico classico .....	33
Figura 29: Attuatore con molla Sma .....	33
Figura 30: dispositivi antisismici FIP .....	35
Figura 31: Intervento sulla cattedrale di Foligno .....	36
Figura 32: MAV a quattro eliche .....	38
Figura 33: MAV per impiego militare .....	38
Figura 34: dal pipistrello al batmav .....	39
Figura 35: particolare ala del Batmav .....	40
Figura 36: applicazione che imita la pinna caudale dello sgombro .....	42
Figura 37: pinna caudale con SMA wires .....	43
Figura 38: metodo per curvare la pinna caudale .....	44
Figura 39: sezione della parte movimentata .....	44
Figura 40: sezione movimentata installata alla metà fissa .....	45
Figura 41: a)stato iniziale, b)stato ritratto, c)stato elongato, d)nuovo stato ritratto .....	46
Figura 42: applicazione pratica lunghezza totale 5cm .....	47
Figura 43: singolo modulo del lombrico .....	47
Figura 44: tentacolo del polipo con ventose .....	48
Figura 45: principio di funzionamento della suzione .....	49
Figura 46: sistema di suzione con SMA a una via .....	49

Figura 47: sistema di suzione con SMA a due vie .....	50
Figura 48: movimento della medusa .....	50
Figura 49: soluzione della medusa con fili SMA in parallelo .....	51
Figura 50: soluzione della medusa con fili SMA in serie.....	51
Figura 51: robot esapode Rhex .....	52
Figura 52: SMA wires per controllo rigidità.....	53
Figura 53: robot ispirato allo scarafaggio .....	53
Figura 54: struttura bioispirata alla colonna vertebrale .....	54
Figura 55: ricerca movimento in aria .....	56
Figura 56: ricerca metodo di volo per piccoli volatili .....	57
Figura 57: pipistrello nella biomimicry taxonomy .....	58
Figura 58: sottofunzione del muscolo nella tassonomia.....	59
Figura 59: Ulteriore catalogazione della funzione del muscolo .....	60
Figura 60: funzione dell'articolazione nella tassonomia.....	61
Figura 61: sottofunzione dell'articolazione nella tassonomia .....	61
Figura 62: ulteriore catalogazione dell'articolazione.....	62
Figura 63: movimento in liquido sulla tassonomia .....	63
Figura 64: soluzione generica del movimento dei pesci.....	64
Figura 65: prima classificazione del movimento del lombrico .....	65
Figura 66: seconda classificazione del movimento del lombrico .....	65
Figura 67: catalogazione della suzione del polipo .....	66
Figura 68: catalogazione del movimento della medusa.....	67
Figura 69: catalogazione zampe scarafaggio .....	68
Figura 70: catalogazione della funzione variare le rigidità.....	69
Figura 71: catalogazione della flessibilità-robustezza della colonna vertebrale.....	69
Figura 72: Eliminazione di campi nella biomimicry taxonomy .....	74
Figura 73: prima ricerca per applicazioni SMA.....	76
Figura 74: strategie potenzialmente interessanti in "disperse sed" .....	77
Figura 75: soluzione individuata: Banksia.....	78
Figura 76: soluzione del gamberetto mantide per accumulo energia .....	80
Figura 77: soluzione bushbaby per accumulo energia .....	81
Figura 78: soluzione della filaree per accumulo energia .....	82
Figura 79: soluzione tela ragno per modificare caratteristiche materiale .....	83
Figura 80: funzione resistere agli impatti .....	84
Figura 81: soluzione dei felini per assorbimento degli urti .....	85
Figura 82: soluzione del riccio per assorbimento urti .....	86
Figura 83: strategia della salamandra per attutire urti .....	87
Figura 84: soluzione dei grandi mammiferi per impatti e tensioni .....	88
Figura 85: soluzione della cozza per resistere alla tensione .....	89
Figura 86: strategia della proboscide della farfalla .....	90
Figura 87: soluzione della larva per arrotolare temporaneamente .....	91
Figura 88: strategia di movimento del collembolo.....	91
Figura 89: diagramma di flusso della ricerca e catalogazione pubblicazioni .....	93
Figura 90: diagramma di flusso di ricerca bioispirazioni .....	94
Figura 91: sezione di tubo bioispirato prima indeformato.....	95
Figura 92: immagine del tubo deformato .....	96
Figura 93: sistema di assorbimento urti bioispirato .....	98
Figura 94: sezione dell'applicazione.....	98
Figura 95: diagramma isteresi stress-deformazione .....	99

## Sommario

Il seguente lavoro di tesi è incentrato sul metodo di ricerca di applicazioni bioispirate che sfruttano la tecnologia Shape Memory Alloy. I primi capitoli sono dedicati al concetto di Biomimetica e alle principali caratteristiche dei Materiali a memoria di forma, con una contestualizzazione a livello applicativo-industriale di entrambi. Vengono poi esposte tutte le pubblicazioni scientifiche individuate, che sfruttano le proprietà delle SMA per lo sviluppo di applicazioni bioispirate. Si ricostruisce *ex post* il procedimento utilizzato negli articoli per l'individuazione e lo sviluppo della bioispirazione. Si passa quindi alla catalogazione, seguendo i parametri imposti dalla biomimicry taxonomy proposta da Asknature.org, delle applicazioni oggetto di pubblicazione. La trattazione prosegue ricercando nella tassonomia tutte le potenziali bioispirazioni -sempre sfruttando il portale Asknature.org- che si basano sullo sfruttamento delle proprietà che contraddistinguono la lega Ni-Ti; si presta particolare attenzione all'utilizzo della tassonomia biomimetica e ai passi da seguire nel processo di ricerca di applicazioni bioispirate. Lo studio termina con una lista di tutte le soluzioni individuate e con un breve sviluppo grafico di due di esse.

**Parole chiave:** Biomimicry; Biomimicry Taxonomy; Shape Memory Alloy; SMA; Nitinol; Asknature.org.

# 1. Introduzione

Il presente lavoro di tesi s'inquadra in un ampio campo di studio quale è quello della progettazione "innovativa" intesa, come ricerca di soluzioni tecnologiche nuove e differenti volte allo svolgimento di una generica funzione.

Nel campo della progettazione si è spesso portati a legare una specifica soluzione tecnologica allo svolgimento di una funzione, cercando poi di ottimizzarne il funzionamento; la vera innovazione sta però nell'individuazione di una soluzione completamente nuova, che svolga pienamente la funzione riducendo le problematiche della tecnologia primitiva.

Per ottenere l'innovazione è spesso necessario che ci si liberi dell'inerzia psicologica, facendo cioè *tabula rasa* delle tecnologie già esistenti e tenendo come riferimento unicamente la funzione utile che vogliamo ottenere.

Nessuna innovazione però nasce dal nulla.

La scintilla di un'idea nuova spesso nasce da qualcosa che già esiste.

Si sono sviluppate negli anni teorie sulla progettazione inventiva, rivolte ad aiutare il lavoro del progettista fornendogli interdisciplinarietà e metodo: quest'ultimo è necessario per dare ordine e indirizzare gli studi, mentre l'interdisciplinarietà è fondamentale, in quanto ogni campo di studio - dalla storia con le sue tecnologie alla natura - può essere fonte di possibili soluzioni.

Proprio in questa direzione nascono TRIZ (1) e biomimetica.

Il primo, acronimo dal russo Teoria Resheiya Izbreatatelskikh Zadatch cioè "teoria per la soluzione dei problemi inventivi", vuole dare un metodo che aiuti il progettista a districarsi tra le possibili soluzioni inventive.

La biomimetica è invece un esempio dello scambio di conoscenze tra vari campi, con l'intento di ottenere soluzioni tecnologicamente molto innovative ispirandosi a ciò di più affinato che l'uomo conosca: la natura.

Il presente studio applica questo metodo di progettazione (la biomimetica) all'utilizzo di un materiale altamente innovativo (il NiTiNOL), alla ricerca di possibili nuove soluzioni tecnologiche, con il principale scopo di mostrare al lettore gli strumenti e le modalità da seguire per un metodo di progettazione inventiva.

Detto materiale appartiene al settore delle leghe a memoria di forma -SMA-: materiali metallici di varie composizioni in grado di avere deformazioni reversibili elevatissime -di ordini di grandezza superiori agli acciai- e capaci di una "memoria" di forma geometrica legata alla temperatura.



## 2. La biomimetica

### 2.1. Definizione e cenni storici

La biomimetica -biomimicry (2)- può essere definita come lo studio approfondito dei processi biologici che avvengono in natura, finalizzato all'individuazione di soluzioni tecnologiche per lo svolgimento di generiche funzioni utili alle attività dell'uomo. La natura -ma talvolta anche il patrimonio storico- possono, infatti, costituire un prezioso serbatoio d'idee e di possibili fonti di innovazione tecnologica.

La biomimetica è formalmente nata nel 1941 con la prima applicazione che l'ha consacrata a scienza nel 1959: il VELCRO® (3). Proprio questi diciotto anni che separano la nascita concettuale della biomimesi dalla sua prima applicazione sono serviti all'ingegnere svizzero George de Mestral per studiare una soluzione naturale e replicarla artificialmente; dando vita a un prodotto fortemente innovativo ed efficiente. Nel caso specifico la soluzione osservata è quella dei fiori di cardo che aderiscono alle fibre degli abiti indossati dall'inventore, il quale constatò quanto fosse forte il legame tra fiori e fibre, nonostante la ridottissima superficie a contatto. Fu la curiosità che lo portò a studiarne le caratteristiche fisiche e a cercare di replicarle, dando così vita alla progettazione biomimetica. Il fiore di cardo mostra -osservato al microscopio- sulla sua superficie alcune strutture naturali simili a numerosi uncini, piccoli ma molto robusti, capaci di legarsi alle fibre dei tessuti generando legami molto più forti di quanto ci si aspetterebbe da superfici così ridotte. Il nome stesso del prodotto VELCRO® deriva dall'unione delle parole francesi "velour" e "crochet": asola e uncino.

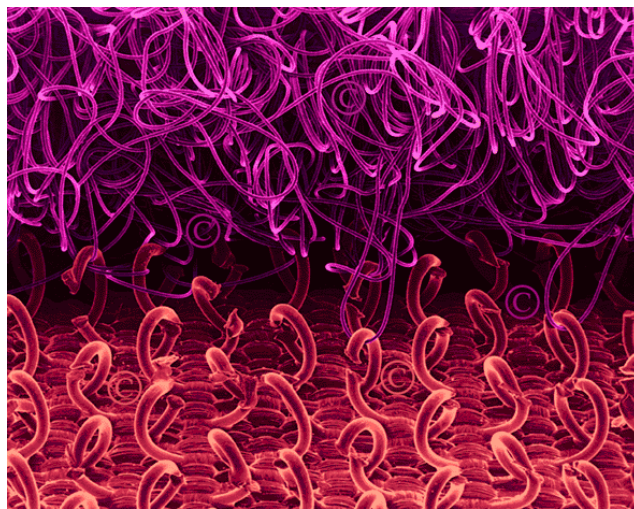


Figura 1: funzionamento del VELCRO®

L'importanza di questa *invenzione-scoperta* fu subito recepita sia dal mondo scientifico che industriale: la NASA usò questo metodo di fissaggio per le tute spaziali perchè molto semplice, affidabile e facilmente manovrabile, il settore commerciale recepì anch'esso in breve tempo tale soluzione poichè garantiva un ottimo risultato di tenuta con lavorazioni semplici e, sopra tutto, con un costo molto ridotto. Nella storia l'uomo ha spesso preso spunto dalla natura, ma è questa esperienza progettuale che ha gettato le basi per una teorizzazione del processo inventivo bio-ispirato; la novità metodologica sta nello studio interessato -sotto il profilo ingegneristico e non solo biologico- delle strategie che la natura ha creato e perfezionato in milioni di anni, quando cioè si ricerca un'applicazione che svolga una specifica funzione, si osserva come la natura svolge la funzione ricercata non tanto con un approccio puramente conoscitivo ma volto piuttosto all'eventualità di poterlo replicare artificialmente.

## 2.2. Applicazioni biomimetiche

La natura, procedendo in modo lento ma estremamente efficiente, secondo le leggi dell'evoluzione, è stata in grado di ottimizzare le strutture e microstrutture degli esseri viventi sulla base della specifica funzione o necessità alle quali esse sono deputate. Il processo biologico ha di fatto generato, tramite il processo evolutivo, creature capaci di svolgere diverse funzioni, grazie alle loro microstrutture ottimizzate ognuna per la sua specifica sottofunzione.

La realizzazione di una struttura o di un materiale sintetico che imiti una qualsiasi funzione naturale non può chiaramente seguire linearmente le regole dell'evoluzione naturale, ma dovrà, al contrario, seguire un processo di decodifica *ex post* consistente in tre fasi:

- individuazione all'interno del vastissimo "catalogo" di soluzioni naturali della soluzione più adatta ed efficace per il nostro problema tecnico.
- lo studio dei processi naturali che hanno determinato il costituirsi di una data struttura, con lo scopo della piena comprensione delle modalità di funzionamento del sistema naturale
- solo ora, svolte proficuamente le precedenti analisi, sarà possibile avviare la progettazione del sistema tecnico bio-inspired.

Le applicazioni della scienza biomimetica che utilizzano questa metodologia sono potenzialmente vastissime, estendendosi in svariati campi: dalla medicina alla chimica, dall'informatica a ogni branca dell'ingegneria.

In questa analisi si faranno solamente alcuni esempi di applicazioni in differenti campi per dimostrare l'efficacia e l'ampio respiro -in termini di campi tecnologici- propri della progettazione bio-ispirata.

Nella chimica industriale si è sempre alla ricerca di nuovi materiali con le più svariate funzioni. Il noto "effetto loto" ha portato alla creazione di una superficie autopulente.



**Figura 2: acqua che rimane in gocce sul loto**



**Figura 3: effetto loto con ingrandimento**

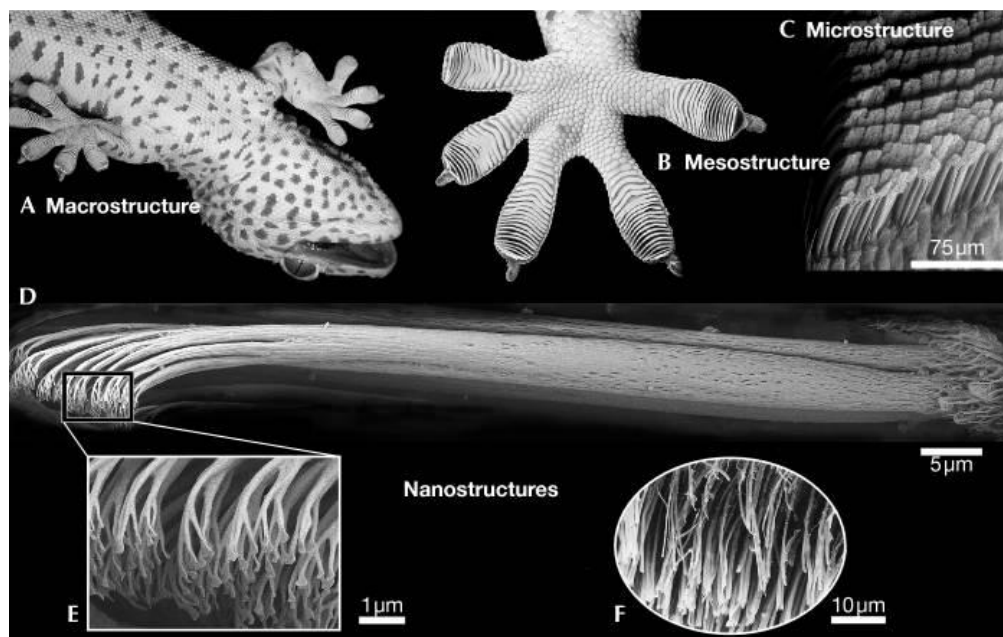
Gli studi affidati a una *equipe* di botanici hanno spiegato che sulle foglie del fiore di loto l'acqua non viene trattenuta ma, a causa dell'elevata tensione superficiale, scivola via in tante piccole gocce; materialmente la pianta è rivestita da cristalli di una cera idrofobica di dimensioni nanometriche. Si è così scoperto che le superfici ruvide sono più idrofobiche rispetto a quelle lisce - contrariamente a quanto comunemente si pensa-. A livello tecnologico ciò risulta replicabile grazie alle nano tecnologie (4), immergendo una lastra nell'idrossido e rivestendola successivamente di perfluoronano. Proprio negli ultimi anni la tedesca Basf ha creato uno spray (5), per idrofobizzare le superfici, che si ispira all'effetto loto.

Le zampe del gecko sono state oggetto di numerosi studi dopo l'osservazione delle sue capacità adesive su qualsiasi superficie senza la secrezione di sostanze

adesive. Recenti ricerche hanno dimostrato che le forze di adesione, che danno la possibilità a questi piccoli animali di sostenersi ovunque -con l'unica eccezione del teflon- anche con una sola zampa, sono interazioni di van der Waals. I suoi polpastrelli sono composti da numerosissime setole, con successive diramazioni, che portano a estremità piccolissime -0,2 micrometri- con una densità elevatissima -fino a 14100 setole  $mm^{-2}$ -. Una suola così strutturata potrebbe aderire ovunque anche in assenza di atmosfera.

Quando il polpastrello del rettile viene pressato, con un piccolo precarico, su una superficie verticale l'area di contatto massimizza le forze di van der Waals che s'instaurano a scala atomica fra i due materiali, mentre se viene tirato in direzione normale alla superficie ne restano in contatto solamente le estremità dei nanotubi, con un conseguente forte calo della forza adesiva e un distacco tra le superfici dovuto al peso dell'animale.

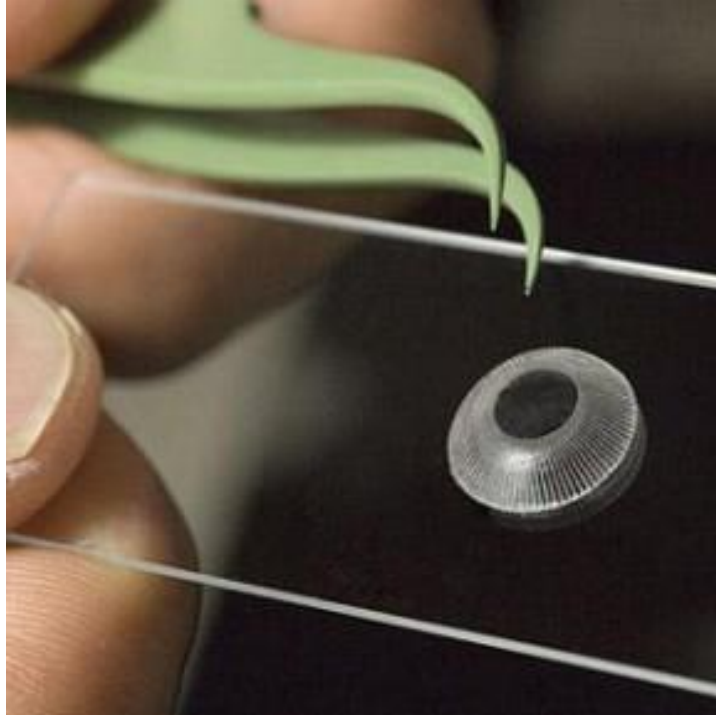
Il Georgia Institute of Technology (6) ha così prodotto un eccezionale adesivo direzionale che supera le stesse proprietà del materiale (7) che ha ispirato la ricerca, portando a forze adesive maggiori e superando anche l'unico limite del nostro gecko: l'adesione al teflon.



**Figura 4: dalla macrostruttura alla nanostruttura del polpastrello del gecko**

In ambito biomedico gli studi sono perlopiù rivolti alla ricerca di biomateriali: sostanze che siano il meno estranei possibili all'organismo. La loro composizione deve imitare le caratteristiche dei tessuti reali per evitare reazioni di rigetto. Tra le applicazioni più importanti si pensi agli studi per la creazione di un tessuto osseo artificiale, ma anche al "Duoptix" (8), il materiale

biomimetico, realizzato grazie a un progetto interdisciplinare tra ingegneria chimica e il dipartimento di oftalmologia, all'università di Stanford, in California, che potrà sostituire la cornea.



**Figura 5: cornea artificiale**

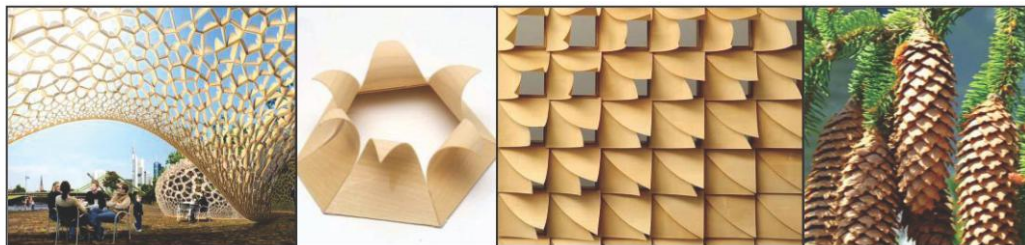
Anche nel campo dell'architettura, la scienza biomimetica è forte motore di innovazione, grazie a diverse soluzioni che possono e potranno essere imitate per costruire edifici sempre migliori. L'esempio (9) già esistente e più significativo in questo campo si trova in Zimbabwe dove l'architetto Mick Pearce ha progettato il primo edificio bio-ispirato alle tane delle termiti. Questi insetti costruiscono nidi di terra a forma di montagna attraversati da numerosi cunicoli. In queste tane cresce un fungo particolare che necessita una temperatura pressoché costante di  $29,5^{\circ}\text{C}$  in un ambiente caratterizzato però da uno sbalzo termico diurno di circa  $38^{\circ}\text{C}$  ( $2^{\circ}\text{C}$  durante la notte e fino a  $40^{\circ}\text{C}$  di giorno). In un tale ecosistema, solamente la tana delle termiti è in grado di garantire una tale performance in termini di mantenimento della temperatura senza alcun apporto energetico aggiuntivo. Nasce così il primo edificio con sistema termico completamente naturale (grazie a condotti dei quali si possono osservare le terminazioni sul tetto dell'edificio).





**Figura 6: tana delle termiti e relativo palazzo bio-ispirato**

Molto creativo il sistema di copertura ispirato alle conifere (10) che lascia passare la luce quando il tempo è ottimale; mentre, con l'aumento dell'umidità, si realizza la chiusura della struttura.



**Figura 7: copertura ispirata alle conifere**

Nel campo dell'aerodinamica e dell'attrito, in aria come in acqua, la natura ha sviluppato soluzioni molto efficaci che l'uomo sta cercando di studiare e replicare.

Animali marini molto veloci quali delfini e squali sono ampiamente studiati proprio perchè, sia la loro forma geometrica sia la loro pelle, garantiscono attriti molto ridotti rispetto a quanto ci si aspetterebbe; i biologi hanno mostrato come una pelle ruvida garantisca coefficienti di attrito minori rispetto a una liscia. Nell'ottica di un generale risparmio energetico, in un contesto di costi crescenti dei combustibili e di maggiore sensibilità ambientale, è ragionevole ritenere che sotto questo profilo si vedranno i maggiori investimenti e applicazioni.



**Figura 8: pellicola Fastskinz® shark-inspired**

Esiste, ed è già in produzione, una pellicola (11) da applicare alla carrozzeria delle auto che è ispirata proprio alla pelle ruvida di molti animali marini, che riducendo gli attriti tra la vettura in moto e l'aria, contribuisce alla riduzione dei consumi.

Un grande rapace, il gufo comune, è sotto osservazione per la nota silenziosità del suo volo: caratteristica datagli da due particolari specifiche dell'animale. Le sue ali hanno penne primarie separate dalle altre e piume con terminazioni frastagliate: ciò inibisce la formazione di rumorosi vortici. Gran parte del rumore rimanente viene assorbito dalle ali stesse che sono in grado di smorzare le onde sonore a 2000Hz prodotte dal rapace. Il risultato di questi accorgimenti è il volo più silenzioso che l'uomo conosca (12). In Inghilterra presso l'università di Southampton l'equipe del Professore di aeronautica Geoffrey Lilley (13), sta studiando possibili soluzioni applicabili ai veivoli.

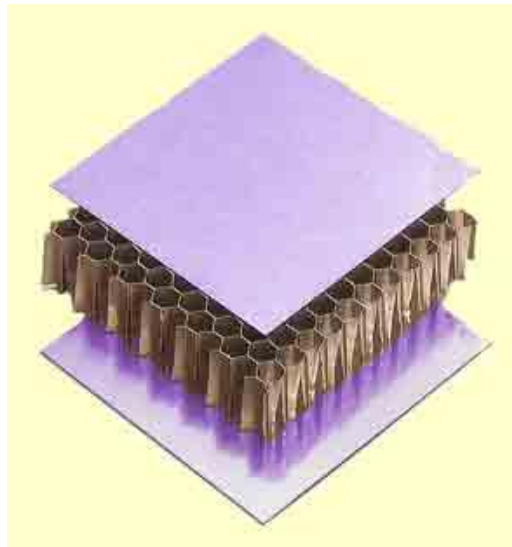


**Figura 9: gufo comune in volo**



**Figura 10: Particolare finale frastagliato dell'ala**

Non si può trascurare di citare l'honeycomb "inventato" dalle api: una struttura di celle esagonali sfasate, che garantisce una resistenza ottimale con un risparmio importante in termini di utilizzo di materiale e quindi anche di peso. Da ormai numerosi anni la struttura a nido d'ape viene usata come space-frame, cioè come la parte centrale e più resistente dei materiali compositi, chiamata struttura a sandwich.



**Figura 11: struttura a sandwich con honeycomb**

In questi paragrafi sono stati brevemente illustrati solo alcuni significativi esempi delle numerosissime applicazioni bioispirate che spaziano su più campi e che sono in continuo aumento e perfezionamento. Questo a dimostrazione che quando l'analisi delle tecnologie esistenti non permette ulteriori innovazioni, affidandosi all'osservazione di ciò che ci sta attorno, si possano trovare nuove e



più ampie possibilità di rivoluzione tecnologica, portando spesso alla luce prodotti concettualmente nuovi.

### **2.3. Asknature.org e biomimicry taxonomy**

Il concetto di progettazione biomimetica è, per definizione, strettamente correlato all'analisi accurata dei processi naturali; ciò implica, inevitabilmente, un forte scambio di conoscenze tra due settori di studio molto lontani. Poiché nel campo della formazione si tende sempre più a una forte settorializzazione della preparazione, risulta sempre più complicato trovare un progettista che abbia, oltre alle necessarie conoscenze meccaniche e ingegneristiche, una necessaria cultura anche in ambito biologico. Poiché la natura funge davvero da esempio ai progettisti, è perciò d'obbligo uno scambio interdisciplinare intuitivo e immediato tra ingegneria, biologia e tutti gli indirizzi di studio che possano risultare utili. La necessità è quindi un database della natura con un approccio differente da quello puramente biologico (l'idea nasce nel 2006, quando Janine Benyus fonda il Biomimicry Institute).

Il portale Asknature.org va proprio in tale direzione, presentandosi con una frase molto significativa, che racchiude lo spirito del progetto: "Immaginate 3,8 miliardi di anni di brillante progettazione disponibile gratuitamente per ogni progettista del mondo". Asknature nasce nel 2008 (e vince il premio The Earth Awards nel 2010) con il preciso intento di catalogare le "idee" della natura secondo parametri ingegneristici, e cerca di andare oltre, citando i contatti degli studiosi che hanno partecipato allo studio di ogni singola soluzione biologica, in modo tale da favorire lo scambio di conoscenze tra gli specialisti che scelgono questa strada per l'innovazione tecnologica. Il portale di libero accesso e in lingua inglese conta oggi oltre 1500 soluzioni naturali, suddivise per le loro funzioni ed è in continuo sviluppo e perfezionamento. Allo stato attuale esistono otto macrocategorie suddivise in trenta sottogruppi con centosessantadue funzioni specifiche.

Si cercherà ora di mostrare la struttura del portale Asknature.org.

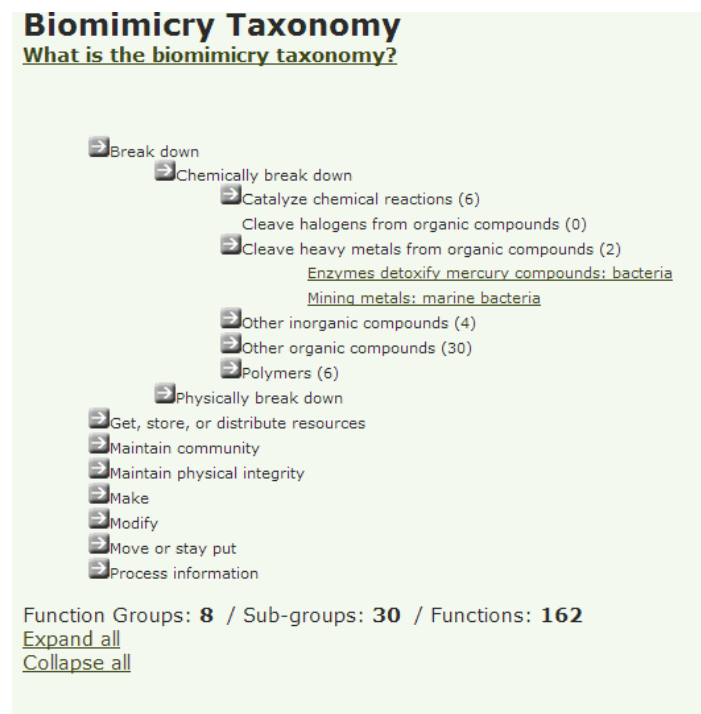
Come si potrà facilmente intuire la vastità delle strategie che la natura ha inventato e affinato in milioni di anni sono difficilmente catalogabili in uno schema di facile consultazione, soprattutto se si considera che l'intento è quello di creare un inventario suddiviso per funzioni.

Ogni mansione che l'ecosistema compie, e che un biologo studia, dovrà essere introdotta in una rubrica; con l'ulteriore complicazione che il soggetto fruitore, molto probabilmente, non sarà un altro biologo, ma sarà invece un ingegnere o un designer. Lo sforzo in questa direzione è evidente -seppur con ampi margini di miglioramento- semplicemente osservando come asknature cerca di suddividere il materiale per quanto più possibile in macrocategorie. Importante riscontrare come la catalogazione di una specifica tecnica naturale non sia

univoca, ma possa invece rientrare in più sottocategorie. Ciò dimostra, in primo luogo, come le *invenzioni* della natura siano sistemi di difficile catalogazione, e d'altro canto come vi sia la possibilità per l'utilizzatore di imbattersi in soluzioni collaterali -ma sempre pertinenti alla schematizzazione fatta- che possono essere fonte di ispirazione.

Questa catalogazione generale prende il nome di Biomimicry Taxonomy e ha uno dei suoi principali vantaggi nella schematizzazione a più livelli, con l'aggiunta di due possibili visualizzazioni.

-Schema a livelli con visualizzazione progressiva: garantisce una facile consultazione. L'apertura a tendina di ogni livello guida l'utilizzatore verso un grado di dettaglio sempre crescente fino alla soluzione-i specifica-che



**Figura 12: schema a livelli Asknature.org**

-Schema a mezzaluna: garantisce una visione generale di tutti i livelli salvo le soluzioni specifiche alle quali si rimanda, per questioni di spazio, alla visualizzazione precedente. Questa soluzione è ottimale in una prima analisi generale, poiché lascia la possibilità di osservare tutte le macrocategorie e tutte le sottocategorie a colpo d'occhio, senza la necessità di far scorrere la pagina; garantisce quindi un inquadramento della funzione ricercata che spesso può toccare più sottocategorie .



di notevole entità nella fase di recupero della forma primitiva: forze, queste, che risultano di certo interesse tecnologico per possibili applicazioni industriali.

I primi riscontri (14) sperimentali sui comportamenti di tali composti metallici risalgono al 1932 per opera degli studiosi Chang e Read, che si accorsero della reversibilità relativa alla lega oro-cadmio tramite osservazioni cristallografiche e di resistività. Nel 1938 si riscontrò il medesimo comportamento nel bronzo -lega CuZn-, ma fu solo nel 1962, quando Buehler scoprì l'effetto anche nella lega equiatomica nickel-titanio -che ora prende il nome di Nitinol. Il termine è l'acronimo di Nickel Titanio Naval Ordinance Laboratory, ossia il dipartimento militare in cui egli lavorava e che per primo prese in considerazione un'applicazione pratica. Durante gli anni seguenti vennero studiati prodotti basati su questa lega e sulle sue caratteristiche. Negli ultimi anni la reperibilità di materiali con qualità in costante crescita, ha reso possibile lo sviluppo di molti prodotti commerciali, stimolando perciò anche la ricerca. Si è così creato un notevole interesse sulle sma che rende il settore fortemente evolutivo in termini economici e tecnologici.

Di seguito si è ritenuto opportuno inserire una tabella (15) sulle le principali leghe conosciute che presentano il comportamento della memoria di forma e della superelasticità, alcune in maniera più accentuata altre in maniera marginale. Successivamente, nello svolgimento della trattazione, quando si parlerà di SMA si farà riferimento alla sola lega Ni-Ti: quella con le caratteristiche migliori e l'unica di reale interesse per applicazioni tecnologiche. I suoi principali vantaggi rispetto a altri composti intermetallici, sempre a memoria di forma, sono: una maggiore resistenza meccanica, una maggiore resistenza alle condizioni ambientali (ottima resistenza alla corrosione) e la disponibilità in fili e lamine sottili, senza trascurare la caratteristica che ha decretato il successo in ambito biomedicale cioè la biocompatibilità.

Lega	Composizione	Campo della temperatura di trasformazione °C	Isteresi di trasformazione (appross.) °C
Ag-Cd	44/49 at.% Cd	-190 to -50	15
Au-Cd	46.5/50 at.% Cd	30 to 100	15
Cu-Al-Ni	14/14.5 wt.% Al 3/4.5 wt.% Ni	-140 to 100	35
Cu-Sn	approx. 15 at.% Sn	-120 to 30	
Cu-Zn	38.5/41.5 wt.% Zn	-180 to -10	10
Cu-Zn-X (X = Si, Sn, Al)	a few wt.% of X	-180 to 200	10
In-Ti	18/23 at.% Ti	60 to 100	4
Ni-Al	36/38 at.% Al	-180 to 100	10
Ni-Ti	49/51 at.% Ni	-50 to 110	30
Fe-Pt	approx. 25 at.% Pt	approx. -130	4
Mn-Cu	5/35 at.% Cu	-250 to 180	25
Fe-Mn-Si	32 wt.% Mn, 6 wt.% Si	-200 to 150	100

(da: K. Shimizu, T. Tadaky; Shape Memory Alloys, H. Funakubo, Ed. Gordon and Breach Science Publishers, 1987)

**Figura 14: leghe a memoria di forma**

### 3.2. Metallurgia delle leghe Shape Memory Alloy

Il Nitinol creato da Buehler nel 1962 -ancora oggi il riferimento per le leghe a memoria di forma- nasce da una bagno fuso composto per il 51% da Nickel, e per il restante 49% da Titanio.

Tutte le leghe a memoria di forma devono il loro comportamento al fatto di possedere due differenti fasi cristalline, entrambe legate a una temperatura e allo sforzo imposto al materiale.

La fase a temperatura inferiore è chiamata *fase martensitica* (M) mentre quella a temperatura più alta prende il nome di *fase austenitica* (A).

Si elencano di seguito le proprietà del Nitinol (16):

Proprietà Nitinol:

- Densità:  $6,45 \text{ g/cm}^3$
- Conduttività termica:  $10 \text{ W/(mK)}$
- Calore specifico:  $322 \text{ J/(kgK)}$
- Resistenza a rottura:  $322 \text{ MPa}$
- Allungamento percentuale a rottura:  $15,5\%$
- Resistenza a snervamento (austenite):  $560 \text{ MPa}$
- Modulo di Young (austenite):  $75 \text{ GPa}$
- Resistenza a snervamento (martensite):  $100 \text{ MPa}$
- Modulo di Young (martensite):  $28 \text{ GPa}$

Per maggiore chiarezza si introduce una tabella comparativa tra Nitinol e acciaio inossidabile (17).

Property	Nitinol (martensite (M)/austenite (A))	Stainless Steel
Melting Point (°C)	1310	1450
Density (g/cc)	6.5	8
Electrical Resistivity ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )	76 (M) / 82 (A)	72
Thermal Expansion ( $10^{-6}/\text{°C}$ )	6.6 (M) / 11 (A)	17.3
Thermal Conductivity (W/m- °C)	18	16.3
Elastic Modulus (GPa)	40 (M) / 75 (A)	193

Figura 15: tabella comparativa Nitinol vs acciaio inox

La lega a memoria di forma Ni-Ti -la più utilizzata- è caratterizzata dalla composizione equiatomica ed esiste come fase stabile a temperatura ambiente (possono anche essere presenti i composti intermetallici  $NiTi_2$  e  $NiTi_3$  ).

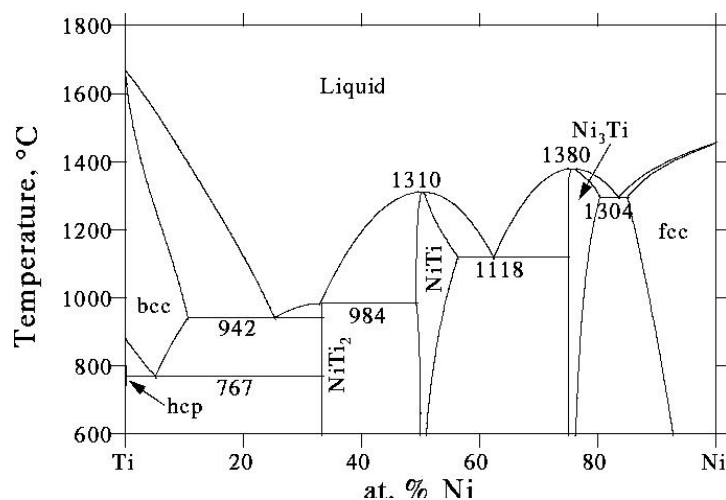


Figura 16: diagramma di fase della lega Ni-Ti

Risulta di fondamentale importanza un accurato controllo del processo di fusione e di solidificazione del bagno fuso, poichè le criticità nella creazione della lega sono molteplici.

Come si può intuire dal diagramma di fase relativo alla lega Ni-Ti, a basse temperature ( $< 600^{\circ}\text{C}$ ) il campo di esistenza del materiale in questione risulta molto ristretto.

Non bisogna trascurare la buona affinità tra Titanio e Ossigeno, che impone una particolare attenzione nel processo, al fine di evitare fenomeni di infragilimento del prodotto finale.

Le temperature  $M_s$  e  $A_s$  - rispettivamente Martensite e Austenite Start- cambiano sensibilmente con una piccola variazione percentuale del Nickel, con la precisazione che ove si lavori in condizioni non stechiometriche, si avrà la formazioni di grossi precipitati che pregiudicano la lavorabilità a caldo e inficiano fortemente le proprietà meccaniche.

### 3.3. Caratteristiche del Nitinol

Le citate capacità relative alle SMA sono, come già accennato, principalmente dovute alla possibilità di tale materiale di presentarsi in configurazioni microscopiche differenti: una fase Martensitica e una fase Austenitica. Tipicamente la prima si presenta a temperature inferiori rispetto alla seconda.

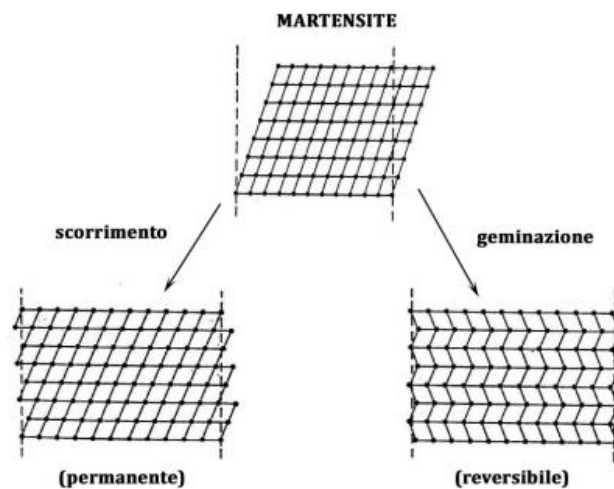
La fase martensitica detiene la peculiare caratteristica di poter presentare diverse varianti cristallografiche, caratterizzate da una diversa orientazione del reticolo

cristallino; la fase austenitica invece può disporsi secondo una sola forma cristallografica.

Se perciò la lega si trova in variante martensitica e le si applica una forzante esterna, tale sollecitazione può indurre una deformazione che, entro un certo range di ampiezza, è di tipo pseudoelastico, ossia tramite un riarrangiamento della struttura secondo un orientamento che segue la direzione dello stress applicato. La forma deformata così ottenuta risulta stabile in fase martensitica, apparentemente molto simile a un metallo deformato plasticamente.

Tuttavia se la temperatura del materiale viene incrementata fino a un valore superiore alla temperatura di trasformazione, il materiale cambia fase cristallina passando a quella austenitica. Dato che tale fase è correlata a una sola e ben definita forma cristallografica, il materiale è "obbligato" ad assumere nuovamente la forma che contraddistingueva la fase austenitica.

Osservando il fenomeno con un grado di dettaglio superiore, possiamo definire due tipologie di arrangiamento del reticolo cristallino martensitico: scorrimento delle dislocazioni (slip) e scorrimento di geminazione (twinning). I fenomeni metallurgici sopra descritti portano ai comportamenti tipici delle leghe SMA - memoria di forma e superelasticità- che tratteremo nei paragrafi successivi.



**Figura 17: deformazione permanente e reversibile**

Quando un acciaio, come quasi tutti i metalli, si plasticizza e si allunga, lo fa in maniera irreversibile e lo fa per scorrimento, poichè le dislocazioni si muovono all'interno dei singoli cristalli.

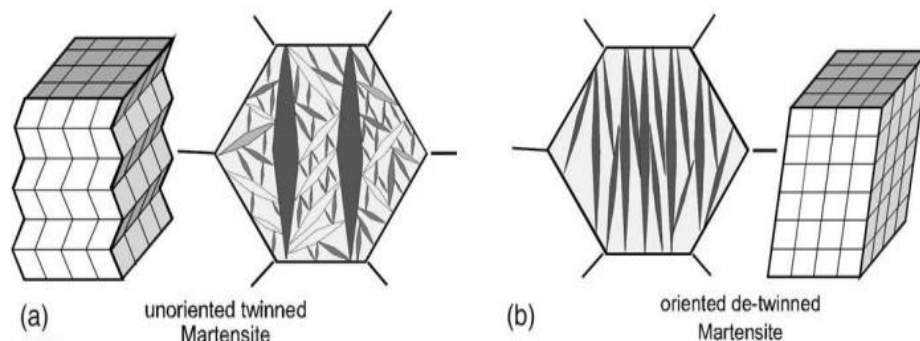
Le SMA invece lo fanno in maniera reversibile tramite twinning, processo di accomodamento che comporta la disposizione del materiale in strati con varianti a orientamento alternato del reticolo.

### 3.4. Effetto memoria di forma monodirezionale, bidirezionale ed educazione

Perchè una lega presenti l'effetto memoria, dovrà soddisfare tre fondamentali requisiti:

- la trasformazione dalla fase austenitica a quella martensitica deve essere termoelastica;
- la deformazione che avviene in fase martensitica deve essere twinning cioè reversibile;
- le strutture cristalline devono essere ordinate.

Raffreddando il materiale dalla fase austenitica, si otterrà una struttura martensitica con 24 possibili varianti orientate in modo tale da minimizzare le deformazioni interne (stato non tensionato della martensite chiamato anche twinned). A questo punto si può sfruttare la caratteristica dello stato martensitico di poter avere, diversamente da quello austenitico, più varianti cristallografiche. Se si applica una forzante esterna, si otterrà la variante cristallografica energeticamente più favorita, cioè quella orientata secondo la forza applicata: in pratica si ha una coalescenza dei geminati secondo il piano di carico. Quest'ultimo è lo stato martensitico tensionato o detwinned.



**Figura 18: possibili varianti cristallografiche della martensite**

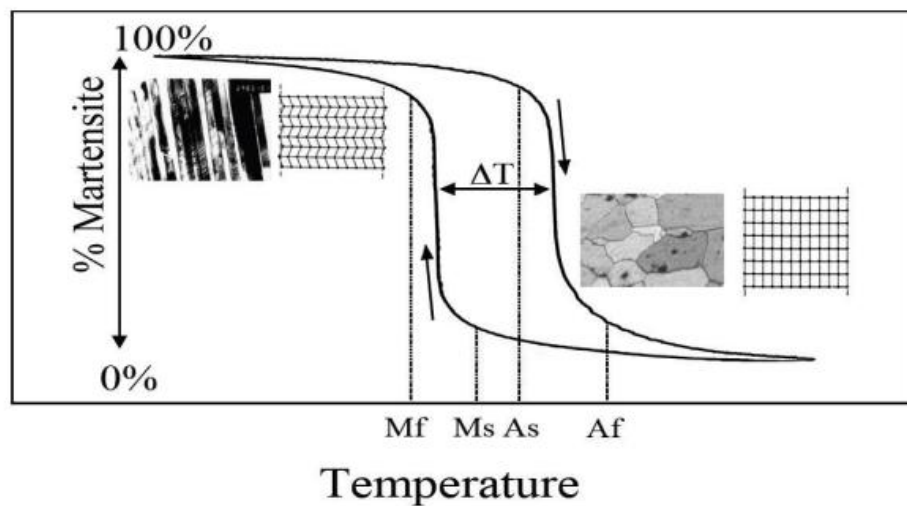
A questo punto ci si trova in presenza di una struttura martensitica deformata che, se scaldata fino a una temperatura  $A_f$  -austenite finish- e senza più carichi applicati, tenderà a recuperare la fase cristallina tipica e univoca che caratterizza l'austenite.

Viene perciò totalmente recuperata la deformazione impartita durante la fase martensitica e si avrà nuovamente la geometria indeformata della struttura. Lasciando ora raffreddare il tutto, si termina in una nuova fase martensitica indeformata.



Si ritiene utile ai fini della comprensione del fenomeno inserire un grafico Temperatura - % della fase martensitica definendo anche le temperature fondamentali che comandano il processo:

- $M_s$  -Martensite start- : temperatura di inizio trasformazione da austenite a martensite durante in raffreddamento.
- $M_f$  -Martensite finish- : temperatura di fine trasformazione da austenite a martensite durante in raffreddamento.
- $A_s$  -Austenite start- : temperatura di inizio trasformazione da martensite ad austenite durante il riscaldamento.
- $A_f$  -Austenite finish- : temperatura di fine trasformazione da martensite ad austenite durante il riscaldamento.



**Figura 19: %fase martensitica su temperatura**

Risulta importante ricordare che tale comportamento della lega si riscontra solo fino a un valore limite di sollecitazione, oltre il quale il composto intermetallico plasticizza, come succede negli acciai comuni. La deformazione non avverrà più per geminazione, ma per slip, cioè irreversibilmente: un successivo riscaldamento a  $T > A_f$  non recupererà la deformazione.

Questo fenomeno è detto memoria di forma monodirezionale, in quanto si verifica unicamente nel passaggio da stato martensitico a stato austenitico. Come già spiegato innanzi, lo stato martensitico -nella memoria monodirezionale- non è univocamente legato a una variante cristallina, lasciando la possibilità di avere lo stato martensitico deformato tramite forzante esterna applicata (detwinned).

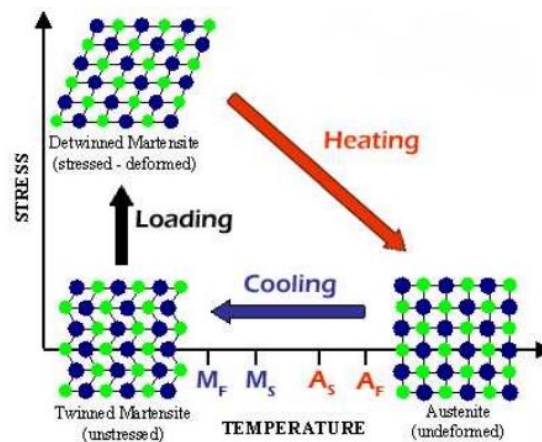


Figura 20: effetto di memoria a una via

Sottoponendo il materiale a un adeguato trattamento termomeccanico -training- risulta possibile realizzare delle condizioni di microstress interno che privilegino un'unica variante cristallografica nello stato martensitico, in maniera che tale fase sia associata univocamente a una forma. Il materiale così trattato presenta un effetto di memoria di forma bidirezionale, in quanto assume una di due forme predefinite al variare della temperatura. In pratica si sfruttano le difettosità e i precipitati per indurre un'opportuna concentrazione di sforzi interni, che eliminino la fase non deformata della fase martensitica.

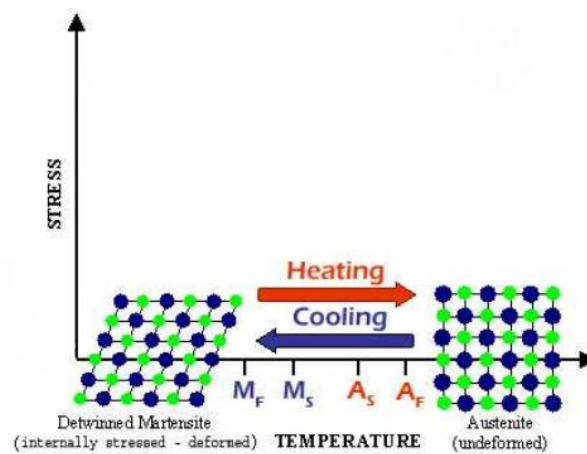


Figura 21: effetto di memoria a due vie

Certamente il comportamento bidirezionale -o a due vie- è molto scenografico, tuttavia non presenta ad oggi un reale interesse industriale a causa della difficoltà nei procedimenti per creare i microstress indotti e in particolar modo per la scarsa ripetibilità dell'effetto di memoria: l'effetto tende a smorzarsi entro un numero di cicli basso rispetto a  $N_{cicli} > 100000$  del caso monodirezionale.

Esistono leghe a memoria di forma sia in fili sottili che in lamine, queste ultime però non sono di interesse industriale. Come nel caso della memoria a due vie, si tratta di prodotti sperimentali, con scarsa ripetibilità dell'effetto di memoria e di difficile fabbricazione.

Tornando al sistema di maggiore interesse -la lega Ni-Ti in fili sottili monodirezionale- si ritiene opportuno accennare al processo di *educazione* del materiale: ciò che definisce la geometria -in termini di memoria di forma- legata all'unicità cristallina della fase austenitica.

Il materiale ottenuto dal fuso, con le necessarie precauzioni per avere un prodotto di qualità elevata, non presenta né memoria né superelasticità; necessita di un trattamento termico che ne determini la geometria nella fase austenitica.

I parametri su cui lavorare -temperature e relativi tempi di permanenza- sono spesso di difficile individuazione e risulta molte volte necessario un approccio sperimentale. Di norma, tuttavia, sono sufficienti temperature in un intorno dei 400°C e pochi minuti di permanenza perchè si "imposti" la forma. In pratica si vincola il filo SMA a un telaio, che lo blocca secondo la geometria scelta. Si colloca il sistema in un forno, che abbia già raggiunto la temperatura necessaria. Dopo alcuni minuti (circa 10) di permanenza nel forno, si potrà estrarre il telaio e togliere i vincoli al filo che, solo ora, avrà le caratteristiche volute. Temperature e tempi di permanenza eccessivi possono comportare un peggioramento delle capacità del pezzo di resistere a deformazioni permanenti. Considerata l'affinità tra Ti e ossigeno, la lega si ossida molto rapidamente senza però causare problemi tanto a livello meccanico quanto a livello biomedicale.



**Figura 22: imposizione forma molla elicoidale a un filo Ni-Ti**

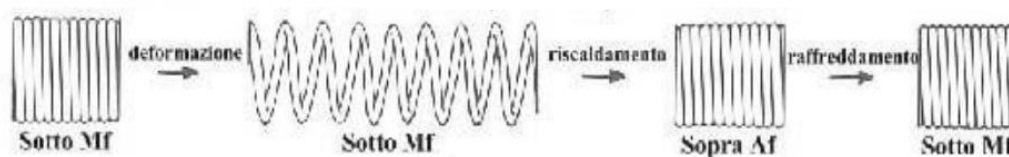


Figura 23: funzionamento molla sma monodirezionale

### 3.5. Effetto superelastico

Il comportamento superelastico -o pseudoelastico- è strettamente legato alla memoria di forma. Proprio perchè le deformazioni non avvengono per plasticizzazione del materiale, ma per cambio di fase cristallina austenite-martensite, la lega a memoria di forma ha un allungamento reversibile sensibilmente maggiore rispetto ad altre leghe.

Si tenga conto che un filo di NiTiNol (18), adeguatamente lavorato, giunge a rottura dopo un allungamento del 15,5% e con una deformazione recuperabile del 6,7-7% (per il sistema a due vie si scende al 2%).

Per comprendere le straordinarie capacità di tale lega, basti pensare che il limite elastico di un acciaio inossidabile si attesta a circa 0,5% rispetto, come detto, al 7% delle sma.

Le cause di tale comportamento sono già state ampiamente descritte e sono le medesime che generano l'effetto di memoria. Se da un lato però il principio fisico dei due fenomeni è il medesimo, altrettanto non può dirsi per i due comportamenti, poichè la memoria prescinde dall'entità della deformazione.

La superelasticità si riferisce infatti alla capacità delle leghe SMA di recuperare totalmente -senza fenomeni di plasticizzazione- l'ampia deformazione provocata da un carico applicato nel momento in cui esso viene rimosso. Si ottiene pseudoelasticità solamente quando la trasformazione allo stato martensitico avviene tramite deformazione a una temperatura maggiore di  $M_s$ . La deformazione macroscopica è associata al twinning a livello microscopico con nucleazione della fase martensitica.

Quando la forzante viene rimossa la trasformazione si inverte, con il ritorno alla fase austenitica cristallograficamente e geometricamente univoca.

La caratteristica principale del fenomeno della superelasticità è che il materiale, dopo un breve tratto elastico in austenite, continua la sua deformazione -con uno sforzo applicato costante- per poi proseguire con un altro tratto elastico, però in fase martensitica. Con la rimozione del carico, si può osservare un recupero elastico in fase martensitica, successivamente si ha la transizione di fase a sforzo costante, per concludere con il recupero elastico in fase austenitica.

Questa proprietà rende possibile sistemi che, se messi in opera allo stato deformato e con una temperatura adeguata, esercitano una forza costante sui vincoli ai quali essi sono ancorati.

Esiste, ed è caratteristica della lega, una temperatura  $M_d$  sotto la quale è possibile ottenere -partendo da fase austenitica- la fase martensitica per deformazione. Perchè ciò avvenga, e quindi il materiale abbia comportamento superelastico, si dovrà lavorare a una temperatura compresa tra  $A_f$  e  $M_d$  (in particolare  $A_f < T < M_d$ ).

In questo intervallo termico la fase martensitica -senza sforzo applicato- non potrebbe esistere, poichè la fase stabile è quella austenitica. Ciò implica che, nel momento in cui il carico applicato viene rimosso, ci si trova in una situazione di instabilità termodinamica e la lega tende istantaneamente a tornare alla fase martensitica con un conseguente recupero della deformazione.

Fino a che il carico non viene rimosso agiranno le forze di richiamo sui vincoli della struttura.

Per maggiore chiarezza si inserisce un diagramma deformazione-sforzo che raffiguri il comportamento superelastico.

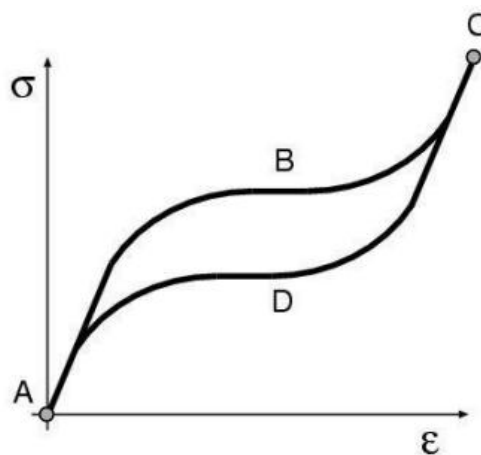


Figura 24: effetto superelastico o pseudoelastico

La temperatura alla quale si realizza il comportamento pseudoelastico è un parametro molto importante, in quanto è direttamente proporzionale allo sforzo richiesto per avere la fase martensitica indotta da stress (Stress Induced Martensite).

All'atto pratico, al crescere della temperatura cresce lo sforzo necessario per ottenere la deformazione. Ciò è vero fino alla già citata temperatura limite  $M_d$ ; superata questa soglia lo sforzo necessario a creare la martensite sarà maggiore di quello che serve a deformare plasticamente l'austenite, perciò si otterrà una deformazione irreversibile. L'area racchiusa tra la curva di carico e quella di

recupero rappresenta l'energia che viene dissipata nel processo di recupero superelastico.

Le fase di recupero è caratterizzata dalla forza di richiamo: un altro parametro che rende industrialmente interessante questa tipologia di leghe.

Le forze che si generano grazie al comportamento superelastico sono di notevole intensità. Il nitinol può assorbire energia durante la fase di carico -cioè quando si genera lo stato di martensitico indotto da stress- per poi restituirla, decurtata secondo un termine dissipativo, nella fase di richiamo elastico. Un altro impiego può essere quello di sfruttare le forze di richiamo che si generano sui vincoli mentre si sfrutta l'effetto pseudoelastico a deformazione imposta e costante. Le forze che vengono generate variano sensibilmente con la temperatura dell'applicazione poichè, se sale la temperatura, cresce lo sforzo da applicare e quindi anche la forza di richiamo generata dalla lega.

Solamente per dare un'idea sull'ordine di grandezza delle forze in gioco, si fa riferimento uno sma wire di 0,5 mm -tra i più grandi prodotti- che può generare una forza di richiamo vicina a 1N.

## **3.6. Applicazioni SMA**

Dopo aver descritto il funzionamento e le principali caratteristiche delle leghe a memoria di forma, si passa a una breve carrellata delle applicazioni industriali che sfruttano la tecnologia SMA.

Verranno illustrate alcune tra le applicazioni già in commercio, che sono di utilizzo comune, in modo tale da far comprendere le reali potenzialità di questo materiale.

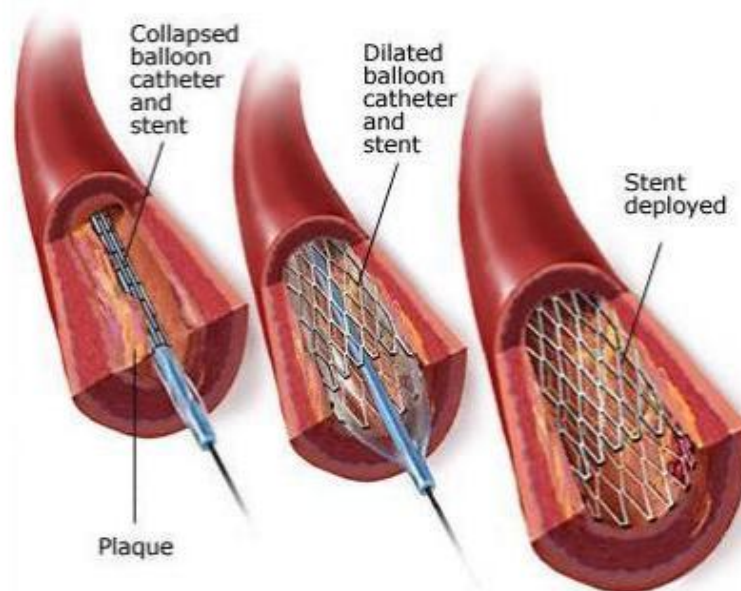
Per quanto ormai vi siano numerose applicazioni di rilevante interesse commerciale, il settore delle leghe a memoria di forma è da considerarsi ancora in fase di sviluppo ed evoluzione.

### **3.6.1. Applicazioni biomediche**

Le applicazioni solitamente più conosciute sono quelle in ambito biomedico a causa dell'ampia diffusione di stent (19) e di prodotti per l'ortodonzia.

Gli stent hanno la funzione di rinforzare le pareti arteriose o venose che tendono a diminuire -per vari ordini di ragioni- la loro sezione e così garantire un corretto afflusso di sangue in tutto il corpo. I dispositivi più utilizzati sono costituiti da fili sottili di Nitinol -intrecciati a maglie- per formare dei cilindri. Lo stent viene prima raffreddato e compresso per ridurre l'ingombro, successivamente viene collegato a un catetere per renderne possibile l'inserimento -solitamente attraverso i vasi più grandi- e il posizionamento. In fine, posizionato correttamente e rilasciato, lo stent, risentendo della temperatura

corporea, si espande, così da esercitare una pressione costante sulle pareti dei vasi e assicurare che i condotti abbiano il diametro necessario per una corretta circolazione sanguigna.



**Figura 25: stent in lega a memoria di forma**

Sempre sfruttando la forza di richiamo che generano, gli Sma wires vengono utilizzati negli apparecchi ortodontici. Quando si cerca di posizionare correttamente i denti, serve che si applichi ai medesimi una forza costante per lunghi periodi: le Sma sono molto indicate per tale applicazione.



**Figura 26: filo sma per apparecchi ortodontici**

Mentre i vecchi fili in acciaio richiedevano spesso di essere adeguatamente tensionati, i nuovi fili garantiscono prestazioni migliori -sia in termini di costanza che di entità della forza- con minori interventi di correzione. Nel campo industriale esistono molte applicazioni per fissaggi e giunture che sfruttano le forze generate per l'effetto superelastico

### 3.6.2. Applicazioni di fissaggio e giuntura

Per quanto riguarda le applicazioni di fissaggio e giuntura, esiste un'applicazione molto utilizzata ed efficace nel settore degli impianti idraulici. Nel caso di realizzazione di condutture lunghe, saranno certamente necessari elementi di giuntura che garantiscano la tenuta della pressione e che minimizzino gli interventi di manutenzione.

Il giunto in Nitinol viene realizzato in maniera tale che, in fase austenitica, generi interferenza; cioè che abbia dimensioni inferiori rispetto alle parti da fissare. Per essere montato, il giunto viene raffreddato così che passi alla fase martensitica e possa essere deformato dilatandolo opportunamente. Una volta posizionato risentirà della temperatura di esercizio così che, cercando di tornare alla sua forma austenitica, generi il serraggio. Poichè il recupero totale della forma sarà impedito dall'interferenza, il giunto garantirà un'azione di serraggio persistente dopo la messa in opera.

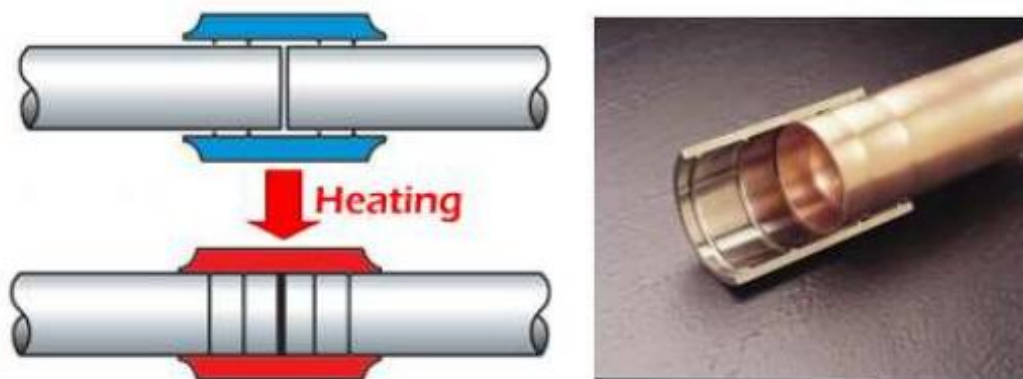


Figura 27: giunto Sma per tubi

Naturalmente la temperatura di esercizio del giunto non deve mai essere troppo bassa ( $20^{\circ}\text{C} < T < 200^{\circ}\text{C}$ ). Se infatti non vi fosse più il richiamo elastico tipico del ritorno alla fase austenitica, ci si ritroverebbe in fase martensitica deformabile (cioè la condizione di installazione) e la pressione di esercizio potrebbe quindi dilatare il giunto.



### 3.6.3. Applicazioni per attuatori

In ingegneria gli attuatori sono sistemi nati per trasformare un input in un movimento.

Generalmente l'input è di tipo elettrico e il movimento è imposto tramite motori elettrici o sistemi idraulici. Poiché questi sistemi citati sono relativamente complessi e ingombranti, sono di sicuro interesse tecnologico gli attuatori che sfruttano la tecnologia della memoria di forma e della superelasticità.

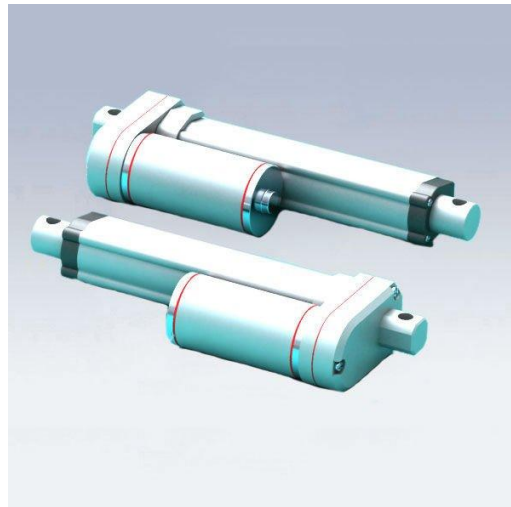


Figura 28: attuatore elettrico classico



Figura 29: Attuatore con molla Sma

Il secondo attuatore (Figura 29) è composto da un pistone movimentato da due molle: una molla di richiamo e la molla Ni-Ti. La molla a memoria di forma comanda il movimento del pistone, mentre l'altra molla serve solo per richiamare il pistone in posizione.

Come si può riscontrare dalle immagini, mettendo a confronto un classico attuatore elettrico con uno che sfrutta le Sma, l'assenza del motore elettrico riduce notevolmente l'ingombro del dispositivo. Questa caratteristica è fondamentale nelle applicazioni -come quelle biomediche- dove si ha la necessità di microattuatori.

Un altro grande vantaggio degli attuatori a memoria di forma è il rapporto peso-potenza, che risulta inferiore a qualsiasi altro in produzione.

### **3.6.4. Applicazioni per il controllo di temperature e flussi**

In molti oggetti di uso quotidiano, già da diversi anni, sono presenti dispositivi che sfruttano le proprietà delle leghe a memoria di forma. In questo paragrafo si illustrano solamente alcune delle numerosissime soluzioni già presenti sul mercato.

Per quanto riguarda gli elettrodomestici si consideri, a titolo di esempio, il comune bollitore elettrico. Al raggiungimento della temperatura di ebollizione, a prescindere dalla quantità di acqua contenuta, il bollitore si spegne automaticamente. La molla, che comanda l'interruttore della resistenza, è fatta in Sma ed è attivata dal vapore prodotto dall'ebollizione dell'acqua.

Molte macchine da caffè hanno al loro interno una valvola in Ni-Ti, che apre il condotto dell'acqua solo quando questa ha raggiunto una temperatura giusta per miscelarsi con la polvere di caffè.

Nel settore automotive le leghe Sma sono largamente utilizzate per gli impianti di aspirazione dell'aria e del liquido di raffreddamento. Le valvole che gestiscono i flussi sono comandate solamente dalla temperatura, consentendo così una notevole semplificazione dei sistemi con la conseguente diminuzione degli ingombri e del peso.

Solitamente gli impianti industriali di aerazione dispongono di serrande mobili per la parzializzazione dei flussi, in particolare della portata non ricircolata. Un elemento in Sma, con attuazione naturale o in corrente, garantisce ottime prestazioni ed è in grado di mantenere chiuso il condotto a cui è preposto, proprio grazie alle doti di superelasticità, anche in presenza di vento.

### 3.6.5. Applicazioni per sistemi di sicurezza

Come detto, le leghe a memoria di forma possiedono una buona capacità di assorbimento dell'energia, ciò le rende adatte per applicazioni mirate allo smorzamento di vibrazioni fastidiose e potenzialmente pericolose se con frequenze prossime a quelle proprie del sistema in esercizio (applicazioni per automotive o macchine utensili come le seghe circolari).

Negli ultimi anni una ditta italiana con sede a Padova, la FIP, ha studiato e messo in produzione dispositivi antisismici che sfruttano le Sma. Si tratta di dispositivi adatti per il collegamento tra gli orizzontamenti e le pareti di un edificio in muratura. Lo scopo è di sostituire -o coadiuvare- i tiranti metallici in acciaio al fine di evitare il ribaltamento delle pareti a causa delle azioni indotte dal sisma.



**Figura 30: dispositivi antisismici FIP**

Tali sistemi antisismici sono stati applicati a diverse strutture monumentali, la cui stabilità è stata pregiudicata a causa di scosse telluriche, come la basilica di S. Francesco ad Assisi (20) e la cattedrale di Foligno (21).



Figura 31: Intervento sulla cattedrale di Foligno

Un'ulteriore applicazione che sfrutta le leghe a memoria di forma è quella delle valvole di sicurezza. Negli impianti collegati alla rete del gas si trova una valvola di sicurezza che, attivata dal calore, interrompe l'erogazione del combustibile in caso di incendio.

Nel caso delle porte tagliafuoco esistono sistemi di movimentazione per la chiusura la cui attivazione è comandata direttamente dal calore grazie ad interruttori che sfruttano Ni-Ti.

### 3.6.6. Applicazioni aerospaziali

In diverse applicazioni aerospaziali vengono utilizzati bulloni esplosivi per lo sgancio dei sistemi come il rilascio di apparati esterni quali antenne e satelliti dopo il posizionamento in orbita.

I bulloni esplosivi sono ormai sostituiti dal sistema **Frangibolt®**, il quale realizza la rottura dell'elemento di fissaggio grazie all'allungamento di un collare in lega Sma, attivato per effetto Joule (riscaldamento per dissipazione dovuto al passaggio di corrente). Tale soluzione ha i principali vantaggi nell'eliminazione dell'esplosivo -sempre pericoloso durante l'installazione e il trasporto- e nella riutilizzabilità.

## **4. Biomimicry e shall memory alloy**

Nei capitoli precedenti si è cercato di comprendere il concetto di biomimetica, il funzionamento e le applicazioni delle leghe a memoria di forma con l'intento di intuirne le potenzialità.

Nel presente capitolo si riassume il lavoro di ricerca delle soluzioni già studiate che sfruttino sia la progettazione biomimetica, sia l'utilizzo delle leghe a memoria di forma. La ricerca è stata effettuata attraverso due motori di ricerca scientifici: Scirus.com e Google Scholar. Come input per la ricerca delle pubblicazioni, siano esse articoli o atti di convegno, sono state usate delle parole chiave: Biomimicry, SMA, Shape Memory Alloy, bionic, bioinspired e nitinol o Ni-Ti.

L'intento è volto all'individuazione di pubblicazioni scientifiche che fondano il loro lavoro sulla progettazione biomimetica e che, per imitare la natura, utilizzano leghe a memoria di forma.

Sono stati trovati diversi articoli che esprimono il connubio biomimetica-SMA.

Tutti gli studi trovati hanno come base l'utilizzo della bioispirazione per lo sviluppo di applicazioni innovative che siano più performanti di quelle già in produzione. Nello sviluppo dell'applicazione bio-inspired ci si imbatte in sistemi complessi con numerose sottofunzioni per le quali l'impiego delle leghe a memoria di forma è il migore -o talvolta l'unico- metodo di svolgerle.

Si elencheranno e spiegheranno brevemente le pubblicazioni trovate. In alcuni casi sono stati trovati più articoli -di autori differenti- per un'unica bioispirazione. Se i metodi di sviluppo dell'applicazione sono differenti -caso del moto del pesce-, sono trattati tutti gli articoli altrimenti, se si tratta di pubblicazioni ridondanti -caso pipistrello- ne verrà esposta una sola (le altre saranno in bibliografia).

Gli articoli verranno esposti uno a uno, catalogati unicamente rispetto alla soluzione naturale citata nel testo. Sarà compito dei capitoli successivi ricostruire il procedimento e la catalogazione delle bioispirazioni utilizzate nello sviluppo delle applicazioni

### **4.1. SMA per applicazione ispirata al pipistrello**

MAV è l'acronimo di Micro-Air-Vehicle (22). I MAV sono micro velivoli comandati a distanza, solitamente impiegati per azioni di monitoraggio sia militare che civile.



**Figura 32: MAV a quattro eliche**



**Figura 33: MAV per impiego militare**

Come si può osservare dalla Figura 32 e dalla Figura 33, si tratta di velivoli di dimensioni molto ridotte, con la necessità di trasportare diverse attrezzature relativamente piccole. Nel caso del MAV per scopi militari ci sono sistemi nettamente più complessi e pesanti.

Si tratta di mezzi che viaggiano a velocità abbastanza ridotte (30-40 km/h) e che hanno il punto di forza nelle piccole dimensioni che consentono loro di poter passare inosservati. Allo stato attuale sono mossi da eliche, con al massimo l'aggiunta di ali fisse, tramite propulsione elettrica o grazie a piccoli motori a scoppio. La necessità è quella di trasportare eventuali batterie o motori,

telecamere e sensori vari (necessari per il radiocontrollo). Con la miniaturizzazione dei componenti, vi è la richiesta di velivoli di dimensioni sempre più ridotte. Vari studi confermano ottimi numeri di Reynolds -simili a quelli dei volatili- per soluzioni medio-grandi.

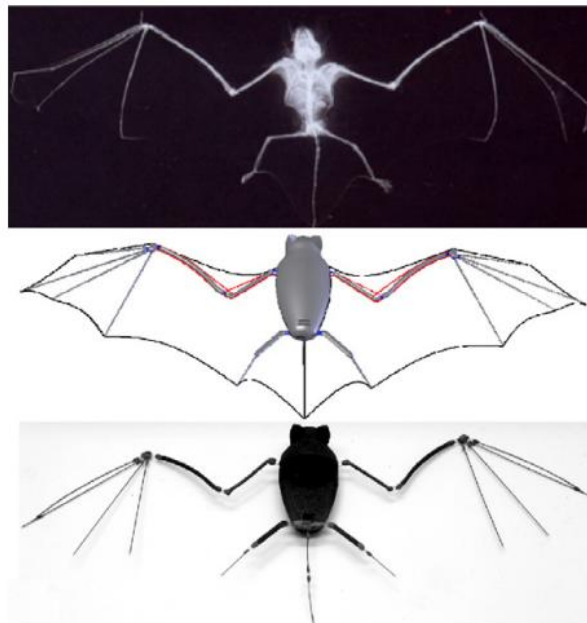
Quando però le dimensioni si riducono sotto i 10 cm, si riscontra un calo prestazionale importante.

La natura ha già da tempo superato tale problema, introducendo volatili che sbattono le ali.

Lo studio (23) (24) condotto in collaborazione tra le università del North Carolina e di Xi'an (S. Yang e S. Seelecke 2009), studia biomimeticamente il problema. Cercando un volatile di dimensioni compatibili alle applicazioni da sviluppare gli studiosi hanno individuato il pipistrello: animale agile e molto leggero.

Ne vengono studiate le caratteristiche fisiche alla ricerca di soluzioni tecnologiche atte a replicarle.

La soluzione individuata è quella di una riproduzione delle caratteristiche fisiche del pipistrello, facendo svolgere l'azione dei muscoli e delle giunzioni dell'animale a SMA wires. L'articolo scientifico in esame svolge poi un'implementazione agli elementi finiti della struttura. Detto profilo non sarà oggetto d'esame nel presente lavoro, in quanto il suo fine è la definizione del profilo dei carichi agenti sulla struttura per una validazione strutturale. Tale procedimento di validazione non è strettamente legato alla bioispirazione anche se necessario in molte applicazioni pratiche.



**Figura 34: dal pipistrello al batmav**



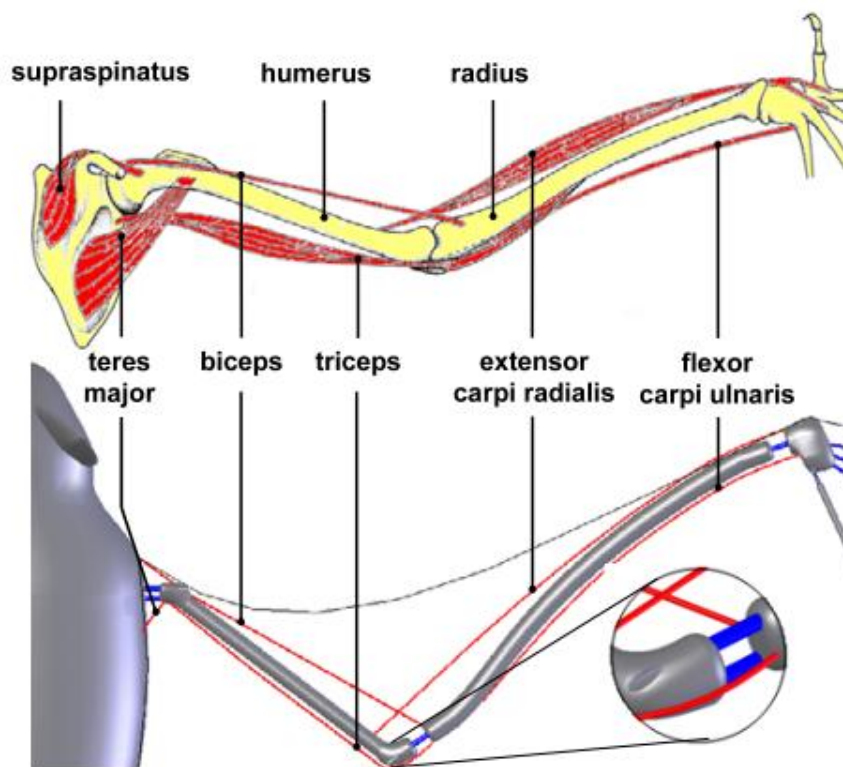
Nella Figura 34 si possono intuire i passaggi che portano all'applicazione finale:

- ricerca e studio della fonte di ispirazione naturale;
- individuazione, tramite prove di validazione numeriche ed esperimenti, di soluzioni tecnologiche che replichino le sottofunzioni naturali;
- creazione dell'applicazione finale;

Proprio nel secondo punto, quando vi era la necessità di trovare un sistema artificiale che replicasse il sistema di movimentazione delle ali, si è scelto l'utilizzo di leghe a memoria di forma: un metodo che garantisce compattezza ed efficienza. Nessun sistema di movimentazione tradizionale basato su attuatori garantirebbe la leggerezza e la compattezza di un'applicazione SMA.

Giustamente il prodotto finale prende il nome di Batmav.

Si inserisce un'immagine che faccia intuire nel dettaglio la movimentazione dell'ala.



**Figura 35: particolare ala del Batmav**

Risulta interessante riscontrare come i muscoli della soluzione biologica siano fedelmente sostituiti, nella soluzione artificiale, dai fili di Ni-Ti, come per le



giunture. Il circuito elettrico che serve per far passare corrente nei fili SMA (e farli quindi riscaldare per effetto Joule) è inserito nel corpo del finto animale.

## **4.2. SMA per applicazioni ispirate al movimento dei pesci**

Allo stato attuale gli Unmanned Undersea Vehicles (UUVs) (25), cioè veicoli sottomarini senza umani a bordo, sono mossi esclusivamente tramite eliche in rotazione. Il design di tali veicoli è strettamente dipendente dalla presenza degli elementi rotanti. Un grande limite degli UUVs attuali è la manovrabilità alle basse velocità, poichè il sistema è progettato per essere energeticamente efficiente alle velocità di crociera.

Recentemente l'approccio biomimetico sta svelando alcune stimolanti possibilità di miglioramento delle performance, grazie all'imitazione della movimentazione dei pesci.

Esistono diverse pubblicazioni (26), (27), (28), (29) di studi sul tema, molte delle quali si affidano alle leghe a memoria di forma per la movimentazione delle parti mobili. Verranno qui citati i risultati di alcuni sviluppi ritenuti progettualmente interessanti, verrà cioè trascurata una pubblicazione (29) in quanto sostanzialmente identica ad un'altra.

Il primo studio proposto (T.Tao, Y.C. Liang M.Taya, 2006) risulta molto interessante ed è, tra tutti, quello costruttivamente meno complicato. L'articolo spiega in prima analisi come la necessità di piccoli veicoli sottomarini, con ottima manovrabilità e buona efficienza energetica, abbia portato allo studio delle soluzioni naturali. Le soluzioni meccaniche "man-made" -senza bioispirazione- sono caratterizzate da una bassa efficienza energetica e scarsa manovrabilità rispetto a strumenti che sfruttino il moto ondulatorio del corpo dei pesci.

Negli anni precedenti, proprio con l'intento di imitare il movimento dei pesci, si svilupparono soluzioni nelle quali la movimentazione avveniva grazie ad attuatori e rispettivi ingranaggi. Tutti i tentativi di una progettazione biomimetica, che sfruttasse questa strategia naturale, portarono ad applicazioni meccanicamente complicate, perciò solitamente meno affidabili nonché troppo pesanti.

Proprio le leghe SMA per tale applicazione bioispirata aprirono nuovi scenari di ricerca. Tra i vari animali acquatici si è scelto, come base di partenza, lo sgombrò. Il risultato è una soluzione che sfrutta in maniera molto "furba", senza eccessive complicazioni, le leghe a memoria di forma.

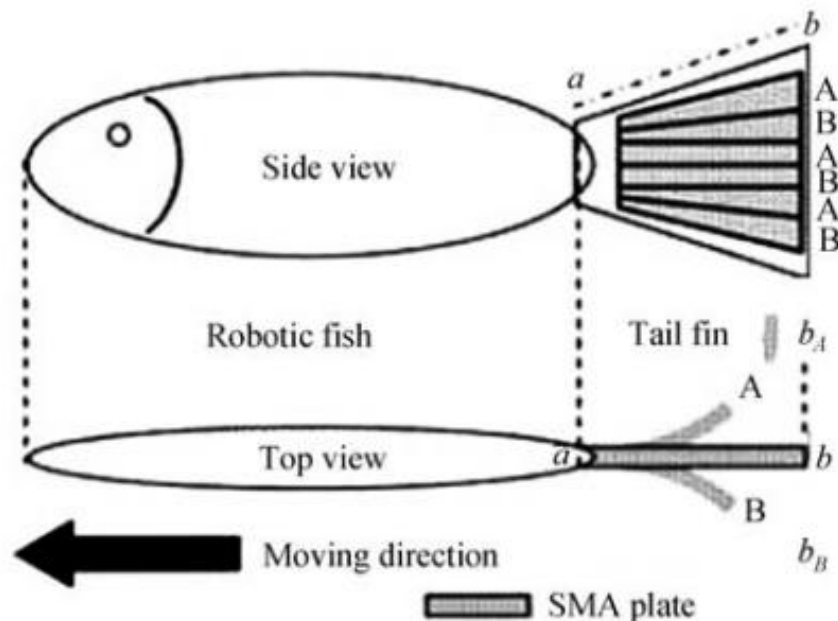


Figura 36: applicazione che imita la pinna caudale dello sgombro

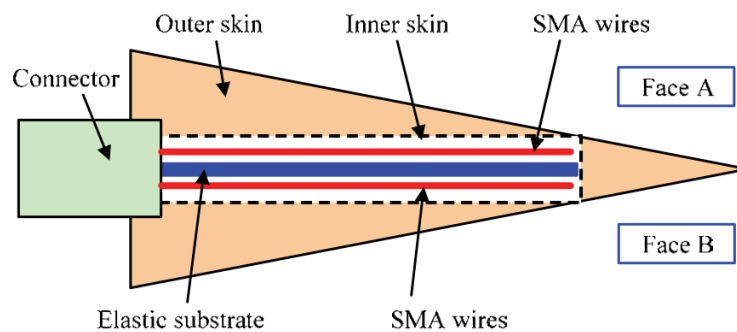
A livello tecnico la soluzione è abbastanza semplice. La pinna caudale artificiale è composta da *fili* (*A* e *B*) SMA, con memoria geometricamente opposta, connessi tramite una membrana, tale da creare una superficie unica. I *fili A* hanno la fase austenitica in posizione  $a-b_A$ , mentre i *fili B* la hanno in posizione  $a-b_B$ . Inizialmente sono inseriti deformati sotto stress (fase martensitica) nella membrana che li tiene in posizione  $a-b$ . Il movimento sarà poi creato scaldando per effetto Joule, in maniera alternata, i *fili A* e *B*.

Quando si scaldano i *fili A* questi recuperano la fase austenitica e la posizione  $a-b_A$  deformando senza problemi i *fili B* che si trovano in fase martensitica (perciò facilmente deformabili). Viceversa quando si toglie la corrente ai *fili A* essi tornano in fase martensitica. Sarà il riscaldamento dei *fili B* e il loro richiamo elastico a far muovere la pinna caudale in direzione opposta fino al profilo  $a-b_B$ . Si è così riprodotto, in maniera molto intuitiva, il movimento ondulatorio proprio della pinna caudale dei pesci.

Un altro studio condotto dal laboratorio di robotica dell' Harbin institute (Z. Wang, G. Hang, J.Li, Y. Wang and K. Xiao 2008) ha riscontrato che alcuni UUVs bioispirati dispongono di parti mobili, ma definite da profili fissi. Come già illustrato nella pubblicazione precedente, queste soluzioni erano mosse da attuatori tradizionali con un peso risultante eccessivo. L'osservazione di un pesce molto flessibile, come l' *osteoglossum bicirrhosum*, ha dimostrato la maggiore efficienza rispetto a superfici fisse. Anche in questo caso i sistemi di movimentazione classici -necessari per curvare la superficie- risultano troppo

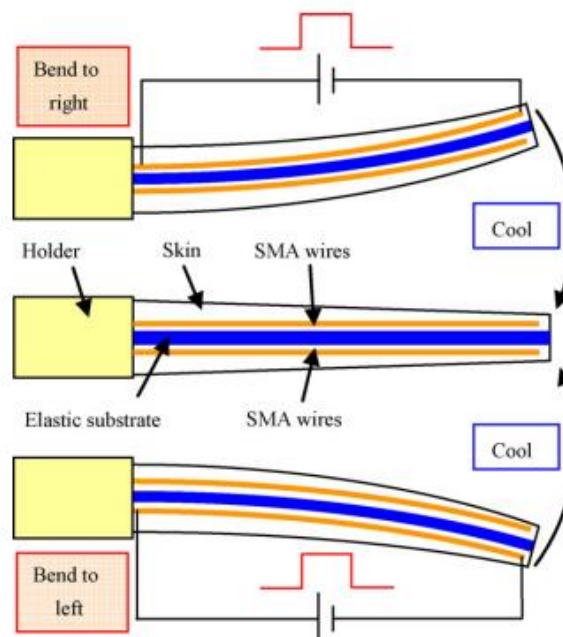
ingombranti e pesanti. In tal caso solamente la tecnologia SMA permette un rapporto peso/potenza così ridotto. Poiché in questo genere di applicazioni un risparmio in termini di massa risulta fondamentale per il risparmio energetico, la soluzione basata sulle leghe a memoria di forma è quella che permette le performance migliori.

Ci si affida perciò alle leghe a memoria di forma, però con un approccio sensibilmente diverso da quello del precedente articolo.



**Figura 37: pinna caudale con SMA wires**

Come si può intuire dalla Figura 37 la forza necessaria a deformare la pinna giunge da dei fili di Ni-Ti. Si introduce un'altra immagine -Figura 38- che esplica il funzionamento del sistema, ossia come due fili SMA riescono a flettere la superficie in maniera alternata.



**Figura 38: metodo per curvare la pinna caudale**

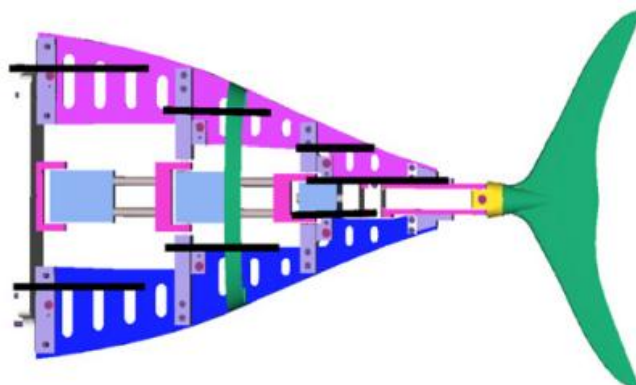
Viene rappresentato in questo caso anche il sistema del circuito, che lascia passare corrente negli SMA wires, facendoli riscaldare per effetto Joule. Come nel caso precedente, il filo con circuito chiuso si scalda e per richiamo elastico deforma l'altro filo (si ricorda che la fase martensitica è facilmente deformabile dal richiamo elastico generato da un filo uguale che tende a tornare in fase austenitica). Aperto il circuito del primo filo, si invertirà il movimento chiudendo il circuito relativo all'altro filo.

Il movimento alternato si genera con una deformazione della superficie e non con un movimento del profilo fisso, la curvatura ottimale si può scegliere con una corretta educazione del filo di Ni-Ti.

Un'ultima applicazione (A. Suleman and C. Crawford, 2007) si ispira a uno dei pesci più veloci e agili: il tonno.

Le ottime caratteristiche di manovrabilità ed energetiche alla velocità di crociera sono dovute al fatto che questo animale incurva circa il 50% del suo corpo. Questa caratteristica è tipica del nuoto carangiforme del tonno rosso; diversamente il tonno pinne gialle ha un moto tunniforme che sfrutta la sola pinna caudale.

Il tonno è anche conosciuto per la sua geometria caratterizzata da un basso coefficiente di attrito. Le numerose pinne dell'animale, eccetto quella caudale, non prendono parte alla generazione di forza motrice, servono per stabilizzare riducendo le turbolenze. In questo progetto tutte le pinne sono state sostituite da profili NACA. In questo caso il funzionamento è più complesso, perché la replica del pesce è in scala 1:1; perciò di dimensioni notevoli (un tonno rosso adulto raggiunge il metro di lunghezza), fatto che richiede la suddivisione in più parti per la movimentazione. Si inseriscono due immagini relative alla parte del tonno movimentata tramite fili SMA (come detto circa metà della lunghezza totale del pesce).



**Figura 39: sezione della parte movimentata**

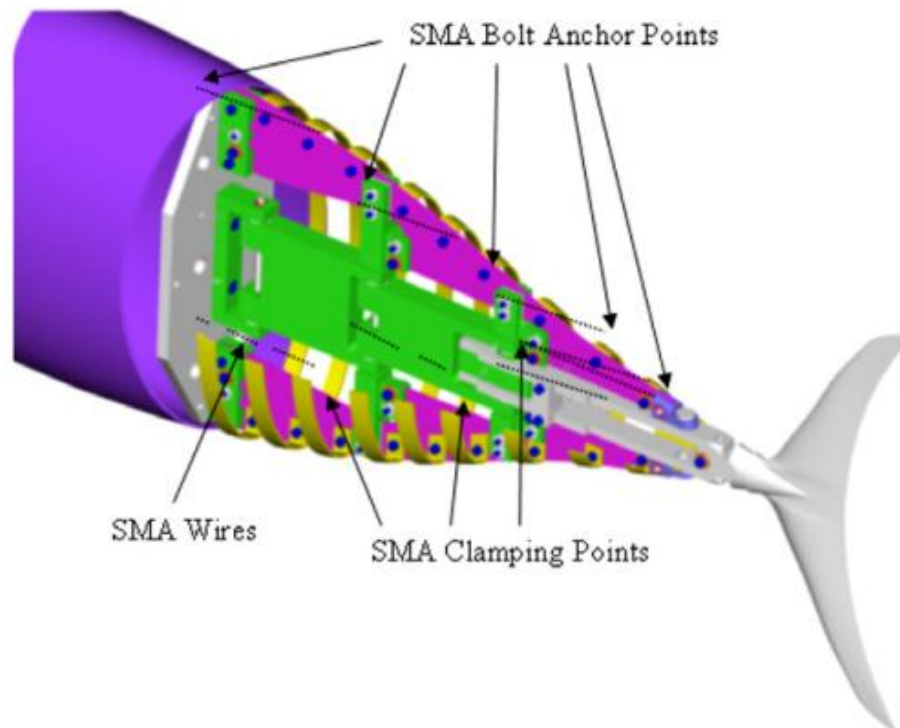


Figura 40: sezione movimentata installata alla metà fissa

Le parti in nero della Figura 39 sono i fili di lega a memoria di forma che generano la forza per curvare il profilo fisso (in rosa nella Figura 40). Chiaramente più profili fissi con angolature differenti possono essere assimilati a un unico profilo variabile, anche perché lo strato di copertura non presenta discontinuità.

### 4.3. SMA per applicazioni ispirate al lombrico

Sempre più ricerche ed esperimenti denotano un crescente interesse verso lo studio della locomozione di animali capaci di muoversi in diversi ambienti, dove spesso le tecnologie di propulsione attuali non danno buoni risultati.

Un chiaro esempio è il lombrico di terra *-lumbricus terrestris-* che non dispone di zampe e come tutti gli anellidi sfrutta un movimento ondulatorio.

Gli interessi applicativi sono svariati, uno dei principali è in campo medico per lo sviluppo di tecnologie che consentano di effettuare endoscopie (30) il meno invasive possibile. Come nel caso dell'imitazione del moto del pesce, esistono diverse applicazioni. Si esporranno brevemente due soluzioni, entrambe interessanti.

Il lombrico è composto da diversi moduli che possono, grazie a muscoli longitudinali e circolari, allungarsi del 60% e ridurre il diametro del 25%. Poiché tali applicazioni richiedono una dimensione finale estremamente ridotta (le sonde endoscopiche hanno un diametro di circa 1cm), sono stati esclusi a priori i classici attuatori, in favore di quelli a memoria di forma. Visto che la deformazione longitudinale di un filo Ni-Ti -se si richiede un numero di cicli molto elevato- non può superare il 4-5%, sono stati esclusi gli SMA wires e si sono preferite le molle (non sono altro che SMA wires opportunamente educati sotto forma elicoidale). In questa conformazione le leghe a memoria di forma garantiscono un netto aumento della deformazione longitudinale (31). Per avere un'idea delle forze in gioco (sempre minori nella configurazione a molla rispetto al filo) si tenga conto che una molla creata da un filo di  $100\mu\text{m}$  può generare fino a 0,3N.

La prima applicazione, studiata in Korea (B. Kim, M.G. Lee, Y. P. Lee, Y. Kim, G. Lee, 2005) (32), è basata sull'imitazione di un solo modulo del lombrico con attuatori SMA: gli unici a poter garantire la compattezza e il rapporto peso/potenza necessario per l'applicazione.

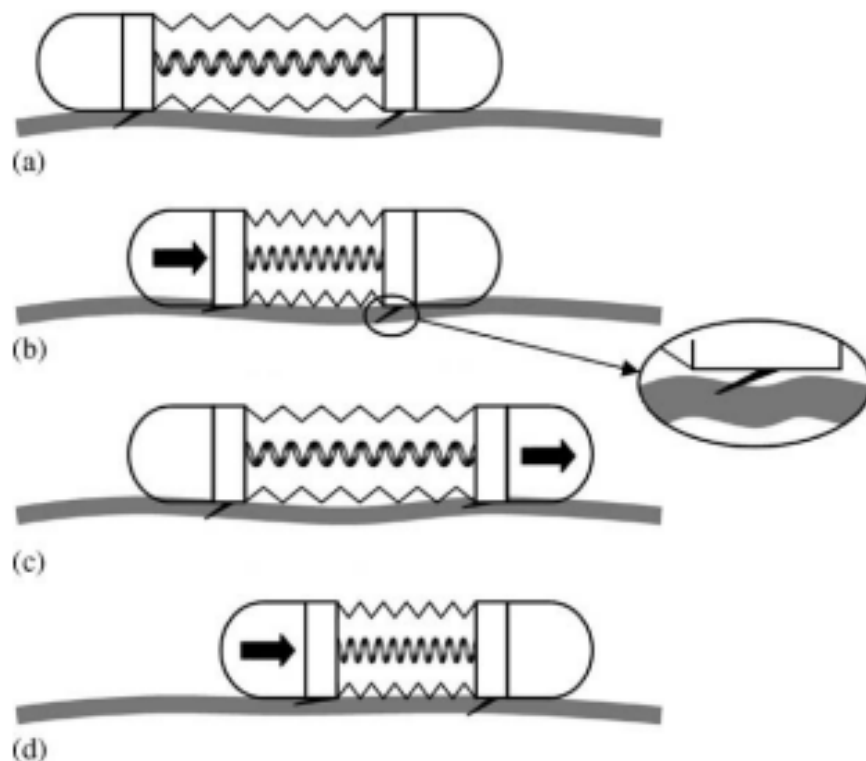
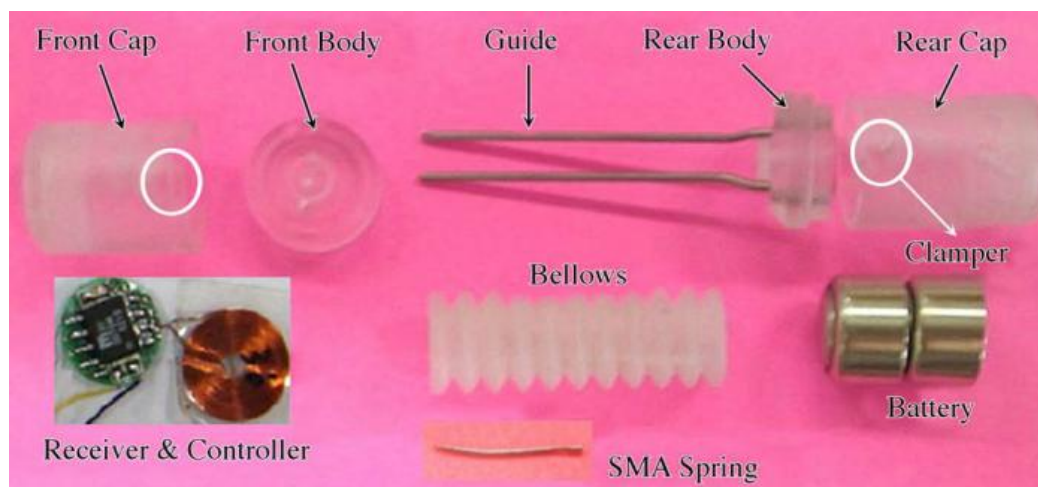
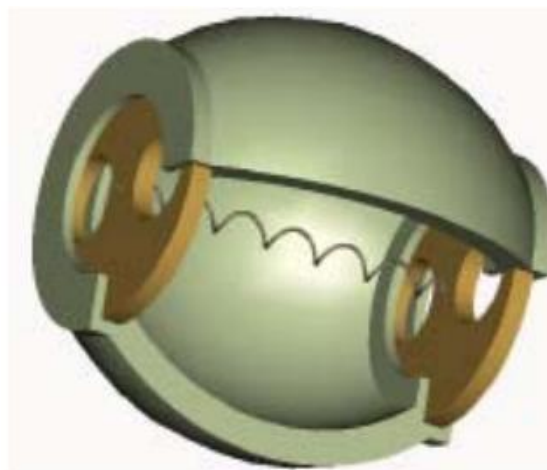


Figura 41: a)stato iniziale, b)stato ritratto, c)stato allungato, d)nuovo stato ritratto



**Figura 42: applicazione pratica lunghezza totale 5cm**

L'applicazione sviluppata presenta un diametro massimo di 9,5mm (agli estremi) e una lunghezza massima di 5cm. La velocità massima stimata è 3,4 mm/ciclo. A Pisa invece è stata studiata una struttura componibile a moduli presentata alla conferenza internazionale di robotica (A. Menciassi, S. Gorini, G. Pernorio, P. Dario, 2004) (33).



**Figura 43: singolo modulo del lombrico**

La parte esterna è in silicone in maniera tale da potersi deformare sotto l'azione di molle in lega a memoria di forma comandate elettricamente. Come nel caso precedente, anche per questa applicazione la molla SMA funziona da attuatore, per generare la forza necessaria ad accorciare ed allungare il modulo.

## 4.4. SMA per applicazioni ispirate alle ventose

Nel campo della robotica, sia per interessi industriali che biomedici e aerospaziali, vi è la necessità di sistemi in grado di aderire a superfici differenti e spesso verticali.

Le soluzioni naturali al problema sono differenti, ma tutte molto efficaci. Un esempio già citato e studiato è il gecko; un'altra soluzione molto interessante arriva dal mondo acquatico: le ventose del polipo.



**Figura 44: tentacolo del polipo con ventose**

La conformazione delle ventose del polipo è in grado di aderire con l'anello esterno anche a superfici non lisce grazie alla sua elasticità: crea una camera stagna, le fibre interne accrescono il volume della camera generando una pressione negativa che genera la suzione.

Nel dipartimento di robotica della Shanghai Jiao Tong University (34) sono stati studiati due sistemi bioispirati alle ventose che utilizzano le SMAs.

I metodi di suzione possono essere a pressione negativa o magnetici, questi ultimi però necessitano di materiali metallici. I sistemi bioispirati studiati fino a ora si basano sull'utilizzo di pompe d'aria rumorose e ingombranti, quindi assolutamente inadatti per applicazioni miniaturizzate. La tecnologia SMA garantisce invece compattezza, silenziosità e ottima densità energetica. Tra le due forme di SMA industrialmente interessanti (wire e spring), la pubblicazione in esame ha preso in considerazione le molle poiché garantiscono un allungamento sufficiente, pur perdendo parte della forza di richiamo.

Uno sviluppo sfrutta una memoria di forma a due vie mentre l'altro quella a una singola via.



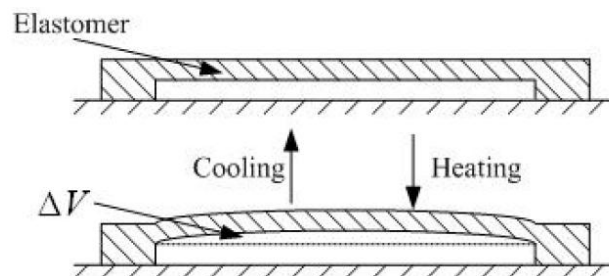


Figura 45: principio di funzionamento della suzione

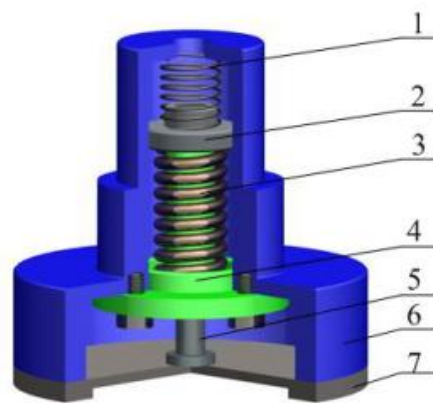


Figura 46: sistema di suzione con SMA a una via

Il sistema è costituito da sette componenti:

1. molla di richiamo
2. guarnizione
3. molla SMA
4. guida
5. giunto
6. cassa
7. elemento elastico

Quando la molla SMA viene scaldata si allunga (ritorno alla fase austenitica), ma poiché inferiormente è bloccata dalla guida, verrà compressa la molla di richiamo e alzato il giunto che genererà la suzione, accrescendo il volume della camera sottostante all'elemento elastico. L'elemento elastico ha la funzione di aderire alla superficie e di creare la camera stagna. La molla di richiamo è necessaria quando la molla, raffreddandosi e tornando in fase martensitica, deve essere ricompresa nella posizione originaria annullando l'effetto di suzione.

Il sistema a due vie sfrutta lo stesso principio, ma presenta l'ulteriore vantaggio dell'eliminazione della molla di richiamo, poiché anche la fase martensitica è geometricamente univoca.

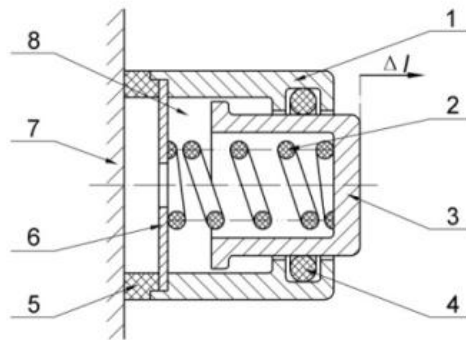


Figura 47: sistema di suzione con SMA a due vie

Si precisa però che le SMA a due vie -o bidirezionali- non sono di grande interesse, in quanto garantiscono la memoria di forma per un basso numero di cicli e con una deformazione inferiore alle monodirezionali.

#### 4.5. SMA per applicazione ispirata alla medusa

Uno degli esseri viventi più antichi, sopravvissuto al processo evolutivo, è la medusa, il cui metodo di locomozione in acqua risulta molto efficiente: il corpo della medusa si contrae producendo un flusso d'acqua che le permette di avanzare.

Per questo si è cercato di replicarla per veicoli sottomarini.

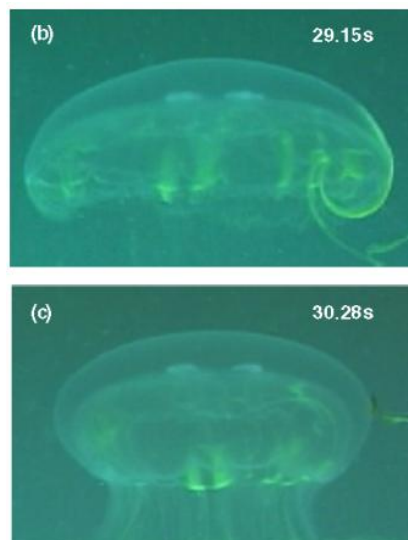


Figura 48: movimento della medusa

Come si può osservare dalla Figura 48, il flusso d'acqua che origina la spinta è generato grazie a una variazione di volume, creata dalla geometria dell'ombrello superficiale dell'animale.

L'unico materiale in grado di replicare, senza l'aggiunta di attuatori tradizionali, il comportamento dell'ombrello della medusa è la lega a memoria di forma.

Uno studio condotto negli USA nel 2009 (35) vaglia diverse possibilità per utilizzare questo principio in applicazioni pratiche. La soluzione migliore sarebbe quella di una lamina SMA che replichi il movimento dell'animale, ma, come già detto, le lamine non garantiscono una ripetibilità sufficiente, idonea per un'applicazione pratica. La scelta di SMA wires che deformano una lamina metallica -non SMA- è perciò la preferibile. Per deformare la lamina si possono trovare diversi metodi di ancoraggio dei fili a memoria di forma, sempre con il medesimo principio di funzionamento.

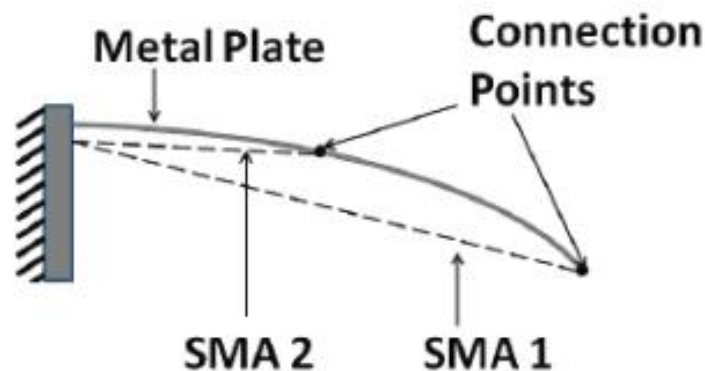


Figura 49: soluzione della medusa con fili SMA in parallelo

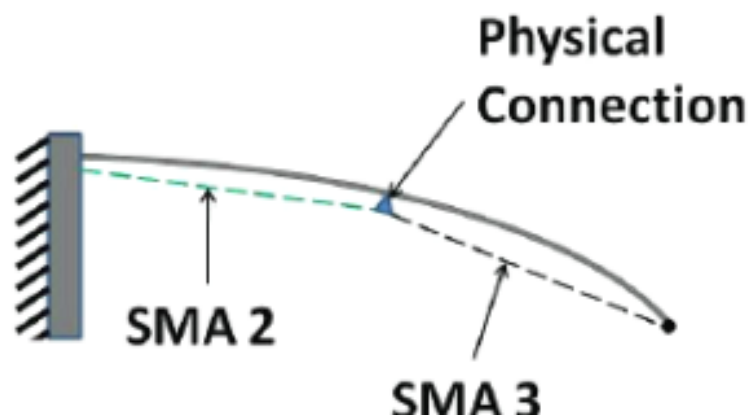


Figura 50: soluzione della medusa con fili SMA in serie

Come si può osservare nelle Figura 49 Figura 50, sfruttando la simmetria della medusa, si studia solo una delle due metà, per poi unirle tramite un ancoraggio centrale, che funziona da vincolo per entrambe le lamine metalliche.

La prima soluzione ipotizza l'utilizzo di due fili SMA in parallelo, giuntati da un lato al vincolo corrispondente all'asse di simmetria e dall'altro lato in due punti differenti; tutti i punti di giunzione filo-ombrello sono rigidi. La seconda soluzione prevede invece due fili in parallelo connessi da una giunzione, legata al profilo metallico che si vuole incurvare; in questo caso la giunzione che collega entrambi i fili all'ombrello è di tipo mobile e può scorrere sull'ombrello stesso.

## 4.6. SMA per applicazioni ispirate allo scarafaggio

### 4.6.1. SMA per controllo rigidità

In numerose applicazioni variano le condizioni di carico legate allo specifico utilizzo di un generico dispositivo. In tali casi vi è la necessità di avere materiali in grado di adattare le loro proprietà in base alla funzione effettuata.

Un esempio pratico è quello dei robot biomimetici con fini esplorativi. Si è riscontrato che la natura, per la locomozione terrestre su superfici accidentate, utilizza soluzioni con più arti. Nascono così diversi robot ispirati agli scarafaggi, i più famosi sono Rhex (36) e Sprawlita (37).

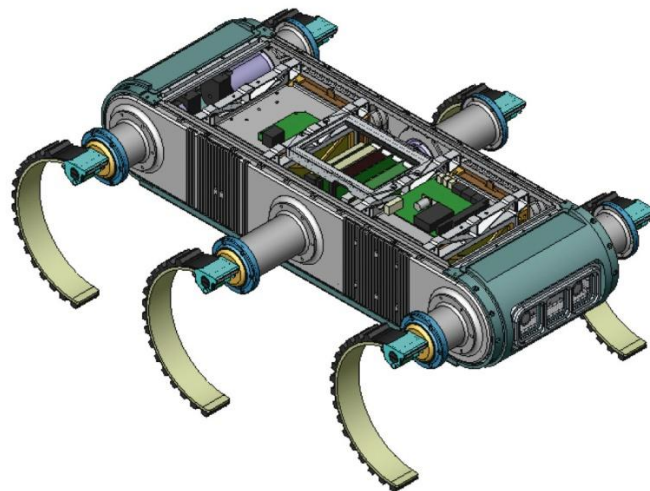


Figura 51: robot esapode Rhex

La locomozione di questi robot (ne esistono diversi ma con lo stesso principio di funzionamento) avviene grazie alla rotazione asincrona delle "zampe". Si è riscontrato che nel caso naturale le manovre sono facilitate da una variazione della rigidità degli arti. È stato perciò studiato un sistema che, grazie alle SMA, può replicare questo comportamento.

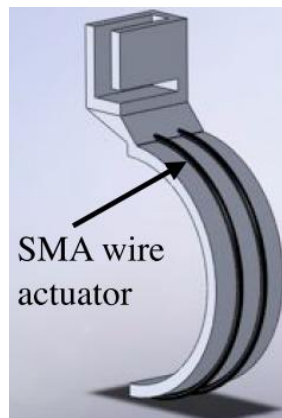


Figura 52: SMA wires per controllo rigidità

Grazie all'applicazione di fili in lega a memoria di forma risulta possibile controllare la rigidità dell'arto, con la possibilità di accrescere anche la capacità di assorbimento degli urti.

#### 4.6.2. SMA per movimentazione robot

Esiste anche un'altra applicazione (38) ispirata allo scarafaggio che utilizza le SMA direttamente per la locomozione.

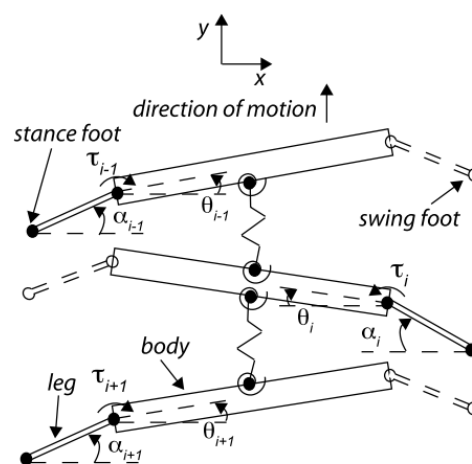
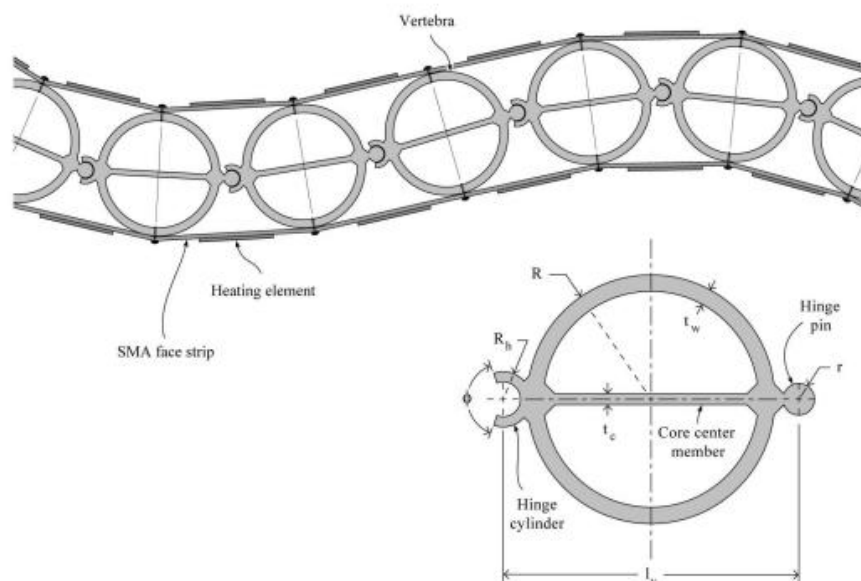


Figura 53: robot ispirato allo scarafaggio

In questo caso il movimento avviene grazie alle forze generate dalle leghe a memoria di forma. I tre segmenti che compongono il corpo possono ruotare in due direzioni; in modo tale da poter sollevare, in maniera alternata, un arto e poi farlo ruotare in avanti. Nella Figura 53 sono rappresentate con le linee tratteggiate le zampe sollevate da terra, mentre con linee continue quelle in appoggio. Ogni segmento può ruotare in maniera indipendente, spostando in avanti la zampa sollevata, che nella movimentazione successiva sarà quella in appoggio.

#### 4.7. SMA per applicazione ispirata alla colonna vertebrale

In molte applicazioni vi è la necessità di superfici mobili che siano leggere e in grado di mantenere la forma anche in presenza di carichi esterni. L'osservazione della natura ha portato alcuni ingegneri della University of Virginia (39) a sviluppare un'applicazione bioispirata alla colonna vertebrale.



**Figura 54: struttura bioispirata alla colonna vertebrale**

Come si può osservare nella Figura 54 ogni vertebra artificiale dispone di un attacco maschio e uno femmina in maniera tale da poter unire più vertebre lasciando un grado di libertà. Per comandare la rotazione, e quindi la geometria della superficie risultante, tutte le vertebre sono collegate a un filo Ni-Ti. Ogni spazio tra le vertebre è controllabile grazie a un elemento scaldante.

## **5. Applicazioni SMA e Biomimicry Taxonomy**

Nel capitolo precedente sono stati esposti tutti i risultati della ricerca bibliografica delle applicazioni che sfruttano il connubio bioispirazione-SMA. Tutte le pubblicazioni si basano sull'esigenza dello svolgimento di una generica funzione e scelgono un esempio naturale che svolge in maniera ottimale la funzione stessa. Ogni applicazione si basa però sullo svolgimento di numerose sottofunzioni, per le quali si è scelta la tecnologia SMA. Il criterio che fa cadere la scelta sulle leghe a memoria di forma è quella dell'ottimizzazione dell'applicazione. In tutte le pubblicazioni sono state escluse le strategie tradizionali in favore della lega Ni-Ti per motivi di compattezza rispetto ai classici attuatori, così da mantenere un ottimo rapporto peso/potenza.

Tutti gli studi affrontati spiegano l'animale o la struttura naturale a cui si ispirano senza spiegare però il procedimento che ho portato a prendere spunto da quella soluzione naturale. Non viene citata nemmeno la catalogazione rispetto alla tassonomia biomimetica.

Sarà pertanto compito del presente capitolo la decodifica ex post della ricerca biomimetica effettuata dai vari autori; si ricostruirà quindi la strada che li ha portati alla specifica soluzione naturale.

Ogni applicazione comprende più sottofunzioni, anch'esse catalogabili. Si provvederà quindi alla catalogazione, secondo i criteri della biomimicry taxonomy, sia della soluzione generale che delle sottofunzioni svolte con l'impiego della memoria di forma. Può verificarsi che non vi sia piena corrispondenza tra l'animale a cui ci si ispira nella pubblicazione e la tassonomia; in questo caso vi sarà certamente un'altra soluzione naturale catalogata sovrapponibile, in quanto a funzione svolta, a quella presentata nell'articolo.

La ricerca per la catalogazione avviene tramite Asknature.org. In alcuni casi il motore di ricerca interno trova direttamente la soluzione naturale legata all'ispirazione dello studio; in caso contrario la ricerca si espande a tutta la tassonomia.

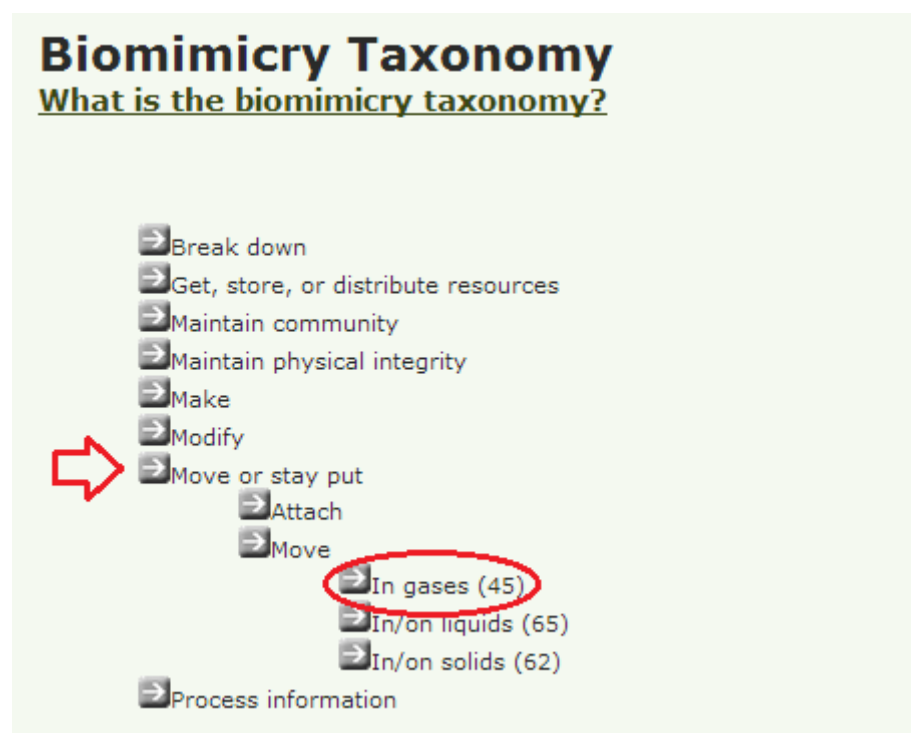
### **5.1. Applicazione ispirata al pipistrello**

Nel caso del volo del pipistrello si possono individuare differenti fonti di ispirazione che hanno portato allo sviluppo dell'applicazione.

Si cerca ora di ricostruire i passaggi che hanno portato gli studiosi a scegliere il pipistrello. Alla luce di quanto osservato nelle pubblicazioni si può affermare che la base di partenza è la ricerca di soluzioni naturali che possano risultare utili all'ottimizzazione dei MAVs; ciò pone innanzi tutto un vincolo

dimensionale poichè il veivolo deve disporre dello spazio necessario all'attrezzatura. La ricerca sarà volta quindi al movimento in aria di volatili di taglia medio-piccola (nell'articolo si parla di circa 10 cm) che garantiscano la massima manovrabilità possibile. Nel caso specifico si fa anche riferimento alla leggerezza, parametro fondamentale per accrescere il raggio di azione della futura applicazione bioispirata

Certamente la prima ricerca effettuata è stata il generico "movimento in aria", al fine di individuare il metodo che la natura utilizza per il volo nei casi di volatili medio-piccoli.



**Figura 55: ricerca movimento in aria**

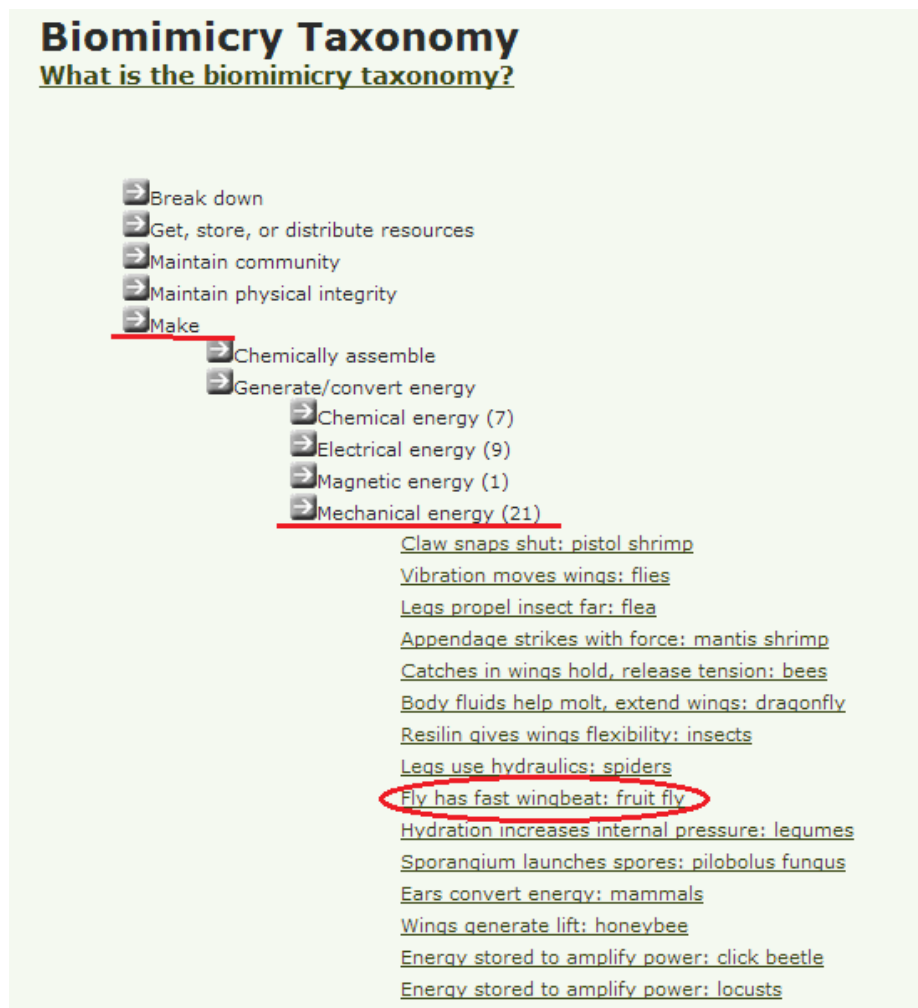
Come si può constatare nella Figura 55, il menù a tendina (40) propone otto macrocategorie. La voce da scegliere è "move or stay put", a questo punto si può scegliere tra le funzioni "fissare" o "muovere". Selezionata quest'ultima non resta che scegliere tra i tre stati della materia. Come si può osservare le prime suddivisioni sono molto generiche, mentre a ogni scelta effettuata ci si dirige verso un grado di dettaglio crescente, per concludere con le soluzioni specifiche. Il numero inserito fra parentesi indica il numero di soluzioni presenti per quella data funzione.

Una volta esplosa la funzione "In gases" si analizzano le 45 strategie naturali alla ricerca del metodo di volo relativo ai volatili della taglia interessata.



Esaminando tutte le strategie naturali si riscontra che tutti i volatili di piccola taglia si muovono sbattendo le ali, con frequenze crescenti inversamente alle dimensioni.

Una delle soluzioni naturali ivi catalogata spiega come il volo degli insetti sia molto performante grazie al battito delle ali che mantiene una regione vorticoso chiamata LEV. Per trovare riscontri pratici riguardo a quest'analisi di massima torniamo alle macrocategorie e ripetiamo il procedimento di ricerca.



**Figura 56: ricerca metodo di volo per piccoli volatili**

La ricerca è ora volta al metodo con il quale viene generata la forza necessaria al volo. Il riscontro viene individuato nel volo degli insetti; visualizzando la soluzione specifica, viene spiegato come l'evoluzione dei piccoli volatili è legata all'elevata frequenza del loro battito di ali (41).

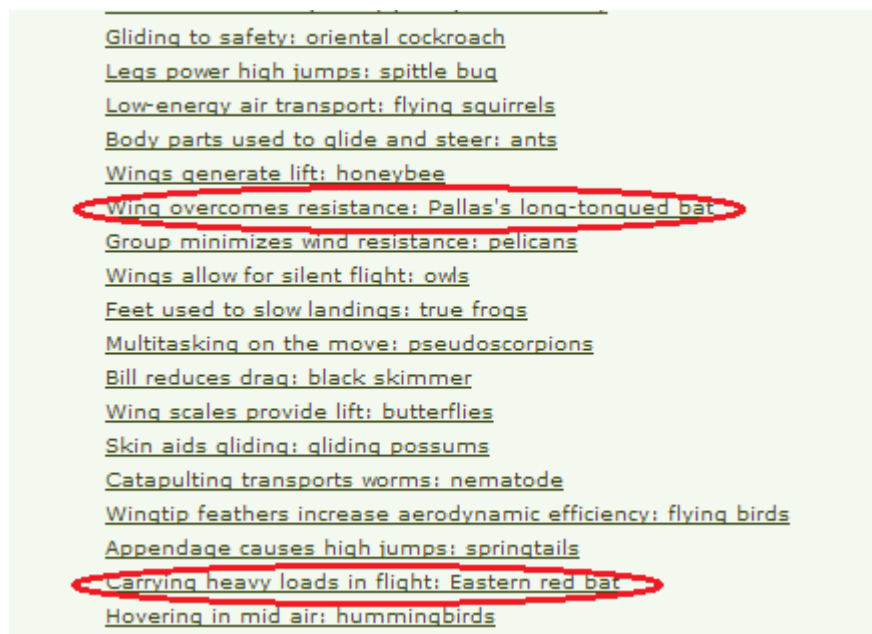
Ciò spiega la ragione per la quale le pubblicazioni in esame affermano che per piccoli veivoli -imitando la natura- sia preferibile generare il volo attraverso dei profili alari in movimento alternato.

Dopo aver compreso e catalogato la scelta del metodo di volo, si passa alla catalogazione della soluzione biologica.

La scelta ricade sul pipistrello per due ragioni particolari: le dimensioni e l'agilità.

La necessità dei MAVs di trasportare strumentazioni impone una dimensione superiore a quella dei più comuni insetti (si necessitano una decina di centimetri).

Tra tutte le soluzioni naturali in grado di muoversi in aria, quella che garantisce più agilità è proprio il pipistrello.



**Figura 57: pipistrello nella biomimicry taxonomy**

Effettivamente, tra le quarantacinque soluzioni per "move in gases", il pipistrello è citato per ben due volte (si tratta di due specie differenti); la prima per la stabilità del suo volo (42) e la seconda per la capacità di sorreggere carichi (43) in volo: caratteristica importante per le applicazioni richieste.

È stato così compreso il procedimento che ha portato alla soluzione biologica del pipistrello ed è stata catalogata, secondo i parametri della tassonomia biomimetica.

Una volta scelto l'animale a cui ispirarsi, e la tipologia di volo, bisogna scontrarsi con lo svolgimento delle sottofunzioni che rendono possibile la

replica artificiale della strategia del volo del pipistrello. Sarà quindi necessaria un'ulteriore ricerca per lo sviluppo dell'energia che muove le ali.

Non è sempre detto che venga trovata una tecnologia adatta alla replica della soluzione naturale, in tal caso ci troveremmo a un punto morto e bisognerebbe cambiare bioispirazione in attesa di una tecnologia adatta allo scopo.

La natura dispone di fibre muscolari che contraendosi/elongandosi generano l'energia necessaria alla movimentazione delle ali. Nell'articolo si spiega che l'utilizzo di classici attuatori elettrici o idraulici appesantirebbe eccessivamente la struttura e si eliminerebbero i vantaggi dovuti al metodo di volo bioispirato. Risulterebbero energeticamente più convenienti i MAVs già esistenti. Con l'avvento delle leghe a memoria di forma si dispone di attuatori con un rapporto peso/potenza molto inferiore.

Nel caso del Batmav le SMA sono sfruttate per imitare muscoli e articolazioni.

Compresa la scelta dell'utilizzo di fili Ni-Ti bisogna catalogare la loro funzione, sempre seguendo i parametri proposti dalla biomimicry taxonomy.

Si cercheranno quindi le sottofunzioni svolte dagli SMA wires all'interno della tassonomia; nel nostro caso la funzione è generare l'energia necessaria a muovere le ali.

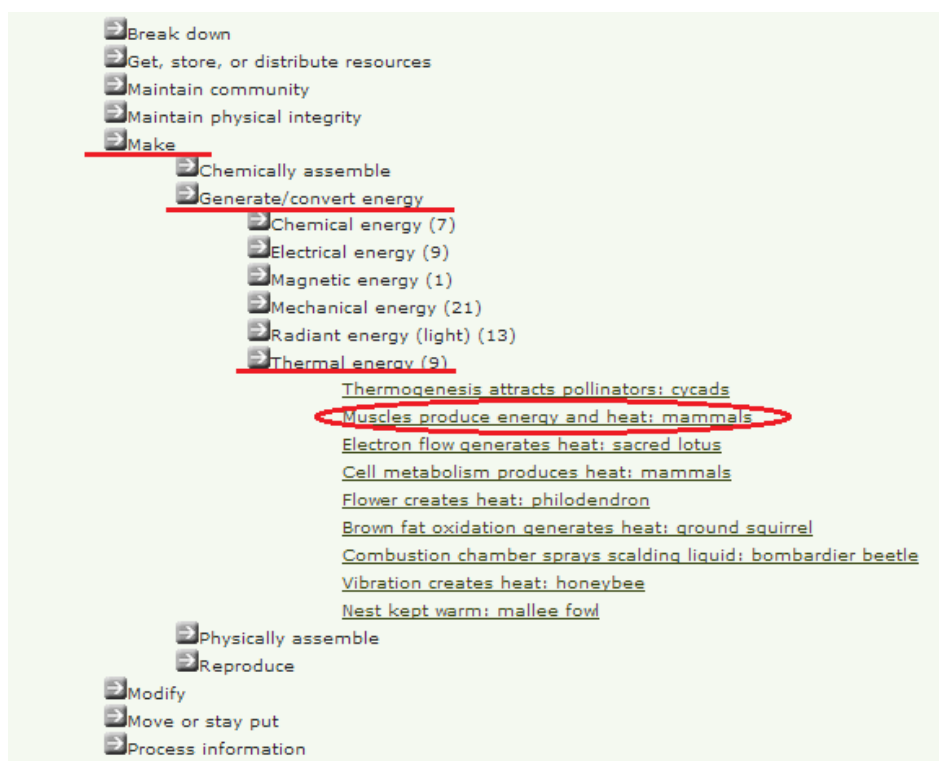
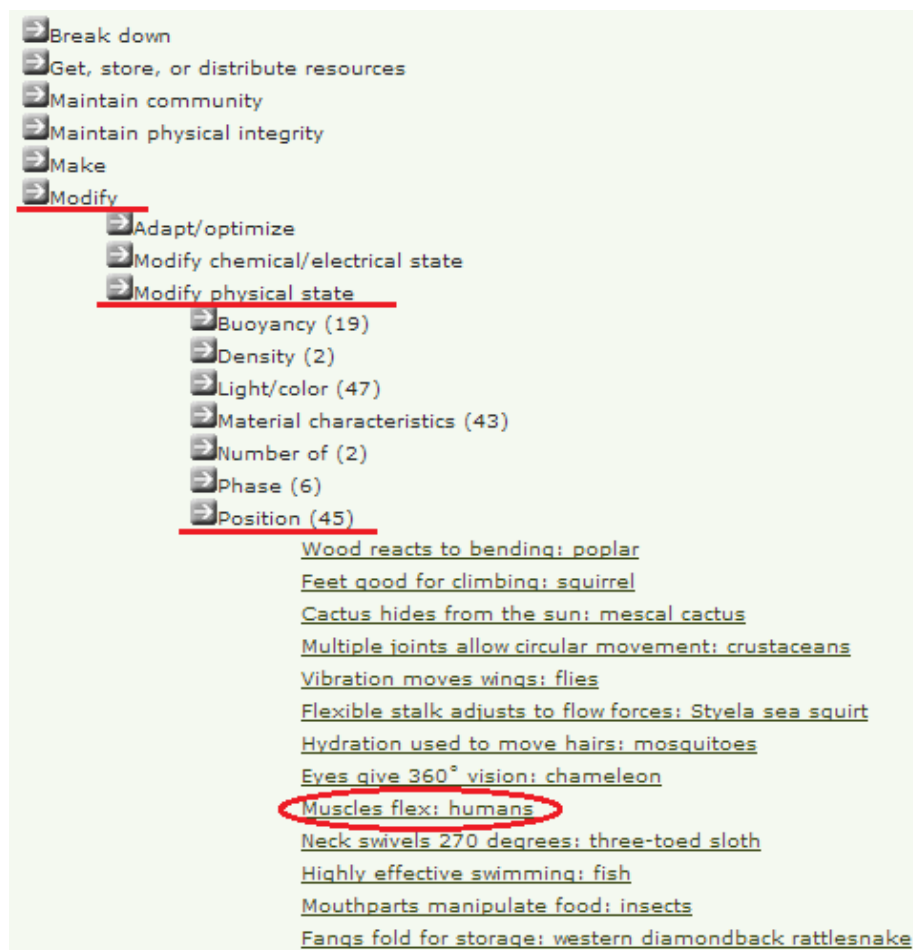


Figura 58: sottofunzione del muscolo nella tassonomia

La soluzione naturale del muscolo, oltre a dare energia meccanica, genera anche calore ed è sotto questa funzione che è catalogato (44) il muscolo dei mammiferi. La sola generazione di energia meccanica è molto intuitiva, mentre nel campo "mechanical energy" si trovano soluzioni naturali meno palesi. Esiste un'ulteriore catalogazione dei muscoli nel gruppo "Modify", sottogruppo "Modify physical state" e nella funzione "Position". La strategia specifica è quella dei muscoli umani (45) e viene spiegato a livello chimico-biologico il loro funzionamento.



**Figura 59: Ulteriore catalogazione della funzione del muscolo**

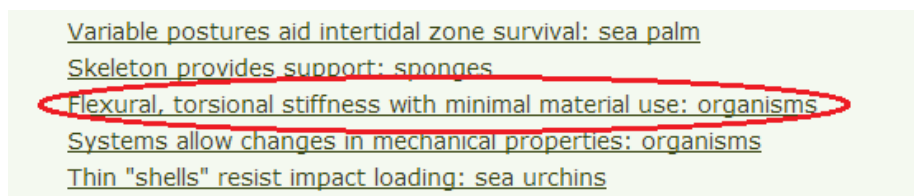
Ai fini del nostro lavoro sono valide le due schematizzazioni in quanto entrambe racchiudono il lavoro svolto dalle SMA. La prima è però ritenuta più completa, perché tiene in considerazione anche il calore generato, dato che le SMA necessitano di essere riscaldate per poter sfruttare le loro proprietà. In applicazioni dove fosse problematico l'innalzamento della temperatura bisognerebbe perciò tener presente anche il suddetto fattore.

La funzione che le SMA svolgono nel Batmav a sostituzione delle articolazioni è anch'essa catalogabile (46).



**Figura 60: funzione dell'articolazione nella tassonomia**

La macrofunzione è quella del mantenimento dell'integrità fisica e la sottofunzione è quella di resistere a compressione.



**Figura 61: sottofunzione dell'articolazione nella tassonomia**

Un'ulteriore possibile schematizzazione della funzione delle articolazioni giunge dalle giunzioni dei coralli.

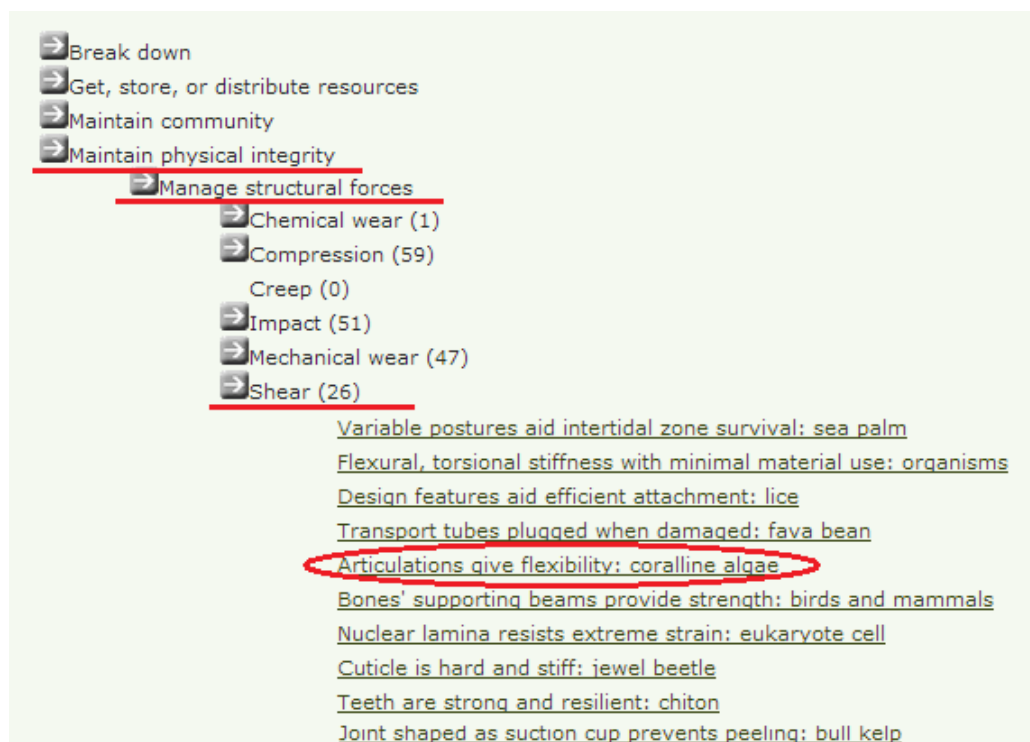


Figura 62: ulteriore catalogazione dell'articolazione

Quest'ultima catalogazione (47) non è ovviamente inerente al volatile ispiratore del Batmav, ma è assolutamente corrispondente alla sottofunzione svolta dalle giunzioni SMA. Ciò a dimostrazione che sottofunzioni identiche vengono svolte dalla natura con meccanismi simili, anche in ecosistemi molto differenti. Spesso è necessario catalogare secondo la specifica funzione e non in base alla soluzione naturale.

## 5.2. Applicazioni ispirate al movimento dei pesci

Il movimento ondulatorio di molti animali acquatici ha ispirato diverse applicazioni per UUVs.

Per comprendere ogni bioispirazione che muove un progetto è necessario osservare tutte le strategie naturali sviluppate. La natura ha affinato ogni movimento del pesce in base all'ecosistema nel quale vive e alle esigenze della singola specie.

Esistono cinque tipologie differenti di moto ondulatorio, ognuna di esse legata alla tipologia di comportamento dell'animale:

- nuoto anguilliforme (ondulatorio tipico di pesci flessuosi come l'anguilla, adatto per basse velocità e forti accelerazioni);

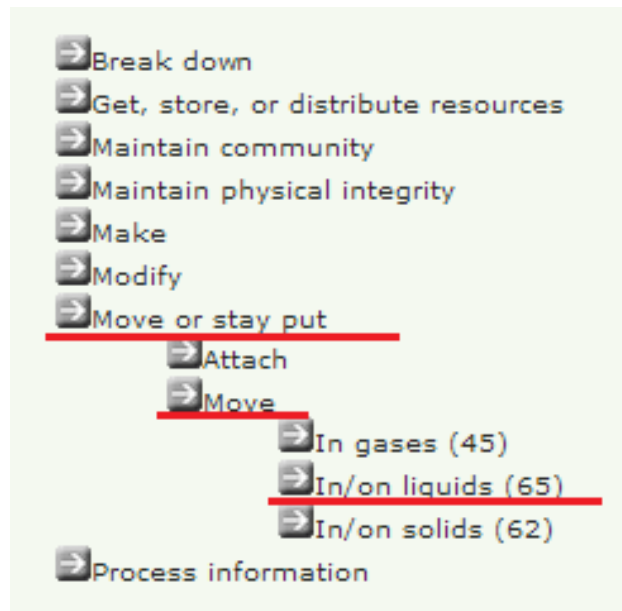
- nuoto subcarangiforme (simile al precedente, ma con minore ampiezza delle oscillazioni, perfetto per forti accelerazioni e rapide girate);
- nuoto carangiforme (oscillazioni limitate alla regione caudale, tipico di merluzzi e tonni rossi, caratterizzato da un basso dispendio di energie);
- nuoto tunniforme (generato esclusivamente dalla coda, garantisce velocità molto elevate, ma scarsa manovrabilità e accelerazione);
- nuoto raiforme (tipico delle razze generato da larghi muscoli pettorali).

Una volta individuati i punti di forza di ogni tipologia di nuoto, si sceglierà di imitare quello che più si confà all'applicazione richiesta.

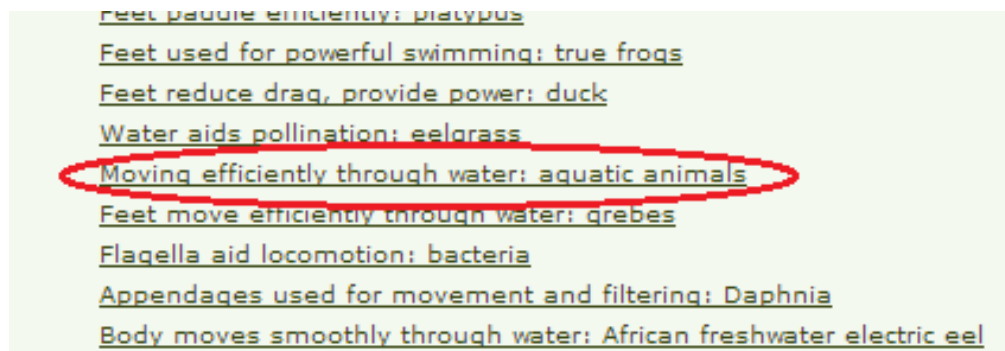
Nel caso in esame ciò che conta è l'efficienza energetica e quindi la scelta ricadrà sul nuoto carangiforme.

Nel nostro caso si cerca di catalogare le bioispirazioni già sfruttate, con l'intento di eliminare le voci della tassonomia corrispondenti per una successiva ricerca. Ogni applicazione andrà perciò catalogata secondo la particolare strategia naturale scelta, o in maniera più grossolana, secondo il movimento ondulatorio dei pesci, così da segnare tutte le voci già sfruttate per una progettazione bioispirata.

Come nel caso del pipistrello, il moto ondulatorio è l'ispirazione base da catalogare, ma sarà necessario inquadrare, secondo la tassonomia, anche tutte le sottofunzioni che portano al suddetto movimento ondulatorio.



**Figura 63: movimento in liquido sulla tassonomia**



**Figura 64: soluzione generica del movimento dei pesci**

Una volta catalogato (48) il generico movimento ondulatorio proprio dei pesci, bisogna inquadrare la funzione degli SMA wires che generano l'energia necessaria a incurvare le parti mobili.

La funzione dei fili di lega a memoria di forma è, come nel caso del pipistrello, quella di sostituire i muscoli che movimentano le superfici mobili. Sul punto pertanto si rimanda alla catalogazione (44) del caso precedente.

Si ricordi altresì che la geometria del corpo dei pesci è ottimizzata in base alla funzione e che anch'essa è fonte di ispirazione.

### **5.3. Applicazioni ispirate al lombrico**

Il movimento di compressione-espansione, visto nelle pubblicazioni esposte nel capitolo precedente, è comune sia al lombrico che a tutti gli anellidi.

Anche in questo caso, come nei precedenti, si vogliono classificare sia l'ispirazione biologica generale (cioè il movimento tipico degli anellidi), sia le sottofunzioni che ne permettono la locomozione. Nel primo caso si ricerca nella tassonomia la tipologia di locomozione su terra tipica del lombrico, successivamente si individueranno le sottofunzioni svolte sfruttando le SMA.

Vi è la possibilità di classificare la soluzione biologica del movimento in due campi differenti.

La prima classificazione (49) è strettamente legata alla funzione "muoversi in/su solidi"; la seconda (50) invece si riferisce alla tipologia di movimento basata sulla variazione di volume ed è classificata tra le soluzioni di modificazione di superficie, massa o volume.





Figura 65: prima classificazione del movimento del lombrico

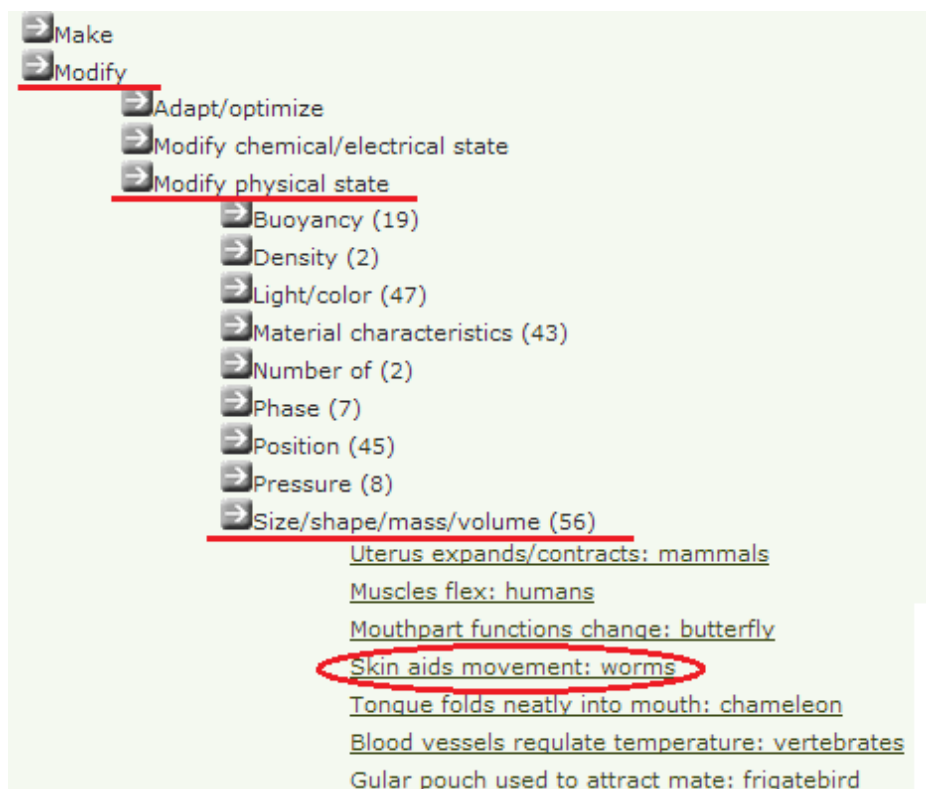


Figura 66: seconda classificazione del movimento del lombrico

Ugualmente ai due casi precedenti, le leghe SMA sostituiscono la funzionalità che nel caso biologico sono svolte dai muscoli longitudinali e circolari. Ne consegue che anche la classificazione nella tassonomia biomimetica rimane invariata rispetto ai casi precedenti.

## 5.4. Applicazione ispirata alle ventose del polipo.

Come spiegato negli articoli, la soluzione naturale per l'adesione temporanea alle superfici, è basata sulla generazione di suzione. È proprio la generazione di una depressione e i metodi che la natura utilizza per crearla che vanno catalogati secondo la biomimicry taxonomy, per essere poi scartati in una successiva ricerca di nuove soluzioni.

Le applicazioni bioispirate ai tentacoli del polipo possono essere in realtà classificate in più categorie, poichè sono molteplici i sistemi naturali che sfruttano la suzione tramite depressione.

Di seguito si mostra unicamente la classificazione (51) per la soluzione trattata nell'articolo: quella del polipo. Un'ulteriore schematizzazione (52) potrebbe essere quella dell'erba vescica "bladderwort": una pianta carnivora che sfrutta la suzione per catturare piccole prede. Le pareti della "vescica" possono espandersi rapidamente generando l'effetto di risucchio. Il concetto di funzionamento è molto simile a quello delle applicazioni proposte.



Figura 67: catalogazione della suzione del polipo

Nel caso in questione le SMA, sotto forma di molla, servono a deformare le pareti in modo tale da generare pressioni negative.

La classificazione risulta perciò la medesima dei casi precedenti.

Nel caso in cui fosse stata una lamina in Ni-Ti che deformandosi, senza l'azione di molle, avesse creato l'effetto suzione, la classificazione citata dell'erba vescica avrebbe racchiuso anche la funzione svolta dalle SMA. Le pareti della vescica sarebbero state sostituite fedelmente dalla lamina a memoria di forma.

## 5.5. Applicazione ispirata alla medusa

Animali con origini molto antiche, precedenti a quelle dei pesci, già svilupparono un metodo efficiente per muoversi nell'ecosistema marino. Il concetto fisico con il quale si muovono le meduse è quello di produrre, tramite superfici a geometria variabile, un getto di liquido. Per un bilancio di quantità di moto tale getto permette all'animale di accelerare.

Il sistema di propulsione a getto è tipico di più specie come i calamari, i polipi e le seppie. In prima analisi si cerca di catalogare il sistema di locomozione scelto come ispirazione biologica.

Il caso delle meduse è catalogato tramite una voce apposita (53), poiché si tratta di una propulsione a getto particolarmente raffinata: crea dei caratteristici vortici ad anello che le permettono una spinta maggiore.

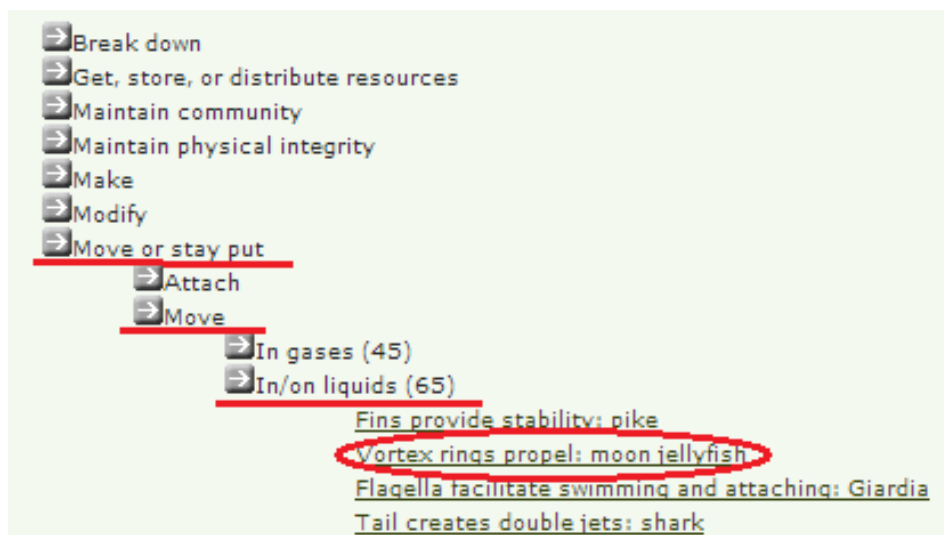


Figura 68: catalogazione del movimento della medusa

Anche nel caso di questa pubblicazione gli SMA wires agiscono da muscoli. L'applicazione con l'utilizzo di lamine SMA sarebbe certamente più vicina alla

soluzione naturale, ma industrialmente non interessante, a causa della già citata scarsa ripetibilità.

## 5.6. Applicazioni ispirate allo scarafaggio

Nel caso di terreni accidentati la soluzione a zampe multiple permette certamente una locomozione efficace.

La soluzione specifica del movimento a zampe multiple non è catalogata sotto l'esempio degli scarafaggi perciò si ricerca nella più ampia categoria degli insetti della quale le blatte fanno parte.

Il caso degli insetti è catalogato (54) come soluzione che garantisce di fermarsi repentinamente senza cadere, grazie alla presenza di numerosi arti.

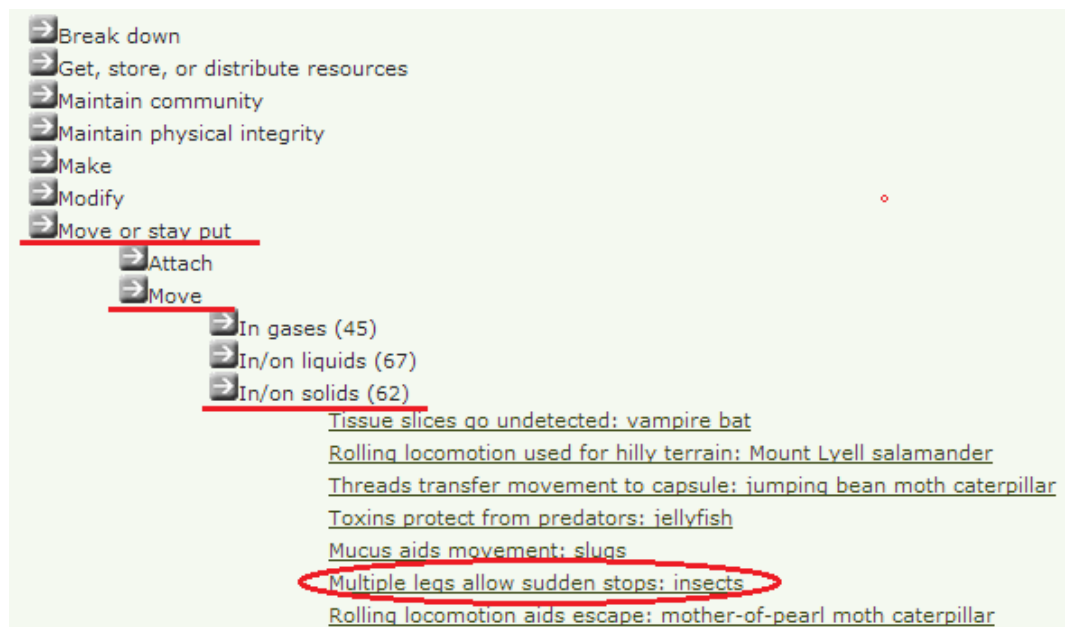


Figura 69: catalogazione zampe scarafaggio

Dopo aver catalogato l'animale, a cui lo studio si ispira, bisogna inquadrare, secondo i parametri della tassonomia, anche le sottofunzioni svolte con le leghe a memoria di forma.

Le applicazioni delle leghe SMA, in questo caso, sono due. Una è quella sostitutiva dei muscoli, come nei casi precedenti. L'altra funzione è quella di variare la rigidità delle zampe, pertanto è differente la sua catalogazione. Tramite la ricerca di "vary stiffness" cioè variare la rigidità non si trova la soluzione specifica dello scarafaggio, ma quella dell'equiseto (55) (pianta vescicolare) che racchiude in se il concetto della variazione delle proprietà meccaniche.

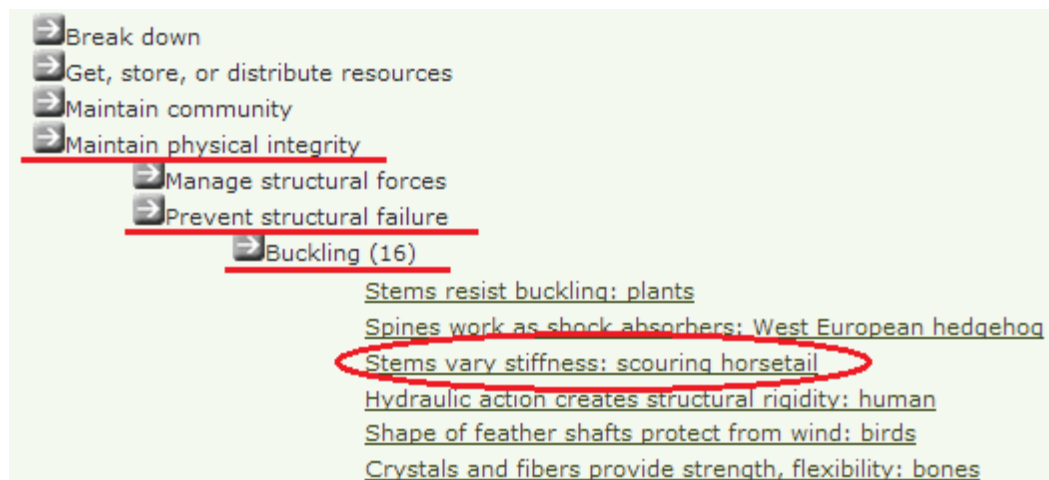


Figura 70: catalogazione della funzione variare le rigidità

## 5.7. Applicazione ispirata alla colonna vertebrale

L'ultima pubblicazione incontrata si ispira alla colonna vertebrale dei vertebrati in genere, per lo sviluppo di una superficie a geometria variabile che garantisca buone doti di robustezza.

Per quanto riguarda la catalogazione della colonna vertebrale si trova pieno riscontro all'interno della tassonomia biomimetica.

Nel gruppo "Move or stay put", sottogruppo "Attach" e funzione "Temporarily" troviamo la soluzione (56) della colonna vertebrale del toporagno.

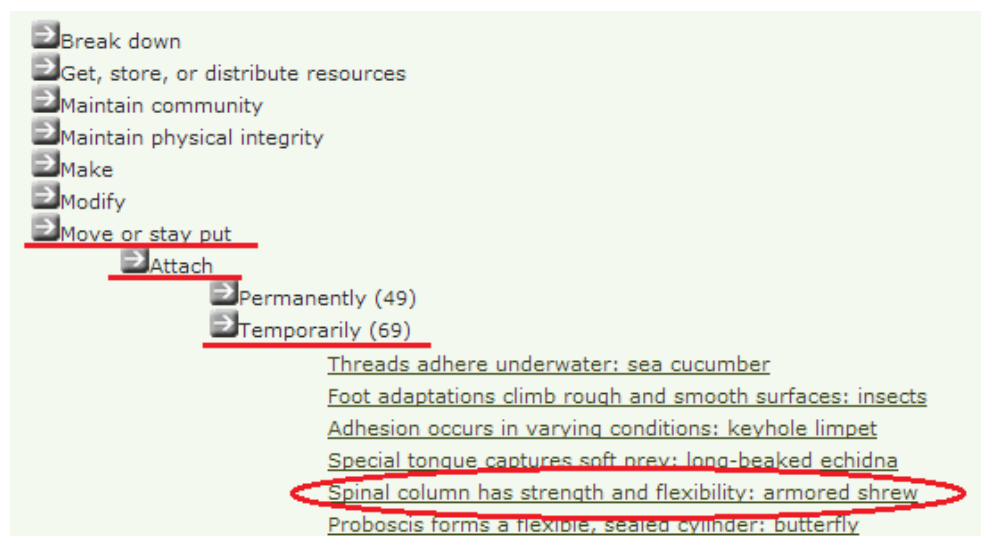


Figura 71: catalogazione della flessibilità-robustezza della colonna vertebrale

Asknature ha scelto questo animale come esempio di robustezza e flessibilità della colonna vertebrale poiché presenta delle interconnessioni particolari che rendono le giunzioni molto robuste.

Per quanto riguarda la funzione svolta dalle SMA si tratta sempre dell'imitazione di ciò che in natura fanno i muscoli.

## **6. Ricerca biomimetica per applicazioni SMA innovative**

Il presente lavoro ha l'intento di spiegare l'utilizzo sistematico della biomimicry taxonomy per la progettazione bioispirata. Nel capitolo precedente sono state catalogate, secondo la tassonomia biomimetica, le soluzioni biomimetiche che si basano sull'utilizzo di SMA.

Nel caso delle pubblicazioni trattate precedentemente la base di partenza era la necessità di trovare un'applicazione innovativa, che fosse caratterizzata da migliori performance rispetto alle applicazioni già in produzione. La ricerca in questi casi era già guidata, in quanto nota a priori la funzione da soddisfare. Il lavoro da compiere consisteva nell'individuazione, tramite la biomimicry taxonomy, della strategia naturale che meglio sviluppava la funzione ricercata. Una volta individuato l'esempio biologico si affrontava il problema delle sottofunzioni da svolgere per l'imitazione della generica funzione.

Nel caso dei veicoli sottomarini senza umani a bordo, ad esempio, il primo passo è stato quello di individuare il metodo adottato dalla natura per muoversi efficientemente in acqua. Riconosciuto il moto ondulatorio dei pesci rimaneva da scegliere la tipologia di nuoto che più si avvicinava alle esigenze applicative (velocità, risparmio energetico o agilità). La seconda analisi era, per sviluppare il moto ondulatorio, quella di studiare il metodo per replicare le varie sottofunzioni; come la generazione dell'energia necessaria a incurvare una superficie. Solo a questo punto veniva preso in considerazione l'utilizzo di leghe a memoria di forma perché sono quelle che, mantenendo dimensioni ridotte, garantiscono il rapporto peso/potenza migliore.

Nel seguente capitolo, il lavoro compiuto è differente. Si ipotizza di avere a disposizione degli smart materials e ci si muove all'interno del portale Asknature.org, alla ricerca di nuovi impieghi biomimetici delle leghe a memoria di forma.

Ciò significa che la ricerca non è vincolata allo svolgimento di una funzione. In questo caso la ricerca è vincolata all'utilizzo di leghe a memoria di forma e la funzione da svolgere diventa l'elemento di ricerca.

L'intento generale, oltre all'individuazione di possibili soluzioni, è quello di mostrare i passi da seguire per la progettazione biomimetica.

Come già accennato, la vastità di soluzioni naturali, obbliga chi cerca una bioispirazione, a utilizzare un approccio sistematico per poter vagliare realmente tutte le funzioni naturali conosciute.

Senza il sostegno di una "biblioteca" delle soluzioni naturali e senza uno schema logico che vincoli la ricerca, l'individuazione delle soluzioni biologiche che svolgono la funzione ricercata risulterebbe molto complicata.

Il processo per l'individuazioni di applicazioni bioispirate si basa su tre passi.

Il primo è quello di eliminazione delle voci -siano esse gruppi, sottogruppi o funzioni- che certamente non possono basarsi sull'utilizzo di SMA. Chiaramente le strategie già sfruttate, catalogate nel capitolo 5., fanno parte delle voci eliminate. Ciò serve a velocizzare il successivo lavoro di valutazione.

Il secondo passo è, per le parti non scartate al punto uno, quello di esplodere ogni funzione e valutare le strategie naturali in esse contenute una a una. Quelle che permettono un utilizzo della tecnologia SMA vengono segnate per il passo successivo.

Il terzo e ultimo step è quello in cui si osservano a fondo le strategie naturali, scelte al punto due, e si valuta la fattibilità di un eventuale sviluppo bioispirato. In questa fase si cerca altresì che non vi siano già in produzione soluzioni simili o più efficaci senza l'utilizzo degli smart materials.

La trattazione prenderà in considerazione, dopo aver mostrato il procedimento iniziale di ricerca nella tassonomia, due casistiche: la prima è quella che porta a un punto morto; la seconda invece è quella che porta a possibili sviluppi tecnologici.

In realtà la ricerca è stata molto più completa, coprendo tutte le categorie della tassonomia, salvo quelle escludibili a priori.

## **6.1. Campi della tassonomia eliminabili a priori**

Poichè, come detto, l'ipotesi iniziale è quella dell'utilizzo di leghe SMA per applicazioni bioispirate, si cerca di restringere il campo di ricerca; si eliminano quindi le categorie della tassonomia che non risultano intersecabili con il materiale di partenza.

Per fare ciò è necessaria una visione completa, ma non eccessivamente dettagliata, della biomimicry taxonomy. Certamente la schematizzazione a mezza luna rende possibile una visione più completa, senza visualizzare le soluzioni specifiche, ed è quindi, in tale caso, maggiormente indicata.

Il menù a tendina è molto più utile nel caso di ricerca specifica, quando si conosce già la funzione da svolgere e l'intento è quello di capire gli strumenti con i quali la natura la svolge. Per questo motivo nei capitoli precedenti si è prescelta tale visualizzazione della tassonomia. La catalogazione presuppone la conoscenza della soluzione, come nel caso precedente dove ci si basava sulle pubblicazioni scientifiche.

L'individuazione delle soluzioni già studiate nella tassonomia è servita sia a esplicitare il funzionamento e la struttura dell'inventario, sia a escludere soluzioni che sarebbero risultate ridondanti.

Lo schema è strutturato a tre livelli: gruppi, sottogruppi e funzioni; il quarto livello corrisponderebbe alle soluzioni specifiche visualizzabili nel menu a tendina. La lettura e la ricerca devono seguire sempre un ordine di dettaglio crescente, partendo dai gruppi si arriva alla funzione specifica solo attraverso i sottogruppi e le funzioni.

In alcuni gruppi sono stati eliminati dei sottogruppi, solo dopo aver verificato che le funzioni -e in analisi generale anche le soluzioni specifiche, tramite l'utilizzo del menu a tendina- non presentassero soluzioni interessanti. Nel momento in cui una sola strategia naturale, afferente a un sottogruppo, non è stata scartata, non è stato eliminato il sottogruppo stesso.

Verranno ora brevemente spiegate le motivazioni per ogni sezione eliminata.

Per quanto concerne il sottogruppo "Chemically break down", afferente al gruppo "break down", tutte le sue funzioni sono legate all'azione chimica di rottura di materiali biotici e non.

Le caratteristiche tipiche delle leghe a memoria di forma sono: la memoria di forma, la superelasticità contraddistinta da notevoli forze di richiamo elastico e la capacità di assorbire energia.

Chiaramente il loro utilizzo, a scapito di altre soluzioni e materiali, sarà legato a una di queste loro peculiarità.

Come sarà facilmente intuibile, le qualità delle SMA non sono compatibili con il sottocampo citato.

Nel gruppo "make" è stato eliminato un solo sottogruppo: "reproduce". Sono state altresì eliminate diverse funzioni di "Make" ritenute non attinenti con le SMA.

All'interno del sottogruppo "chemically assemble" sono state eliminate tutte le funzioni a meno di "metal-based compound" proprio perchè le SMA sono a base metallica.

Nel sottocampo "Generate/convert energy" sono state eliminate le funzioni relative all'energia luminosa, magnetica e chimica, le quali non sono caratteristiche legate alle peculiarità della lega Ni-Ti. Sono state lasciate invece le voci sull'energia meccanica, elettrica e termica che potrebbero interessare proprio il funzionamento delle leghe, che si basa infatti sulla conversione di energia da elettrica a termica per effetto Joule.

Viene eliminato completamente il sottogruppo "reproduce", che conta una sola funzione: "self replicate" che non contiene alcuna strategia naturale.

Passando al gruppo "Modify" viene eliminata una sola funzione tra le molte presenti: quella di "chemically generate flow of electrons" che contiene solo strategie con biomateriali. Non si scartano tutte le soluzioni riguardanti le interazioni con i fluidi e l'ossidazione, poichè una caratteristica delle SMA è



quella di avere un'ottima resistenza alla corrosione; pertanto eventuali applicazioni ispirate a tali soluzioni potrebbero convergere verso l'utilizzo di smart materials.

Se si considera il gruppo "maintain community", è stato cancellato il sottogruppo "coordinate" che racchiude le soluzioni di organizzazione in gruppi e attività. Per gli altri sottogruppi sono state tolte alcune funzioni relative alla cooperazione tra specie, che sono volte allo studio delle strategie comportamentali. Certamente il controllo biologico della biodiversità e delle epidemie, come anche la fertilità del suolo, non hanno nulla in comune con la tecnologia SMA.

Nel penultimo gruppo si osservano gli ultimi campi depennati. Il sottogruppo "Regulate physiological process" cataloga unicamente soluzioni a livello cellulare, non risulta quindi di interesse nella nostra analisi. La funzione "extreme temperature" verrà certamente eliminata in quanto non si possono sfruttare le peculiarità delle leghe a memoria di forma. Le SMA hanno infatti un campo operativo che non supera i 100°C circa.

Anche le funzioni di mantenimento dell'integrità fisica sotto l'attacco di funghi, microbi e tossine chimiche non verranno esplose e controllate, perché non ritenute promettenti al fine dell'individuazione di possibili soluzioni bioispirate per applicazioni SMA, in quanto legate a soli fattori chimici.

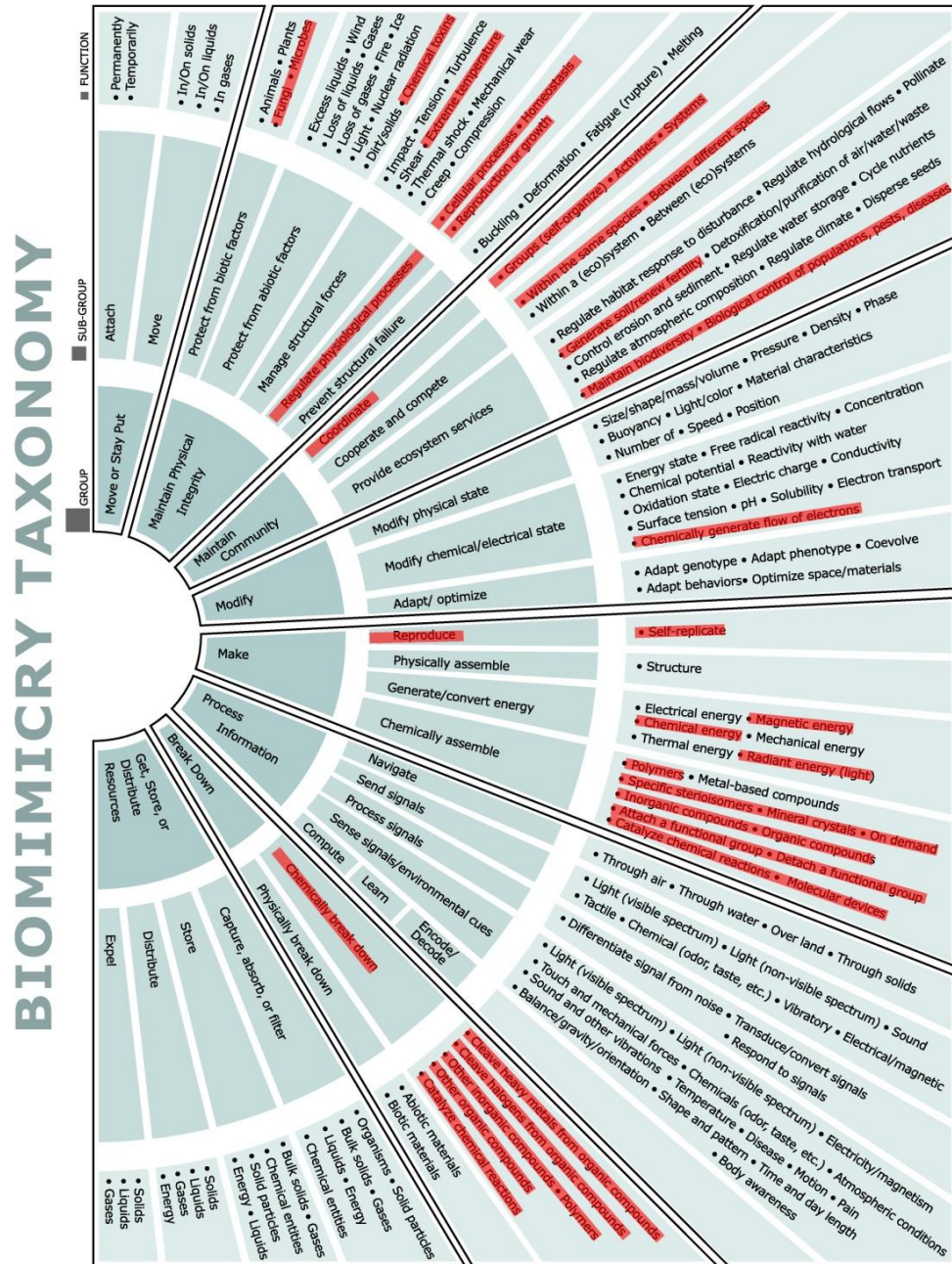
L'ultimo gruppo "Move or stay put" verrà interamente considerato nell'analisi successiva.

Le sottofunzioni sono state, prima di essere eliminate, controllate anche nelle funzioni specifiche tramite l'utilizzo del menù a tendina.

Nei casi incerti la voce è stata lasciata per poter partecipare alla successiva analisi; ne è un esempio il campo di "modificazione dello stato chimico-elettrico". Seppur senza ampie variazioni, le leghe a memoria di forma sono in grado di modificare le loro caratteristiche nel cambio di fase cristallina. Una loro applicazione in tal senso potrebbe essere vagliata.

Per quanto riguarda le catalogazioni, fatte nei capitoli precedenti e derivanti dalle pubblicazioni, si tratta di soluzioni specifiche e non sono visualizzabili nel menu a mezzaluna. Successivamente, quando si farà un'analisi più dettagliata alla ricerca di nuove applicazioni, sarà necessario ricordarsi che alcune soluzioni sono già state sfruttate.

Si inserisce un'immagine che riassume il lavoro di eliminazione delle funzioni e sottofunzioni che certamente non possono dare spunti per applicazioni bioispirate basate sull'utilizzo delle leghe a memoria di forma.



Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License.  
(c) 2008-2009 The Biomimicry Institute

Figura 72: Eliminazione di campi nella biomimicry taxonomy

## **6.2. Metodo di ricerca per applicazioni SMA bioispirate**

Mentre per la catalogazione delle applicazioni relative alle pubblicazioni si disponeva già dell'ispirazione biologica e si è ripercorsa la strada progettuale usata, per la ricerca di possibili applicazioni innovative si adotterà il procedimento inverso.

Si è scelto di avere come condizione iniziale l'utilizzo di SMA, la ricerca di bioispirazioni risulta generica e molto ampia, in quanto non si dispone di una precisa funzione da svolgere. È stata perciò condotta una ricerca in tutti i gruppi, sottogruppi e funzioni, a meno delle parti già scartate.

In questa sede non verrà ripercorso il lavoro fatto su ogni gruppo per ragioni espositive. Il procedimento di ricerca è stato ripetuto per ogni campo non eliminato, secondo quanto detto nel precedente capitolo.

Nel caso in cui la funzione non fosse stata eliminata, sono state analizzate le sue relative funzioni specifiche. Il proposito è l'individuazione di quelle soluzioni naturali che le leghe a memoria di forma possono imitare meglio di qualsiasi altro materiale. Se viene individuata una strategia naturale che può essere replicata dalle SMA, ma in maniera egualmente efficace da altre sostanze più reperibili, non viene ritenuta -nel presente elaborato- tecnologicamente interessante.

Il metodo di ricerca è molto sistematico e segue fedelmente la schematizzazione della tassonomia biomimetica. Le strategie naturali ritenute potenzialmente riproducibili tramite tecnologia SMA e tecnologicamente interessanti vengono messe da parte e analizzate singolarmente.

Questo livello di dettaglio richiede l'utilizzo del menù a tendina, l'unico con il quale si possono visualizzare le strategie naturali, cioè il quarto e ultimo livello della tassonomia.

L'ultima analisi, una volta individuate le soluzioni ritenute promettenti, consiste nell'approfondimento delle singole strategie. Si cerca di afferrare il funzionamento biologico e si valuta un possibile utilizzo di SMA atto a replicarlo. È possibile inoltre una valutazione sulla fattibilità tecnologica ed economica dell'applicazione ideata.

Per l'individuazione delle bioispirazioni riportate nei capitoli successivi sono state quindi esplose, e studiate con più attenzione, tutte le strategie naturali, non scartate alla prima lettura. Il procedimento logico per l'identificazione è stato quello di cercare se e come le leghe a memoria di forma potessero essere utili nel replicare ogni singola strategia, o sottofunzione legata allo svolgimento della stessa. Nel fare questo è necessario sempre tenere in conto che le SMA sono migliori rispetto ad altre tecnologie solo nel momento in cui si sfruttano le loro peculiarità; altrimenti per quanto riguarda gli altri parametri meccanici ed

economici esistono certamente materiali con caratteristiche decisamente migliori.

Bisogna però ricordare che ogni progettista ha il suo background culturale e, pur seguendo passo passo lo schema logico proposto dal portale, alcune soluzioni posso sembrare più o meno intuitive, o addirittura essere trascurate. Nei capitoli seguenti sono esposte tutte le bioispirazioni individuate tramite il presente studio; una nuova ricerca, effettuata da progettisti differenti, potrebbe portare a risultati più o meno completi.

### 6.3. Esempio di ricerca non proficuo

Le strategie naturali rimaste, dopo la scrematura spiegata nel cap. 6.1, sono molto numerose e spesso non hanno portato ad alcuna bioispirazione anche quando, a una prima analisi, erano risultate promettenti.

Per spiegare il lavoro di ricerca svolto, si è scelto un primo esempio di ricerca che risulterà infruttuoso all'ultima analisi.

Si prenda in considerazione il gruppo "Maintain community" e il suo sottogruppo "provide ecosystem services".

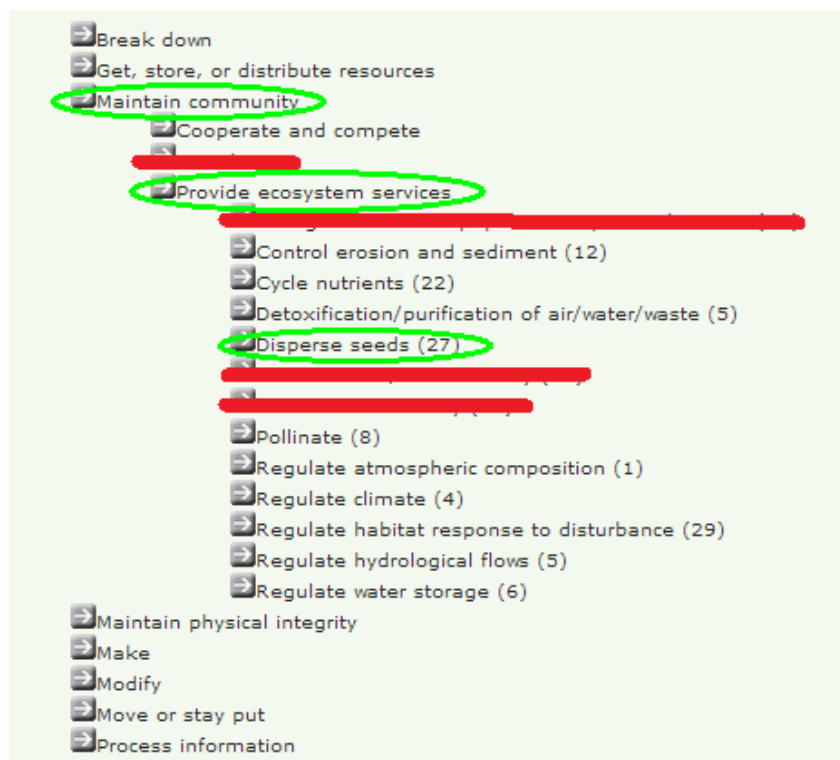


Figura 73: prima ricerca per applicazioni SMA

Verrà espansa la funzione "Disperse seed". Si tenga presente che, prima di arrivare a questa voce, sono state esplose tutte quelle precedenti. Sono state valutate le potenzialità di ogni strategia naturale citata e, per fare ciò, è stato necessario comprendere, seppur in maniera generica, i processi biologici nascosti dietro lo svolgimento di esse (coperte in rosso quelle eliminate nel cap. 6.1.).

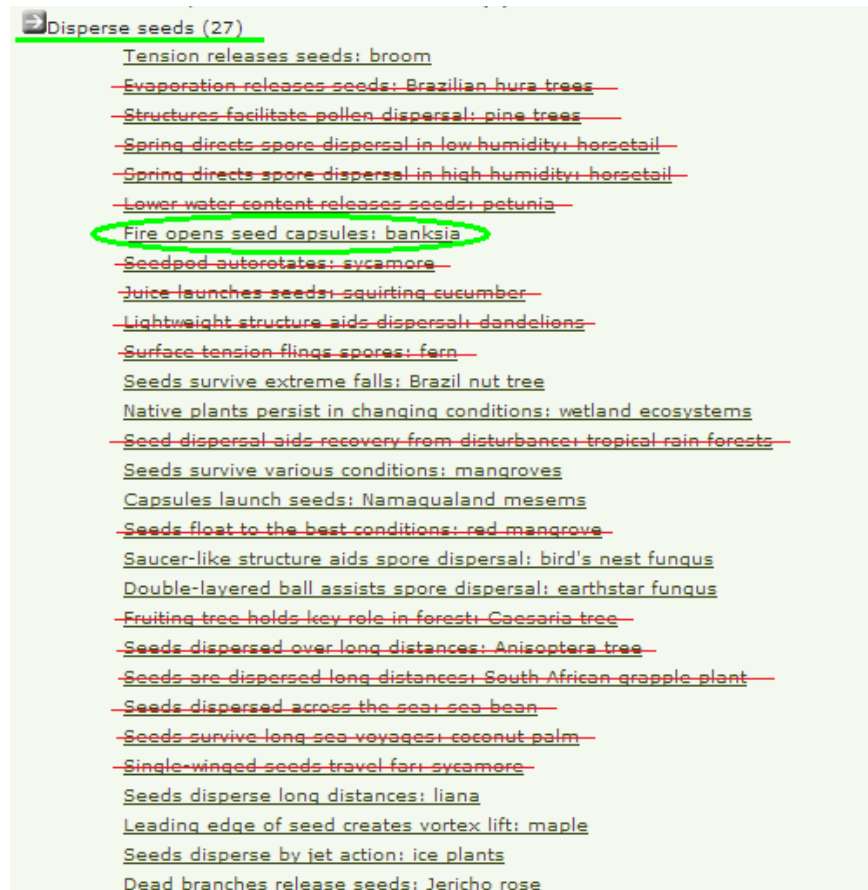


Figura 74: strategie potenzialmente interessanti in "disperse sed"

Ogni voce è stata aperta e valutata, e sono state perciò eliminate (linea rossa) tutte le strategie nelle quali non è stato possibile ipotizzare un proficuo utilizzo delle leghe a memoria di forma. Un esempio di strategia alla quale non si può applicare la tecnologia SMA è: "Fruiting tree holds key role in forest: Casaria tree"; dove si spiega il ruolo fondamentale detenuto dagli alberi da frutta nella foresta. Tutte le voci eliminate, come questa, non permettono un utilizzo di leghe a memoria di forma.

Le voci rimanenti passano all'ultima analisi di eventuale fattibilità.



Se aperta, ogni voce, presenta un'immagine e una spiegazione del funzionamento relativo allo svolgimento della funzione stessa (o più ipotesi nei casi di strategie non ancora totalmente comprese dagli studiosi).

The screenshot shows the AskNature website interface. At the top, there's a navigation bar with 'About', 'Press', 'Contribute', and 'Browse'. Below that, a search bar and a 'How would Nature...' dropdown are visible. The main content area is titled 'Fire opens seed capsules: banksia' and includes a photograph of the seed capsules. To the right, there are 'Content Tools' and 'Comments' sections. Below the image, there's a summary and a detailed abstract.

**Seeds of Banksia plants are dispersed via two-valved seed capsules that open in high fire temperatures.**

**Biomimicry Taxonomy**

- [Maintain community](#) >
- [Provide ecosystem services](#) >
- [Disperse seeds](#)

**Biomimetic Application Ideas**

■ [Non-redundant "sprinkler" systems that are triggered to release their contents by sensing the heat of a fire.](#)

[Visit strategy page](#)  
[Collapse all sections](#)

**SUMMARY**

"Banksias are spectacular evergreen shrubs and trees related to the proteas of South Africa but, with the exception of one whose range extends into the Pacific, they are totally restricted to Australia. Of the 75 or so species that exist, 60 grow only in the south-western corner (of Australia). Their strange inflorescences consist of several thousand small flowers massed together in a single spike and arranged in vertical lines, that in some species have a gentle spiral twist. They take several months to develop and then open over several weeks. Birds such as lorikeets and manucyias like the Rensy possum come to drink nectar from them and in the course of doing so pollinate them. Usually, however, only a small proportion of the flowers produce seed. In some species, those that are unsuccessful remain attached to the flower head, forming a grey rather bristly fur. It takes about a year for the seeds to mature, like the bottlebrush, some Banksias will not shed their seeds unless there is a fire. Indeed, it is almost impossible to remove them from the plant because they are held in hard woody two-valved capsules. But as the flames scorch the branches, the intense heat causes the capsules to open. Their front ends resemble pairs of brown lips on the side of the furry spike...By releasing their seeds only in the wake of a fire, the Banksias ensure that they will fall on well-irrigated, brightly-lit ground recently fertilised with ash and so get the most favourable of starts in what is, even at best, an extremely harsh and demanding environment." (Attenborough 1998:188-190)

**ABOUT THE INSPIRING ORGANISM**

Figura 75: soluzione individuata: Banksia

La soluzione più promettente sembrava essere "fire open seed capsules: banksia".

Nel paragrafo sotto l'immagine è inserito un abstract che unisce i vari studi condotti sul tema, e che esplica i meccanismi della strategia naturale.

Viene spiegato che la Banksia è una pianta tipica dei terreni aridi australiani dove spesso si sviluppano incendi naturali. La pianta ha sviluppato una particolare risposta al fuoco, che le permette di sopravvivere e riprodursi grazie

agli incendi. Il calore sviluppato dalle fiamme stimola l'apertura dei *follicoli seminali* favorendo la geminazione nel terreno.

La funzione è perciò quella di un comando di "apertura" legato all'innalzamento di temperatura.

Volendo replicare questo comportamento è necessario l'utilizzo di un materiale che agisca autonomamente in relazione alla temperatura.

La sensibilità termica propria delle leghe a memoria di forma potrebbe essere un'ottima base di partenza per un possibile sviluppo tecnico.

Nel caso in cui la fase austenitica fosse legata alla posizione di apertura, il calore generato dalle fiamme potrebbe comandare l'apertura del sistema.

L'idea potrebbe essere interessante, ma bisogna prima controllare se la stessa funzione può essere svolta efficientemente anche senza le SMA e che non vi siano soluzioni già sviluppate in tale senso. In ultima analisi se ne valuta la fattibilità tecnologica.

Esiste già una soluzione tecnologica per questa funzione che prescinde dall'utilizzo delle leghe a memoria di forma? La risposta è sì e le soluzioni sono diverse. Se si pensa ai termostati, la cui funzione è quella di comandare un interruttore in base alla temperatura, si possono osservare differenti soluzioni. I primi modelli (il primo nel 1830) si basano sulla dilatazione di un fluido termosensibile come il mercurio. I più conosciuti sono però quelli a lamina bimetallica, che sfruttano i differenti coefficienti di dilatazione di due materiali accoppiati per incurvare una superficie.

I sistemi citati sono però relativamente ingombranti e lenti nella risposta all'innalzamento della temperatura. Le SMA potrebbero garantire una semplicità costruttiva e una compattezza maggiori.

Esistono soluzioni basate su questo concetto di funzionamento, già sviluppate, che sfruttano le SMA? Anche in questo caso la risposta è affermativa. Gli interruttori che sfruttano le leghe Ni-Ti, già citati nel cap. 3.6.4, si basano proprio sul principio della banksia. Una lamina in SMA apre o chiude il circuito in base alla temperatura sentita nella specifica applicazione.

La soluzione della banksia, nonostante sembrasse molto promettente, non è utile per una progettazione innovativa bioispirata che utilizzi le leghe a memoria di forma.

Non verranno riportati nella trattazione altri esempi di ricerca non proficui dal punto di vista progettuale.

## **6.4. Esempi di ricerca di soluzioni SMA bioispirate**

In questo capitolo vengono esposte tutte le ricerche effettuate che hanno passato tutti i livelli di analisi. Sono tutte soluzioni che imitano una funzione naturale

per le quali l'utilizzo di leghe a memoria di forma garantisce le migliori performance. Si terminerà con i risultati della ricerca completa: un elenco di tutte le soluzioni naturali imitabili che sono state individuate.

Nel presente lavoro di tesi si è effettuata la ricerca su tutta la tassonomia. Nel caso in cui si volesse fare una ricerca meno completa, ma molto più rapida, si può cercare nella tassonomia solamente le soluzioni legate alle caratteristiche principali delle leghe SMA: la memoria di forma, la superelasticità e la capacità di assorbire energia.

Le varie strategie imitabili sono state raggruppate sotto il gruppo di afferenza e ogni sottocapitolo tratta un solo gruppo. I gruppi che non hanno portato a possibili bioispirazioni non sono stati citati.

### 6.4.1. Ricerca in "Get, store, or distribute resources"

Nel gruppo "Get, store, or distribute resources" vi sono quattro gruppi, venti funzioni e quattrocentotrentatré strategie naturali e nessuna voce è stata eliminata nel primo livello di analisi. Nel lavoro di ricerca sono state prese in considerazione tutte le strategie, ma in questo esempio, per ovvie ragioni di esposizione, valuteremo solo le ventiquattro relative al sottogruppo "Store" e alla funzione "Energy": quella che racchiude, tra tutte quelle del gruppo, il maggior numero di possibili sviluppi.

Seguendo l'ordine di catalogazione proposto da Asknature.org troviamo per prima la soluzione: "Appendage strikes with force: mantis shrimp".

**The feeding appendage of the mantis shrimp breaks through the hard shells of its prey using tremendous elastic energy stored in a saddle-shaped spring, and destructive vapor bubbles produced as a result of the blow.**

<p><b>Biomimicry Taxonomy</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <a href="#">Get, store, or distribute resources</a> &gt;</li> <li>■ <a href="#">Store</a> &gt;</li> <li>■ <a href="#">Energy</a></li> </ul>	<p><b>Biomimetic Application Ideas</b></p> <p>Stronger manufacturing or architectural materials. Device for using release of elastic energy.</p>
--	--

[> Visit strategy page](#)

▼ SUMMARY [\[Collapse all sections\]](#)

"The mantis shrimp has a feeding appendage that is adapted for spearing or smashing prey with a powerful force. A biological hyperbolic-paraboloid spring and a latch mechanism store up elastic strain energy that when released, can smash the shells of prey such as snails, crabs, and clams. Vapor bubbles released also appear to increase the energy of the strike." (Courtesy of the Biomimicry Guild)

**Figura 76: soluzione del gamberetto mantide per accumulo energia**

Il gamberetto mantide è un animale tropicale provvisto di micidiali arti raptatori che possono frantumare i gusci robusti di molluschi e crostacei, o immobilizzare



pesce di taglia superiore alla sua. L'energia è generata grazie a un sistema simile a una molla che la immagazzina lungo la schiena dell'animale.

La funzione di rilascio di energia può essere imitata grazie al ritorno alla fase austenitica delle SMA, la quale è accompagnata dalla generazione di forze di grande entità.

Sempre seguendo l'ordine proposto dalla catalogazione, troviamo la soluzione: "Tendons store energy: bushbaby".

**The legs of the bushbaby allow it to jump six times its body length by storing energy in tendons.**


<p><b>Biomimicry Taxonomy</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <a href="#">Get, store, or distribute resources</a> &gt;</li> <li>■ <a href="#">Store</a> &gt;</li> <li>■ <a href="#">Energy</a></li> </ul>	<p><b>Biomimetic Application Ideas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplification strategy for kinetic energy</li> <li>• Kinetic energy storage product for cars</li> </ul>
--	---

[> Visit strategy page](#)

▼ SUMMARY [\[Collapse all sections\]](#)

"As the bushbaby lands, it stores energy in its tendons, which act like catapults. When it takes off again, the power is transmitted down the leg and helps extend the ankle and the foot--literally giving the bushbaby a spring in its step." (Downer 2002:25-29)

▼ ABOUT THE INSPIRING ORGANISM



Galagonidae  
Galagonidae

Organism/taxonomy data provided by:  
Species 2000 & ITIS Catalogue of Life: 2008 Annual Checklist

**Figura 77: soluzione bushbaby per accumulo energia**

I Galagoni, piccoli primati africani, possono spiccare salti pari a circa sei volte la loro altezza; ciò è possibile grazie all'energia meccanica accumulata nei loro tendini.

Questa caratteristica è in realtà comune a molti animali che sono in grado di spiccare salti particolarmente alti, come le rane e i canguri.

Altri animali (locuste e alcuni scarafaggi) sfruttano una soluzione paragonabile per accrescere, quando necessario, la potenza sviluppabile dai loro arti

Se si conosce l'effetto superelastico, caratterizzato da forze di richiamo importanti, tipico delle SMA, si può ipotizzare di imitare la funzione che i tendini svolgono nei galagoni con fili di Nitinol.

Proseguendo nell'analisi la strategia che si incontra è: "Spring-like seed drills into ground: filaree".

**Spring-like awn of filaree seed drills itself into the ground by curling and uncurling with changes in moisture.**

**Biomimicry Taxonomy**

- [Move or stay put >](#)
- [Attach >](#)
- [Permanently](#)

**Biomimetic Application Ideas**

- Anchoring or drilling in soil or other surfaces
- Fasteners
- Energy-saving or storing devices

[> Visit strategy page](#)

▼ SUMMARY [\[Collapse all sections\]](#)

"The ability of seeds to...bury themselves can improve their chances of germinating and surviving... [S]elf-burial can be accomplished using awns, hair-like appendages that launch seeds by storing elastic energy and subsequently move them across or into the soil using hygroscopically powered shape changes...Once on the ground, humidity changes cause the awns to unwind straight when wet, or rewind back to their helical shape when dry. The resulting motor action, combined with hairs on the seed and along the length of the awn, moves the seeds across the surface, eventually lodging them into a crevice and causing them to drill themselves into the ground (self-burial) (Stamp, 1984)." (Evangelista et al. 2011:521)

[Watch Video](#)

**Figura 78: soluzione della filaree per accumulo energia**

Si tratta di una pianta infestante tipica dell'America centro orientale (paragonabile alla nostra gramigna) caratterizzata dalla fioritura violacea.

Come si può riscontrare osservando la Figura 78, la soluzione è catalogata non solo in "Store" e "Energy" ma anche nel gruppo "Move or stay put".

I semi di questo vegetale hanno la capacità di interrarsi da soli grazie a delle barbe che immagazzinano energia. Le protuberanze sono comandate dall'umidità atmosferica; risultano a forma elicoidale quando il clima è più secco, mentre si distendono, generando un moto rotatorio, quando cresce l'umidità. Grazie a questo movimento la pianta mette in atto un processo di perforazione del suolo in modo tale da interrare il seme, proprio quando le condizioni atmosferiche di umidità sono più favorevoli alla geminazione.

Questa intelligente strategia naturale potrebbe facilmente essere imitata sfruttando la tecnologia SMA. Si potrebbe utilizzare una memoria a due vie che riproduca le geometrie a elica e distesa, il movimento potrebbe essere comandato dall'innalzamento della temperatura dello SMA wire per effetto Joule.

L'ultima voce della funzione è quella dell'erba vescica già vista nel capitolo 5.4.

## 6.4.2. Ricerca in "Modify"

Nel gruppo "Modify" e nel sottogruppo "Physical state" si trova la soluzione "Material characteristic" e la strategia naturale "Fiber contract and relax: spider".

**Dragline silk fibers in spider webs help maintain web tension under weight by contracting and relaxing in response to humidity.**

**Biomimicry Taxonomy**

- [Modify](#) >
- [Modify physical state](#) >
- [Material characteristics](#)

**Biomimetic Application Ideas**

- Microchips
- Drug delivery systems
- Lightweight, compact actuators

[> Visit strategy page](#)

▼ SUMMARY [\[Collapse all sections\]](#)

"The abrupt halt of a bumble bee's flight when it impacts the almost invisible threads of an orb web provides an elegant example of the amazing strength and toughness of spider silk. Spiders depend upon these properties for survival, yet the impressive performance of silk is not limited solely to tensile mechanics. Here, we show that silk also exhibits powerful cyclic contractions, allowing it to act as a high performance mimic of biological muscles. These contractions are actuated by changes in humidity alone and repeatedly generate work 50 times greater than the equivalent mass of human muscle. Although we demonstrate that this response is general and occurs weakly in diverse hydrophilic materials, the high modulus of spider silk is such that it generates exceptional force. Furthermore, because this effect already operates at the level of single silk fibers, only 5  $\mu\text{m}$  in diameter, it can easily be scaled across the entire size range at which biological muscles operate. By contrast, the most successful synthetic muscles developed so far are driven by electric voltage, such that they cannot scale easily across large ranges in cross-sectional areas. The potential applicability of silk muscles is further enhanced by our finding that silkworm fibers also exhibit cyclic contraction because they are already available in commercial quantities. The simplicity of using wet or dry air to drive the biomimetic silk muscle fibers and the incredible power generated by silk offer unique possibilities in designing lightweight and compact actuators for robots and micro-machines, new sensors, and green energy production." (Agnarsson et al. 2009:1990)

"Spider dragline silk is a model biological polymer for biomimetic research due to its many desirable and unusual properties. 'Supercontraction' describes the dramatic shrinking of dragline silk fibers when wetted. In restrained silk fibers, supercontraction generates substantial stresses of 40–50 MPa above a critical humidity of  $\sim 70\%$  relative humidity (RH). This stress may maintain tension in webs under the weight of rain or dew and could be used in industry for robotics, sensor technology, and other applications. Our own findings indicate that supercontraction can generate stress over a much broader range than previously reported, from 10 to 140 MPa. Here we show that this variation in supercontraction stress depends upon the rate at which the environment reaches the critical level of humidity causing supercontraction. Slow humidity increase, over several minutes, leads to relatively low supercontraction stress, while fast humidity increase, over a few seconds, typically results in higher supercontraction stress. Slowly supercontracted fibers take up less water and differ in thermostability from rapidly supercontracted fibers, as shown by thermogravimetric analysis. This suggests that spider silk achieves different molecular configurations depending upon the speed at which supercontraction occurs. Ultimately, rate-dependent supercontraction may provide a mechanism to tailor the properties of silk or biomimetic fibers for various applications." (Agnarsson et al. 2009:325)

**Figura 79: soluzione tela ragno per modificare caratteristiche materiale**

Si tratta della tela tessuta dagli aracnidi, la quale è in grado di modificare le sue caratteristiche meccaniche in base ad alcuni fattori esterni. La tela è particolarmente sensibile al cambiamento di umidità. La caratteristica di variare le caratteristiche è propria anche delle leghe a memoria di forma, ma per loro il parametro di controllo è la temperatura. Si può pensare a una applicazione che sfrutti SMA wires interconnessi che replichi la ragnatela.

### 6.4.3. Ricerca in " Maintain phisical integrity"

Nel gruppo " Maintain phisical integrity" e più precisamente nel sottogruppo "Manage strutural forces" si trovano molte soluzioni che la natura adotta per

resistere agli urti e assorbire l'energia degli impatti. Valutando la funzione "Impact" si possono trovare alcune soluzioni specifiche interessanti.



**Figura 80: funzione resistere agli impatti**

Tra le cinquantuno strategie naturali per mantenere l'integrità fisica, dopo un impatto, molte non sono replicabili con le leghe a memoria di forma. Alcune soluzioni sono legate alla durezza della cassa esterna che protegge l'animale, come per le conchiglie dei molluschi; altre invece si avvalgono di materiale organico -solitamente secrezioni- per coprire e assorbire l'urto: soluzioni non imitabili utilizzando delle SMA.

Si sono però individuate quattro soluzioni interessanti per applicazioni bioispirate.

La prima soluzione, seguendo l'ordine proposto dalla catalogazione, è: "Skeletal construction provides shock absorption: cats".

La particolare conformazione dello scheletro dei felini permette loro di assorbire urti, senza trasmettere eccessive sollecitazioni agli organi interni.

**The skeleton of a cat allows it to absorb shocks to its forelimbs because it has no direct skeletal connection between its collarbone and vertebral column.**

**Biomimicry Taxonomy**

- [Maintain physical integrity](#) >
- [Manage structural forces](#) >
  - [Impact](#)

**Biomimetic Application Ideas**

- Bumpers for buses and trains
- Guard rails
- Cables for industrial equipment and pumps

[> Visit strategy page](#)

▼ SUMMARY [\[Collapse all sections\]](#)

"Cats have no direct skeletal connection through a collarbone between the bones of their forelimbs (pectoral girdle) and those of their vertebral columns. In effect, they have shock-mounted forelimbs, which cushion a landing after a jump. None of these schemes reduce the extremes of velocity one bit; what they reduce are the velocity gradients." (Vogel 2003:77)

▼ ABOUT THE INSPIRING ORGANISM

Felidae  
Felidae

Organism/taxonomy data provided by:  
Species 2000 & ITIS Catalogue of Life: 2008 Annual Checklist

▼ BIOINSPIRED PRODUCTS AND APPLICATION IDEAS

**Application Ideas:** Bumpers for buses and trains, guard rails, cables for industrial equipment and pumps, ergonomic equipment.

**Industrial Sector(s) interested in this strategy:** Transportation, industrial engineering, ergonomics

▼ REFERENCES

Steven Vogel. 2003. *Comparative Biomechanics: Life's Physical World*. Princeton: Princeton University Press. 580 p.  
[S >>](#) [S >>](#)

**Figura 81: soluzione dei felini per assorbimento degli urti**

Ciò è possibile perché la clavicola di tutti i felini è piccola e collegata allo sterno unicamente da un legamento: ciò gli conferisce una grande mobilità visto che le spalle possono muoversi indipendentemente.

Il legamento che collega la colonna vertebrale alla scapola, come anche le articolazioni delle zampe -sinoviali- sono contraddistinte da un'elevata elasticità. Lo scheletro dei felini sfrutta in maniera ottimale il metodo delle leve, per garantire un movimento veloce, fluido e per attutire gli urti.

Il sistema così congegnato non riduce la velocità dell'animale ma il gradiente di velocità delle parti interne.

La funzione svolta dalle articolazioni e dai legamenti, cioè quella di tenere unite clavicola e sterno assorbendo energia, potrebbe essere imitata da una soluzione applicativa che utilizza leghe a memoria di forma; non esistono applicazioni già studiate che sfruttino questa bioispirazione.

Un altro spunto per l'utilizzo di SMA per applicazioni biomimetiche potrebbe



giungere dalla voce: "Spines work as shock absorbers: West European hedgehog".

Il porcospino o riccio comune è un animale molto comune anche nel nostro paese.

Spines work as shock absorbers: West European hedgehog



1 of 1 West European Hedgehog / kallerna / License 

**The spines of hedgehogs function as shock-absorbers during falls thanks to their honeycomb-like core and longitudinal stiffening.**

**Biomimicry Taxonomy**

- [Maintain physical integrity](#) >
- [Manage structural forces](#) >
- [Impact](#)

**Biomimetic Application Ideas**

- Bumpers for buses and trains
- Guard rails
- Cables for industrial equipment and pumps

[> Visit strategy page](#)

▼ SUMMARY [\[Collapse all sections\]](#)

"In the second category, comprising animals with masses between about 100 kilograms and 100 grams (4 ounces), falling may be injurious, but the fall must involve a distance greater than the height of the animal...Hedgehogs (about 500--1,000 grams in mass), are also just above the lower limit, but, according to Vincent and Owers (1986), cope with falls by using a special device--spines that can act as shock absorbers." (Vogel 2003:44)

"[T]he hedgehog spine is a shock-absorber...The foam-like structure down the center of spines and quills supports the thin outer walls against local buckling, allowing the structure to bend further without failing...Porcupine quills perform more or less the same as hollow cylinders in buckling as struts with an axial load; in bending they are 40% or so better. But the spines of the hedgehog, with their square honeycomb core and longitudinal stiffening, are three times better than they would be without the core." (Vincent 2002:30-31)

**Figura 82: soluzione del riccio per assorbimento urti**

Questo mammifero dispone di numerosi aculei che hanno due funzioni: la prima è quella di proteggerli dai potenziali predatori, la seconda invece è quella di assorbire gli urti. Gli aculei sono cavi, lunghi circa due cm e presentano un


restringimento nei pressi dell'attaccatura, che permette loro di piegarsi e assorbire l'energia dovuta a un'eventuale caduta, per poi tornare in posizione.

È interessante osservare come Asknature per ogni strategia naturale ipotizzi un eventuale applicazione bioispirata.

Nel seguente caso gli aculei del riccio potrebbero essere sostituiti da fili di Nitinol. Gli SMA wires avrebbero la funzione di assorbire energia deformandosi in fase martensitica, per ritornare in posizione se scaldati adeguatamente. Questa strategia naturale risulta molto interessante per un utilizzo bioispirato delle SMAs.

Sempre nella funzione "Impact" si trova un ulteriore possibile fonte di bioispirazione: "Rolling locomotion used for hilly terrain: Mount Lyell salamander".

Rolling locomotion used for hilly terrain:  
Mount Lyell salamander



**The body of the Mount Lyell salamander is protected from impacts by acting rubbery.**

<b>Biomimicry Taxonomy</b>	<b>Biomimetic Application Ideas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <a href="#">Maintain physical integrity</a> &gt;</li> <li>■ <a href="#">Manage structural forces</a> &gt;</li> <li>■ <a href="#">Impact</a></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Shock-absorbing materials</li> <li>• Folding</li> </ul>

[> Visit strategy page](#)

▼ SUMMARY [\[Collapse all sections\]](#)

"On the steep slopes of California's Sierra Nevada mountain range, the Mount Lyell salamander achieves a similar rock 'n' roll lifestyle. When disturbed, or when it needs to descend, the amphibian curls its head under its back legs, wraps its tail along its body, and tucks its legs in. It not only looks like a black tire, it behaves like one. Rolling over and over, it bowls down any slope with ease, its rubbery body absorbing the impact of bounces." (Downer 2002:23)

**Figura 83: strategia della salamandra per attutire urti**

La salamandra quando si sente in pericolo si arrotola su se stessa, aggrappa le zampe anteriori a quelle posteriori, assumendo così una geometria simile a quella di un pneumatico senza cerchione. Si lascia rotolare sui fianchi sconnessi dei promontori attutendo gli urti anche con l'elasticità del suo corpo.

La medesima soluzione viene sfruttata da molte altre specie. Alcuni animali la utilizzano unicamente per proteggersi dai predatori, arrotolandosi per coprire le parti più vulnerabili e lasciare scoperta solo la superficie più rigida: è questo il caso del millepiedi.

Si può pensare a un'applicazione basata sulle leghe a memoria di forma che replica questo comportamento naturale. Se la fase geometricamente univoca - quella austenitica- fosse legata alla geometria circolare, potrebbe essere attivata in caso di pericolo.

Sempre in "Impact" si trova il caso: "Elastic ligament provides support, shock absorption: large grazing mammals".

**The nuchal ligament of large grazing mammals provides support for the head and seems to act as a shock absorber, due to the presence of the protein elastin.**

<p><b>Biomimicry Taxonomy</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ <a href="#">Maintain physical integrity</a> &gt;</li> <li>■ <a href="#">Manage structural forces</a> &gt;</li> <li>  ■ <a href="#">Impact</a></li> </ul>	<p><b>Biomimetic Application Ideas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexible yet resilient cables and hoses</li> <li>• Improved materials for shock absorption (e.g., seatbelts)</li> <li>• Composite materials</li> </ul> <p style="text-align: right;"><a href="#">&gt; Visit strategy page</a></p>
---	---

▼ SUMMARY [\[Collapse all sections\]](#)

"Our own rubber, elastin, occurs mainly as a component of two composites, skin and arterial wall. The nearest thing to pure elastin is the nuchal ligament of large grazing mammals. It runs from a ridge on the rear of the skull back along the top of the neck to the thoracic vertebrae; it seems to act as a shock absorber as well as a support for the head." (Vogel 2003:304)

▼ ABOUT THE INSPIRING ORGANISM

Bovidae  
Bovidae

**Figura 84: soluzione dei grandi mammiferi per impatti e tensioni**

I mammiferi da pascolo dispongono, a protezione del cervello, elementi che contengono elastina. Questa sostanza permette loro di assorbire gli urti dovuti agli scontri con altri esemplari quando lottano per il territorio. Questa soluzione è catalogata sia in "Impact" che in "tension".

Questi quattro esempi giungono dall'analisi di una sola funzione sulle centosessantadue disponibili. Per quanto la funzione appena esaminata fosse una delle più attinenti al materiale di partenza, in quanto legata a una delle sue peculiarità: quella di assorbire energia. Si possono comprendere sia la quantità



di strategie specifiche (cinquantuno solo per "Impact") catalogate, sia le potenzialità della ricerca biomimetica.

Se si prende in considerazione un'altra funzione, "Tension", si può trovare un'ulteriore strategia interessante: "Byssus threads resist forces: blue mussel".

### Byssus threads resist forces: blue mussel



**The byssus threads of mollusks are strong anchors that can resist hydrodynamic forces because of mechanically distinct regions within each thread.**

#### Biomimicry Taxonomy

- [Maintain physical integrity >](#)
- [Manage structural forces >](#)
- [Tension](#)

#### Biomimetic Application Ideas

- More stable marine infrastructure
- Hard yet extensible cables and ropes

**Figura 85: soluzione della cozza per resistere alla tensione**

La cozza rimane saldamente ancorata alla roccia, nonostante la forza delle onde, grazie a numerosi fili organici che potrebbero essere sostituiti, in un'eventuale applicazione, da SMA wires. Un sistema così congegnato permette alla struttura centrale di assecondare il movimento imposto dal moto ondoso grazie alle deformazioni recuperabili caratteristiche delle leghe Ni-Ti.

## 6.4.4. Ricerca in "Move or stay put"

Nella sottocategoria "Attach" e nella funzione "Temporarily" si trova una strategia naturale: "Proboscis forms a flexible, sealed cylinder: butterfly".

## Proboscis forms a flexible, sealed cylinder: butterfly



**The two-part proboscis of a butterfly unfurls to form a flexible feeding tube via two half-cylinders that curl over and interlock.**

### Biomimicry Taxonomy

[Move or stay put](#) >

[Attach](#) >

[Temporarily](#)

### Biomimetic Application Ideas

Pipes that can be easily "unzipped" to replace damaged sections, resealable packages. Packaging of objects for storage and travel in space or aerospace applications- solar sails, satellite solar cells, or mechanism for inflatable structures.

[> Visit strategy page](#)

▼ SUMMARY

[\[Collapse all sections\]](#)

"The butterfly's proboscis, for example, is formed from the two soft 'lips' on the maxillae, which have become enormously elongated. When in use the two parts, semicircular in section, curl over and interlock to form a stiff but flexible cylindrical tube..." (Foy and Oxford Scientific Films 1982:163)

**Figura 86: strategia della proboscide della farfalla**

La farfalla dispone di una proboscide, molto lunga rispetto al corpo, per nutrirsi. Quando questa non viene utilizzata l'animale la arrotola su se stessa.

Un'ipotetica applicazione potrebbe basarsi sulla tecnologia a memoria di forma.

Si pensi a un filo di Nitinol, con la geometria legata alla fase austenitica che riproduca la proboscide arrotolata su se stessa, annegato in un tubo di gomma.

In fase martensitica la pressione del fluido che scorre potrebbe definire la geometria più congeniale al flusso; quando però questo filo viene attraversato dalla corrente e, per effetto Joule, si scalda si arrotolerà su se stesso. Nel momento in cui la temperatura cala e si ritorna alla fase martensitica la pressione del flusso interno potrà permettere lo srotolamento del tubo. Questa strategia naturale è molto idonea a essere replicata artificialmente tramite l'utilizzo di leghe a memoria di forma.

Nella funzione "Temporarily" si trova anche la strategia: "Caterpillars roll leaves: *Striglina scitaria*".

**Caterpillars roll leaves: *Striglina scitaria***

**Caterpillars of *Striglina scitaria* roll leaves to provide protection by use of contractile silk threads.**

**Biomimicry Taxonomy**

- [Move or stay put](#) >
- [Attach](#) >
- [Temporarily](#)

**Biomimetic Application Ideas**

- Materials to temporarily hold together two surfaces, such as wound edges, bandages, fabrics

[> Visit strategy page](#)

▼ SUMMARY [\[Collapse all sections\]](#)

(Referring to an illustration) "Leaf rolling technique of the caterpillar *Striglina scitaria*. The larva rolls the leaf around itself with the aid of contracting silk threads." (Pallasmaa 1995:49)

**Figura 87: soluzione della larva per arrotolare temporaneamente**

Apprendo la voce viene spiegato la strategia naturale utilizzata dalla larva del bruco. La larva arrotola la foglia su se stessa utilizzando la forza che il suo corpo genera grazie a dei fili di seta in grado di contrarsi. È ipotizzabile un sistema di piegatura che sfrutti questo sistema dove i fili della soluzione naturale sono sostituiti da SMA wires.

Sempre nel gruppo "Move or stay put" ma nel sottogruppo "Move" e nella funzione "In/on liquids" troviamo un insetto che presenta una strategia di movimento particolare: "Appendage causes high jumps: springtails".

**The abdominal, tail-like appendage of springtails (furcula) is a pronged fork device causing high jumps when stored tension is released.**

**Biomimicry Taxonomy**

- [Move or stay put](#) >
- [Move](#) >
- [In gases](#)

**Biomimetic Application Ideas**

Catch device; storing kinetic energy.

[> Visit strategy page](#)

▼ SUMMARY [\[Collapse all sections\]](#)

Springtails "possess a pronged fork device which is doubled beneath the body and held in place by terminal catches when not in use; when released under tension, the fork strikes the substrate with considerable force, sending the springtail spinning high into the air." (Wootton 1984:146)

[Watch Video](#)

▼ ABOUT THE INSPIRING ORGANISM

**Figura 88: strategia di movimento del collembolo**

Il collembolo dispone di un arto retrattile nella sua parte inferiore che funziona più o meno come una catapulta. Questa appendice immagazzina energia che viene poi rilasciata di colpo, provocando un grande salto dell'animale.

La strategia naturale potrebbe essere replicata con un'applicazione SMA, grazie alle rilevanti forze di richiamo elastico causate dal ritorno alla fase austenitica.

## 6.5. Elenco delle potenziali bioispirazioni individuate

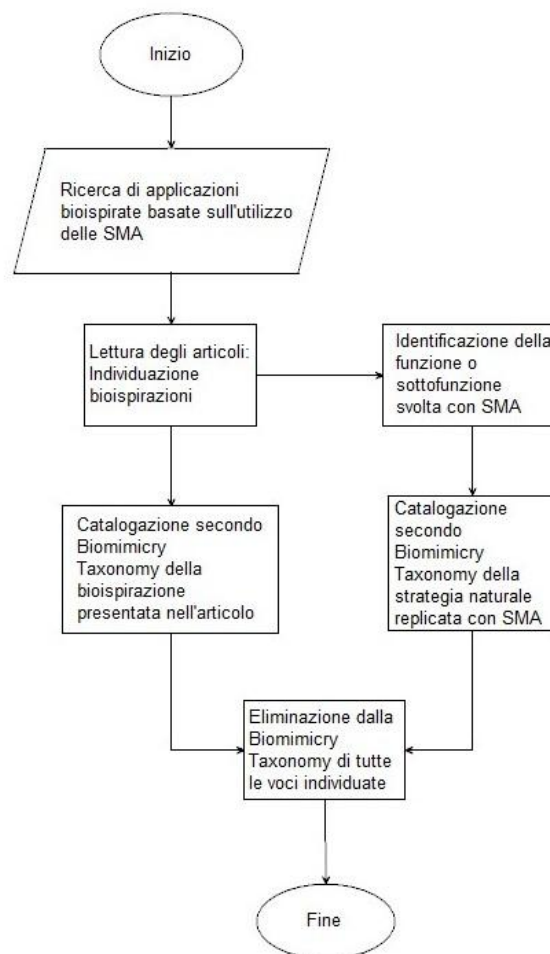
Nel capitolo 6.4 sono stati riassunti tutti i risultati del lavoro di ricerca. Per maggiore chiarezza verranno elencate tutte le possibili bioispirazioni che sono state individuate. Per ogni soluzione sono specificati il gruppo, il sottogruppo e la funzione.

- I) "Get, store, or distribute resources"
  - II) "Store"
    - III) "Energy"
      - "Appendage strikes with force: mantis shrimp"
      - "Tendons store energy: bushbaby"
      - "Spring-like seed drills into ground: filaree"
  
- I) "Modify"
  - II) "Physical state"
    - III) "Material characteristic"
      - "Fibers contract and relax: spiders"
  
- I) "Maintain physical integrity"
  - II) "Manage structural forces"
    - III) "Impact"
      - "Skeletal construction provides shock absorption: cats"
      - "Spines work as shock absorbers: West European hedgehog"
      - "Rolling locomotion used for hilly terrain: Mount Lyell salamander"
    - III) "Tension"
      - "Byssus threads resist forces: blue mussel"
  
- I) "Move or stay put"
  - II) "Attach"
    - III) "Temporarily"
      - "Proboscis forms a flexible, sealed cylinder: butterfly"
      - "Caterpillars rolls leaves: Striglina scitaria"

- II) "Move"
- III) "In/on liquids"
  - "Appendage causes high jumps: springtails"

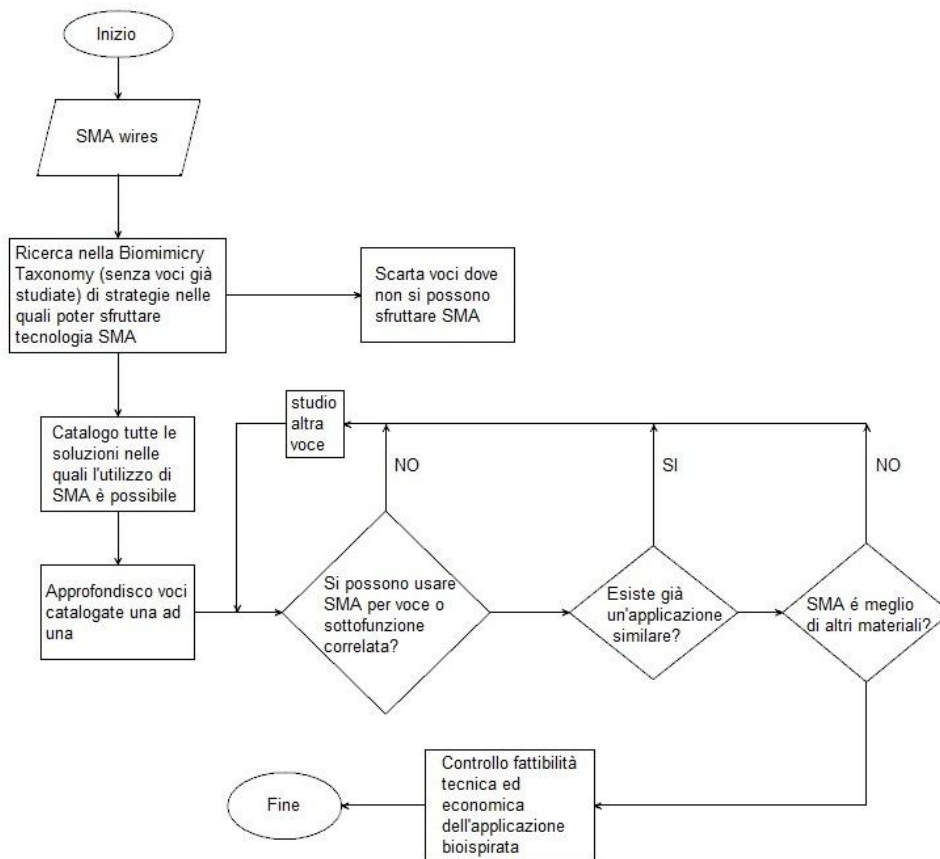
## 6.6. Diagrammi di flusso

Per una più rapida comprensione dei procedimenti utilizzati e per riassumere il lavoro svolto si introducono due diagrammi di flusso.



**Figura 89: diagramma di flusso della ricerca e catalogazione pubblicazioni**

Il primo diagramma di flusso è relativo al processo utilizzato per l'individuazione e catalogazione delle soluzioni già studiate descritte nelle pubblicazioni.



**Figura 90: diagramma di flusso di ricerca bioispirazioni**

Nel secondo diagramma di flusso si esplica la procedura messa in atto per la ricerca delle nuove bioispirazioni non ancora oggetto di studio.

## 7.Scelta e sviluppo grafico di due soluzioni bioispirate

Giunti a questo punto sono state esposte tutte le possibili applicazioni bioispirate, basate sull'utilizzo delle leghe a memoria di forma.

I passi da compiere per giungere materialmente all'applicazione sono ancora numerosi poiché è necessario valutare la fattibilità tecnica ed economica delle singole soluzioni individuate, tramite uno sviluppo grafico, una validazione numerica e un'analisi di mercato.

Lo scopo del presente elaborato non è lo sviluppo di una singola applicazione, ma piuttosto quello di esporre il metodo di progettazione bioispirata. Tuttavia, per rendere più concreto lo studio e per confermare la validità della teoria



esposta, si è ritenuto utile uno sviluppo grafico di alcune delle soluzioni proposte, con un breve accenno alle principali problematiche di uno sviluppo pratico.

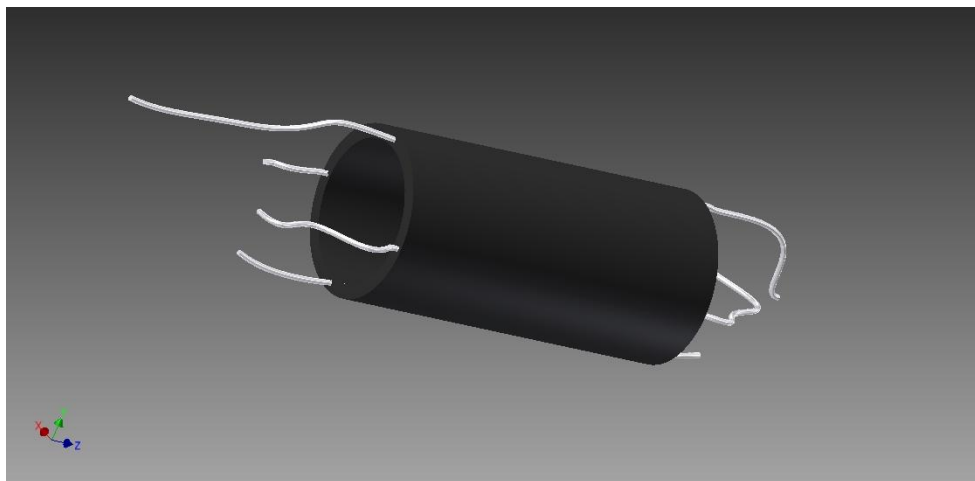
Tra tutte le soluzioni individuate ne sono state scelte due: la proboscide retrattile della farfalla e gli aculei del riccio per l'assorbimento degli urti. La scelta è ricaduta su queste due strategie naturali poiché sono quelle che più si prestano a un'implementazione grafica sia in termini di complessità che di somiglianza con la soluzione naturale.

La proboscide della farfalla ispira una tubatura, in grado di piegarsi autonomamente, che sfrutta le notevoli forze di richiamo elastico, proprie delle SMA.

L'altra applicazione, ispirata alla funzione propria degli aculei del riccio di attutire gli urti, sfrutta la caratteristica tipica delle SMA di assorbimento di energia.

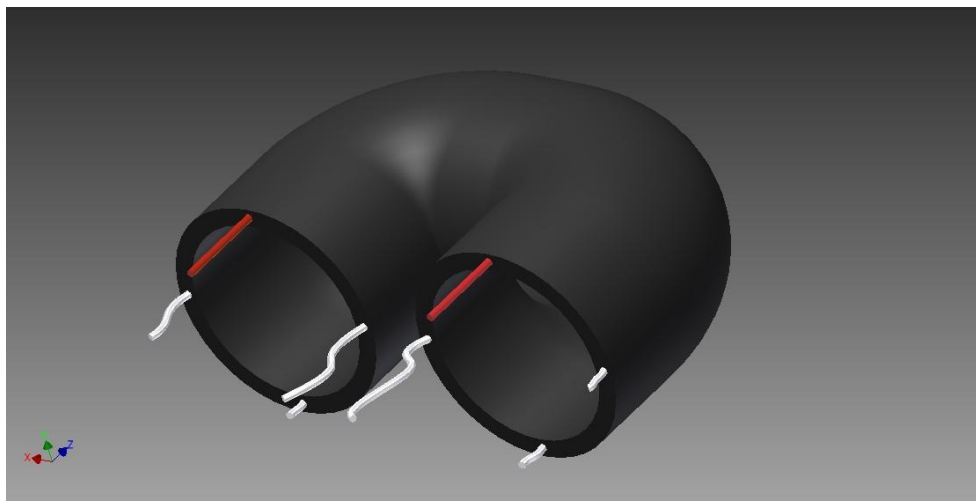
Per lo sviluppo grafico si fa riferimento al programma Autodesk Inentor® nella versione 2012. Grazie a questo software è possibile rappresentare in 3D le soluzioni ideate.

Per quanto riguarda la tubatura bioispirata si è pensato a dei fili Ni-Ti -con diametro 0,5mm- annegati nella struttura di un tubo di gomma con un diametro di 24mm. Sono stati inseriti quattro fili a memoria di forma in modo tale che ognuno di essi garantisca una direzione di movimentazione. ognuno dei quattro fili, se adeguatamente scaldato, deforma -passando in fase austenitica- il tubo e gli altri tre fili in fase martensitica (facilmente deformabili).



**Figura 91: sezione di tubo bioispirato prima indeformato**

Se un filo, opportunamente educato secondo la geometria richiesta, viene attraversato da corrente, si scalda e genera la forza necessaria a deformare il tubo.



**Figura 92: immagine del tubo deformato**

Il colore rosso identifica il filo che, scaldato, genera la geometria ricercata. Ogni filo è collegato a una sorgente di energia in maniera tale che ognuno di essi possa essere comandato in maniera indipendente.

Il comportamento che ci si aspetta dalla soluzione bioispirata è quello di una normale tubatura che segue la direzione impostagli dal flusso, fino a che non viene azionato uno dei fili di Ni-Ti; a questo punto la forza generata dallo SMA wire impone una nuova geometria al tubo e quindi al flusso.

Uno dei maggiori problemi riguardanti tutte le tipologie di applicazioni che sfruttano fili di Ni-Ti relativamente lunghi è l'adeguato riscaldamento di tutto lo SMA wire. Le leghe a memoria di forma non godono di un'ottima conducibilità ed è perciò complicato scaldare fili lunghi tramite il solo effetto Joule. Un ottimo conduttore come il rame presenta una conducibilità termica di  $386 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ , mentre la lega Nitinol varia tra gli  $8,5 \text{ W/m}^\circ\text{K}$  della fase martensitica e i  $18 \text{ W/m}^\circ\text{K}$  della fase austenitica. A livello pratico il problema è che il calore necessario alla trasformazione martensite-austenite non copre tutta la lunghezza del filo. Si avrà una prima parte, più vicina all'ingresso della corrente, che genererà il richiamo elastico desiderato, mentre le parti più lontane non avranno l'energia necessaria alla trasformazione.

Per le ragioni appena citate l'applicazione ideata può essere indicata per raccordi o tubi di lunghezza ridotta con quattro movimentazioni -una per filo- possibili. Se necessario l'aggiunta di ulteriori SMA wires renderebbe possibili più movimentazioni. Le dimensioni dell'applicazione, superiori di un ordine di



grandezza rispetto al caso naturale, possono essere sensibilmente ridotte, rendendola idonea anche per scopi medicali.

Il calcolo della forza generata nel richiamo elastico degli SMA wires dipende da diversi fattori. La risposta in forza varia sensibilmente sia con la lunghezza del filo sia con l'ampiezza e la fase dell'input elettrico. Esistono diverse modellazioni numeriche del fenomeno (57) (58) (59) che richiedono però un diverso approccio caso per caso poiché contengono variabili dipendenti dalla tipologia di applicazione. In generale però si lega l'output in forza all'input in corrente:

$$F(s) = G(s) * P(s)$$

dove  $F(s)$  e  $P(s)$  sono le trasformate di Laplace  $-s$  è l'insieme continuo dei dati-rispettivamente della forza in uscita e della potenza scaldante in ingresso. Il termine  $G(s)$  è la funzione di trasferimento che definisce il rapporto tra  $F$  e  $P$ .

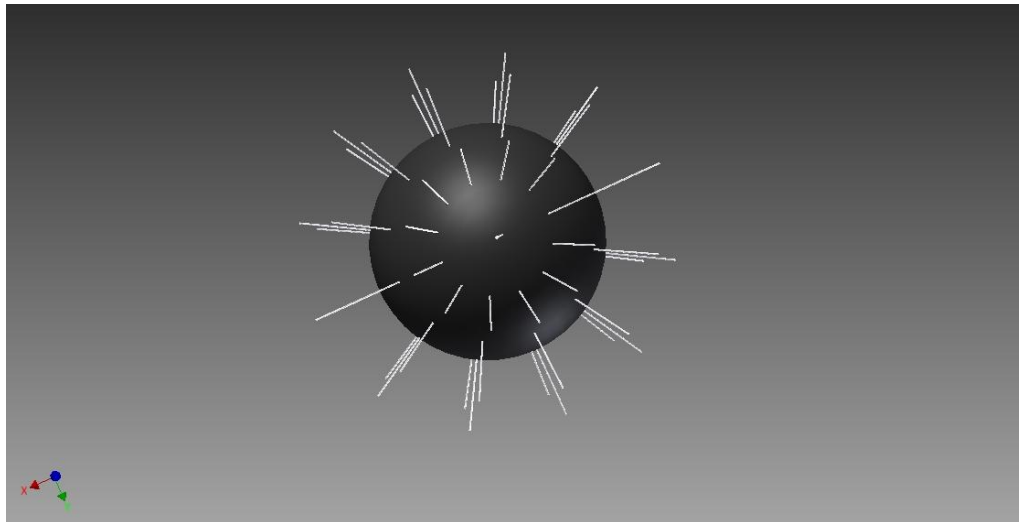
$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1}$$

Il parametro  $K$  è una costante legata al materiale e  $T$  è la temperatura rilevata.

In molti casi è più veloce caratterizzare i valori di forza facendo riferimento a risultati empirici ottenuti tramite celle di carico; per un filo Ni-Ti di 0,5 mm di diametro e 4cm di lunghezza (60) si sviluppano forze fino a 9N. Per fili più sottili, come nel caso di un diametro di 0,125mm, si scende a un massimo di forza pari a circa 3N. Sarà necessario valutare sperimentalmente la forza necessaria per incurvare la tubatura e scegliere di conseguenza il diametro minimo dello SMA wire per l'applicazione richiesta.

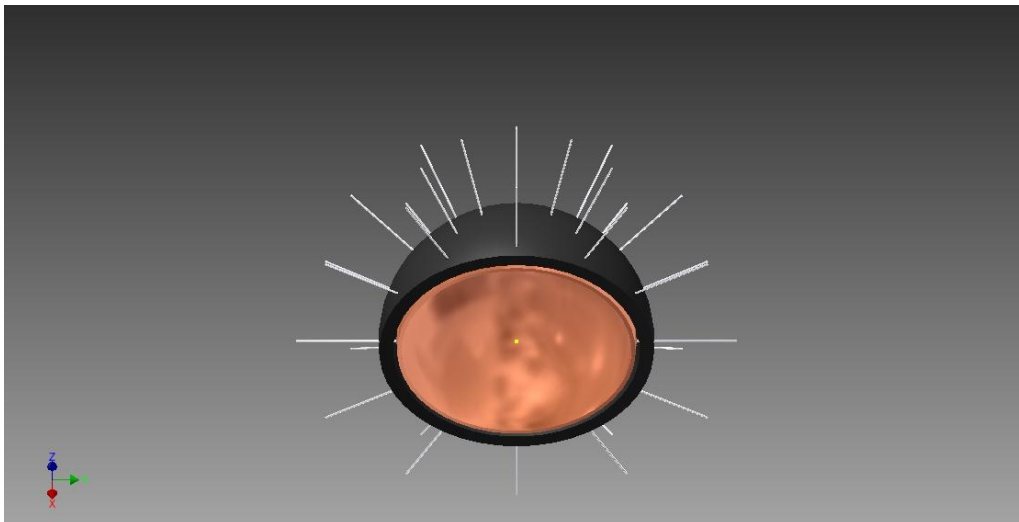
Nel caso in cui si necessita di una tubazione più lunga bisogna ipotizzare un sistema integrativo che garantisca il sufficiente apporto di calore per tutta la lunghezza del filo. Esistono due strategie: l'utilizzo di un materiale aggiuntivo, oppure elementi scaldanti separati; quest'ultima potrebbe però rendere troppo pesante e ingombrante la struttura. Se in parallelo al filo in Ni-Ti si fa correre un filo in materiale conduttore come il rame, ogni porzione di lega a memoria di forma avrebbe l'energia necessaria.

La seconda applicazione scelta per lo sviluppo grafico è quella del riccio. Si ipotizza un'imitazione degli aculei come sistema per l'assorbimento degli urti. A livello grafico il corpo dell'animale, quando si sente in pericolo, può essere ricondotto a un solido di forma sferica dalla cui superficie fuoriescono gli aculei di circa 3 cm di lunghezza. Per quanto riguarda le dimensioni si è scelto di mantenere l'ordine di grandezza proprio della soluzione naturale; la base di partenza è una sfera di 20 cm di diametro.



**Figura 93: sistema di assorbimento urti bioispirato**

Nel caso di un urto gli aculei possono deformarsi e assorbire energia, passando così allo stato martensitico deformato, per poi tornare in posizione eretta se adeguatamente scaldati.



**Figura 94: sezione dell'applicazione**

La cassa esterna è in gomma (parte nera), mentre la sfera alla quale sono collegati gli SMA wires è in rame in maniera tale da poter portare l'energia necessaria al riscaldamento dei fili. La sfera dovrebbe contenere anche i sistemi necessari allo stoccaggio dell'energia elettrica e di collegamento. In questa applicazione il comportamento atteso è quello della soluzione naturale, cioè che gli aculei artificiali si pieghino a causa della forzante dovuta all'impatto e

facendo ciò assorbano energia. Rilevato l'impatto, il sistema provvede a far passare corrente attraverso i fili di Ni-Ti, in maniera tale che gli aculei tornino alla condizione iniziale e siano pronti ad assorbire altri urti. La parte in gomma serve sia come ulteriore elemento smorzante, sia come protezione per la parte elettrica

Il comportamento atteso è l'assorbimento di energia, da parte degli aculei, dovuto alla deformazione della fase martensitica. In questo caso non risulta di interesse la forza generata nel richiamo ma l'assorbimento energetico.

In generale la capacità di smorzamento si valuta empiricamente individuando il *fattore di perdita* definito come:

$$\eta = \frac{\Delta W}{2 * \pi * W}$$

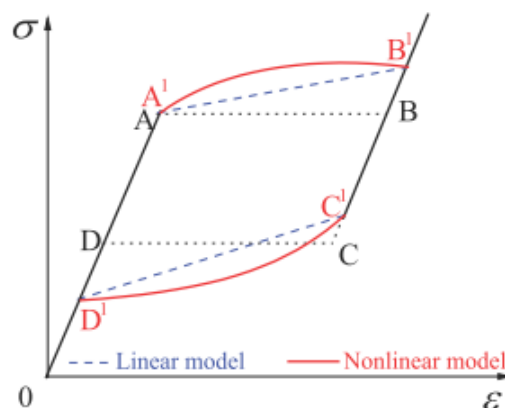
$W$  = energia applicata

$\Delta W$  = energia dissipata

Il fattore di perdita è riferito ai casi nei quali non vi sia deformazione plastica, cioè quando deformazione e stress tornano al valore iniziale. Questo fattore si valuta sperimentalmente.

La capacità di assorbire energia è legata al fenomeno di isteresi ed esistono diversi metodi per quantificare analiticamente l'energia assorbita.

Uno studio condotto all'università di Bath (61) dimostra come per l'assorbimento di energia sia preferibile avere uno stato martensitico indotto da sforzo (SIM: Stress Induced Martensite) poiché la capacità di assorbimento cresce del 60% circa rispetto al caso austenitico. Ottenuto lo stato martensitico indotto varia anche l'area legata al ciclo di isteresi, ed esistono diverse possibilità di modellazione (62) per misurare l'area sottesa alle curve.



**Figura 95: diagramma isteresi stress-deformazione**

Nel caso in cui lo smorzamento non partisse da SIM l'energia assorbita corrisponderebbe a  $S_{ABCD}$ . Se si considera un legame lineare tra stress e deformazione e si deforma partendo da SIM l'area di interesse è  $S_{A^1B^1C^1D^1}$ ; come si può osservare, a conferma di quanto detto prima,  $S_{A^1B^1C^1D^1} > S_{ABCD}$ .

$$S_{A^1B^1C^1D^1} = \frac{1}{2} (\sigma_{A^1} + \sigma_{B^1} + \sigma_{C^1} + \sigma_{D^1}) \varepsilon_m = \omega(A_S) - \omega(M_S) + \frac{1}{2} [\omega(\vartheta_{A^1}) + \omega(\vartheta_{B^1}) - \omega(\vartheta_{C^1}) - \omega(\vartheta_{D^1})]$$

Le  $\sigma$  corrispondono agli sforzi associati ai vari punti,  $\varepsilon_m$  è lo sforzo di trasformazione a SIM,  $\omega$  corrisponde al  $\Delta$  di energia chimica tra fase austenitica e martensitica e  $\vartheta$  rappresenta la temperatura del materiale.

I principali vantaggi derivanti dall'utilizzo di SMA sono: il non invecchiamento del materiale, la mancanza di manutenzione, la leggerezza e la semplicità dovuta ai pochi componenti. I principali svantaggi restano il costo della materia prima e la difficoltà di lavorazione e saldatura.

## 8. Conclusioni

Nei primi capitoli del lavoro di tesi si introducono i concetti di biomimicry e Shape Memory Alloy contestualizzandoli in termini industriale-applicativo.

Durante la trattazione sono stati affrontati tutti i principali passi da percorrere per la ricerca di applicazioni bioispirate. In un primo momento è stato ricostruito a ritroso il procedimento utilizzato nelle pubblicazioni scientifiche che sviluppano applicazioni bioispirate e sfruttano la tecnologia SMA. In questi casi si disponeva a priori della funzione da svolgere e il compito era quello di individuare la soluzione naturale che, se correttamente imitata, poteva garantire un miglioramento delle performance dell'applicazione. Nei capitoli successivi si è provveduto a catalogare, secondo i parametri della biomimicry taxonomy, tutte le strategie naturali imitate negli studi proposti. Questo passo è servito sia a spiegare il funzionamento della tassonomia sia a individuare le voci per le quali l'utilizzo delle leghe a memoria di forma era già stato sfruttato. Successivamente la ricerca si è spostata sulle funzioni e strategie naturali -non ancora sfruttate- per le quali le SMA possono garantire prestazioni e risultati altrimenti non ottenibili. È stata quest'ultima la parte più corposa e dispendiosa in termini di tempo per due ragioni; in primis perché le soluzioni catalogate da analizzare sono numerosissime ma sopra tutto poiché ogni strategia naturale catalogata ha richiesto la comprensione dei meccanismi biologici correlati. Non bisogna trascurare il fatto che le voci (i testi presenti nelle singole strategie) di Asknature.org sono state sviluppate da biologi; questo rende le spiegazioni più tecniche e talvolta di difficile comprensione.

Dopo aver individuato tutte le possibili applicazioni si valuta se sono realmente innovative e se la tecnologia SMA sia quella che garantisce le migliori performance. Il lavoro termina con la scelta e lo sviluppo grafico di due soluzioni tra quelle individuate.

Il principale augurio è quello che tutti i punti sviluppati nella trattazione abbiano fatto comprendere il procedimento per la progettazione bioispirata e che, potendo pertanto replicare su larga scala questa procedura, sia possibile una reale innovazione tecnologica ispirata alla estrema efficienza che la natura cela in ogni sua piccola invenzione. Si auspica inoltre che le applicazioni ipotizzate in questo studio possano essere la base di partenza per un effettivo sviluppo pratico.

## Bibliografia:

1. [www.aitriz.org](http://www.aitriz.org). [Online]
2. <http://biomimicry.net>. [Online]
3. [www.velcro.com](http://www.velcro.com). [Online]
4. *Artificial Lotus Effect: Carbon nanotubes with nanoscopic paraffin coating form superhydrophobic, self-cleaning surfaces. A research team led by Ayyappanpillai Ajayaghosh at the National Institute for Interdisciplinary Science and Technology (Trivandrum, India)*. s.l. : journal Angewandte Chemie.
5. [www.nanotechweb.org](http://www.nanotechweb.org). [Online]
6. [http://www.lesciienze.it/news/2008/10/10/news/dal\\_geco\\_un\\_eccellente\\_adesivo\\_direzionale-578072/](http://www.lesciienze.it/news/2008/10/10/news/dal_geco_un_eccellente_adesivo_direzionale-578072/). <http://www.lesciienze.it>. [Online]
7. *Nanotube Adhesive Sticks Better Than A Gecko's Foot*. **Akron, Pulickel Ajayan Rensselaer Polytechnic Institute and the University of**. s.l. : ScienceDaily, 2007.
8. *An artificial cornea is in sight, thanks to biomimetic hydrogels*. **Center, Curtis W. Frank and Stanford University Medical**. 2006.
9. <http://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/nel-mondo/eastgate-building-termitaio.html>. <http://www.architetturaecosostenibile.it>. [Online]
10. *Biomimicry as a Problem Solving Methodology in Interior Architecture*. **El-Zeiny, Rasha Mahmoud Ali**. Bangkok, Thailand : SciencDirect, 2012.
11. [www.fastskinz.com](http://www.fastskinz.com). [Online]
12. [www.asknature.org/strategy/938e8c4d8e2bf786fa5c9922d181273e](http://www.asknature.org/strategy/938e8c4d8e2bf786fa5c9922d181273e). [www.asknature.org](http://www.asknature.org). [Online]
13. *The Silent Flight of the Owl*. **Lilley, Geoffrey**. s.l. : Burrus, 2002.
14. **George B. Kauffman, Isaac Mayo**. The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications. *The Chemical Educator Vol. 2*. 1997.
15. **Arrichiello, Vincenzo**. *Studio di fattibilità: Trasferimento di tecnologie alle PMI di La Spezia operanti nel settore delle lavorazioni del titanio*. 2000.
16. <http://www.ing.unitn.it/~colombo/NitiAerospace/3nitinol.htm>. <http://www.ing.unitn.it>. [Online]
17. <http://memry.com/nitinol-1q/nitinol-fundamentals/physical-properties>. [Online]
18. <http://jmmedical.com/resources/221/Nitinol-Technical-Properties.html>. [Online]
19. *Studio di una protesi "Stent Graft" autoespandibile in materiale superelastico*. **Battini, A. Mazzù and D.** Palermo : s.n., 2011.
20. **industriale, FIP**. *Basilica S. Francesco d'Assisi*.
21. —. *Cattedrale di San Feliciano*.
22. *Micro Air Vehicles for*. **W. Davis, B. Kosicki, M. Boroson and D. Kostishack**. 2, s.l. : The Lincoln Laboratory Journal, 1996, Vol. 9.
23. *FE analysis of SMA -based bio- inspired bone-joint system*. **Seelecke, S. Yang and S.** s.l. : IOP Publishing, 2009.
24. *Biomechanics of smart wings in a bat robot: morphing wings using SMA actuators*. **J. Colorado, A. Barrientos, C. Rossi and K. S. Breuer**. 2012.
25. **USA, Department of the Navy**. The Navy Unmanned Undersea Vehicle. 2004.

26. *Bio-inspired Actuating System for Swimming Using Shape Memory Alloy Composites*. **T. Tao, Y.-C. Liang and Minoru Taya**. s.l. : International Journal of Automation and Computing, 2006.
27. *Use of a Shape Memory Alloy for the Design of an Oscillatory Propulsion System*. **Swain, N. Shinjo and G.W.** 3, s.l. : Journal of oceanic Engineering, 2004, Vol. 29.
28. *A micro-robot fish with embedded SMA actuated flexible biomimetic fin*. **Z. Wang, G. Hang, J. Li, Y. Wang and K. Xiao**. s.l. : ScienceDirect, ELSEVIER, 2008.
29. *Design and testing of a biomimetic tuna shape memory alloy induced propulsion*. **Crawford, A. Suleman and C.** s.l. : ScienceDirect, ELSEVIER, 2007.
30. <http://www.asfodelo.info/luigi/dottorato/cap1.pdf>. [Online]
31. **Virgilli, V.** *Materiali a memoria di forma: caratterizzazione e applicazioni nel campo dei beni culturali*. Bologna : s.n., 2008.
32. *An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator*. **B. Kim, M.G. Lee, Y.P. Lee, Y. Kim and G. Lee**. s.l. : ScienceDirect, ELSEVIER, 2005.
33. *International Conference on Robotic & Automation: A SMA Actuated Artificial Earthworm*. **A. Mencias, S. Gorini, G. Pernorio, P. Dario**. New Orleans : s.n., 2004.
34. *Bio-inspired Miniature Suction Cups Actuated by Shape Memory Alloy*. **H. Bing-Shan, W. Li-Wen, F. Zhuang and Z. Yan-Zheng**. 3, s.l. : International Journal of Advanced Robotic Systems, 2009, Vol. 6.
35. *A bio-inspired shape memory alloy composite (BISMAC) actuator*. **A. A. Villanueva, K. B. Joshi, J. B. Blottman and S. Priya**. s.l. : IOPublishing, 2009.
36. [http://www.bostondynamics.com/robot\\_rhex.html](http://www.bostondynamics.com/robot_rhex.html). [Online]
37. <http://www-cdr.stanford.edu/biomimetics/documents/sprawlita/sprawlita.html>. [Online]
38. *Myriapod-like ambulation of a segmented microrobot*. **Wood, K. L. Hoffman and R. J.** s.l. : Auton Robot, 2011.
39. *A bio-inspired, high-authority actuator for shape morphing structures*. **Wadley, D. M. Elzey, A. Y. N. Sofla and H. N. G.** s.l. : Smart Structures and Materials, 2003.
40. <http://www.asknature.org/aof/browse>. [Online]
41. <http://www.asknature.org/strategy/096a1284d53f85c1c8afb41462b570ff>. [Online]
42. <http://www.asknature.org/strategy/690061ac81a9b652f8e455c8a7acd137>. [Online]
43. <http://www.asknature.org/strategy/974b50f0feceaec0f33e8d5466b006d1>. [Online]
44. <http://www.asknature.org/strategy/4d6ec6aa74b7b2b4948ca715cb5302bc>. [Online]
45. <http://www.asknature.org/strategy/4190fb7f0d16994ddd143b1fd8dbc049>. [Online]
46. <http://www.asknature.org/strategy/5e1a7691d5a80b4a961cd2a69bcb8d23>. [Online]
47. <http://www.asknature.org/strategy/7cde245a38982f142ea05f4fea09ac0c>. [Online]
48. <http://www.asknature.org/strategy/0721b23e9bf2e542d5dcad3dff267e1b>. [Online]
49. <http://www.asknature.org/strategy/29204f007bb1d29b7c2f63a580fd7d4d>. [Online]
50. <http://www.asknature.org/strategy/b4668ee7e31ed421f4dcd1d7dc6a36fe>. [Online]
51. <http://www.asknature.org/strategy/a2a8d474a2a523727cad40d935dd3f79>. [Online]
52. <http://www.asknature.org/strategy/4b8b8767fa5c8dd7d5e867a42b571b46>. [Online]
53. <http://www.asknature.org/strategy/7176d4798bfeddb04f9360490df3ae4e9>. [Online]
54. <http://www.asknature.org/strategy/6df897aeaf7cf2a4ccd6d5dc3aee5a40>. [Online]
55. <http://www.asknature.org/strategy/05b44f04114a533975a1acde7000bd9b>. [Online]
56. <http://www.asknature.org/strategy/ddd2dba79b2f93e58e39f680c5202247>. [Online]
57. *Fast, Accurate Force and Position Control of Shape Memory Alloy Actuators*. **Teh, Yee Harn**. 2008.
58. *Force Control of Shape Memory Alloy Wire Using Fuzzy Controller*. **O. Rohani, A. Yousefi-Koma, A. Rezaeeian and A. Doosthoseini**. Theran : SPIE digital library, 2008.
59. *Development and experimental consideration of SMA/CFPR actuator for vibration control*. **Kikushima, K. Yuse and Y.** s.l. : ELSEVIER, 2005.
60. *Using shape memory alloy*. **Aldam, Tim**. 11, s.l. : Catalyst, 2008.

61. *Structural energy dissipation in extreme loading events using shape memory alloy.* **Angioni, S. L.** 2011.
62. *Modeling of rate-dependent damping capacity of one-dimensional superelastic shape memory alloy.* **S. Yang, G. Dui and B. Liu.** s.l. : Journal of Intelligent Material System and Structures SAGE, 2012.
63. **Cocco, Parolari.** Tesi di laurea: Comportamento termo-meccanico di fili sottili di forma per attuatori: Studio ed ottimizzazione dei parametri di processo e funzionali. 2010.
64. **Virgili.** Tesi dottorato di ricerca: Materiali a memoria di forma: caratterizzazione e applicazioni nel campo dei beni culturali. Bologna : s.n., 2008.
65. **Tenti.** Tesi di laurea: Sviluppo di un attuatore SMA per la movimentazione di un robot esapode per esplorazione planetaria. 2012.
66. **Loggia, La.** Tesi di laurea: Progettazione sperimentale di un dispositivo di sicurezza basato su attuatori in lega a memoria di forma. 2010.