



Università degli Studi di Padova

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Studio di un attuatore plant-inspired per operazioni
di deployment**

Relatore:
Mirco Zaccariotto

Laureando:
Alessandro Piccolin
Matricola 1156720

Anno Accademico 2018–2019

SOMMARIO

Le piante utilizzano eleganti applicazioni di meccanica dei fluidi per realizzare il movimento; lo studio delle piante quindi, oltre ad essere volto alla comprensione dei sistemi naturali, può essere la base per l'identificazione e il successivo utilizzo di metodologie ad essa ispirate.

Tra i primi studiosi del mondo vegetale vi è Darwin che descriveva questo mondo definendolo "uno dei più belli del mondo".

In questa tesi sono descritte e analizzate varie metodologie di attuazione utilizzate dalle piante e si è individuata quella ideale per la realizzazione di un meccanismo utile al deployment.

Lo studio prende ispirazione dal movimento di chiusura della pianta carnivora Venus Flytrap, le cui foglie si chiudono a seguito di un fenomeno di instabilità a snap dovuto a fenomeni idraulici, con lo scopo di utilizzare tale metodo per il deployment.

Per ottenere tale risultato viene impiegata una struttura dotata di una curvatura deformata per mezzo di una molla.

INDICE

1. <i>Introduzione</i>	1
2. <i>Mondo vegetale</i>	13
2.1 Pressione idrostatica e osmotica	14
2.2 Movimenti idraulici	21
2.3 Tipologia di attuatori delle piante	24
2.3.1 Attuatori osmotici	24
2.3.2 Attuatori osmotici con instabilità	26
2.4 Meccanismi plant inspired	34
2.4.1 Meccanismi con attuatori di pressione	34
2.4.2 Meccanismi con attuatori basati sul fenomeno di instabilità	37
3. <i>Attuatore che impiega shape memory alloy</i>	41
3.1 Comportamento meccanico degli shape memory alloy	42
3.1.1 Trasformazione martensitica degli shape memory alloy	45
3.1.2 Shape memory effect	48
3.1.3 Pseudoelasticità	49
3.1.4 Effetto della microstruttura negli shape memory effect	51
3.1.5 Fatica	53
3.1.6 Two way SMA	55
3.2 Dimensionamento di un attuatore shape memory effect	56
3.2.1 Materiale	56
3.2.2 Modello meccanico	59
3.2.3 Modello termico	74
3.2.4 Attuatore	80
4. <i>Bend propagation actuator</i>	83
4.1 Superfici isometriche	83
4.2 Posizionamento dell'attuatore	87
4.3 Modello agli elementi finiti	89
4.3.1 Geometria	89
4.3.2 Materiale	92

4.3.3	Mesh	93
4.3.4	Loads	96
4.3.5	Analisi	98
5.	<i>Risultati</i>	99
5.1	Curvatura concorde	100
5.1.1	Superficie 90 °	100
5.1.2	Superficie 60° e 180 °	109
5.1.3	Superfici dalla diversa lunghezza	116
5.1.4	Superfici dai diversi rapporti dimensionali	120
5.1.5	Analisi della fase di ritorno	124
5.2	Curvatura discorde	127
5.3	Metodo di utilizzo	134
5.3.1	Configurazione accoppiata	134
5.3.2	Peso	138
5.4	Dimensionamento di attuatore shape memory alloy	140
6.	<i>Conclusioni e sviluppi futuri</i>	147

ELENCO DELLE FIGURE

1.1	Illustrazione di un campo di ninfee	2
1.2	Crystal palace di Londra	3
1.3	Velcro	4
1.4	Foglia di loto	4
1.5	Esempio di dispiegamento nella robotica	5
1.6	Telescopio Webb	6
1.7	Tape spring	7
1.8	Deployment del tape spring	7
1.9	Esempio di movimento della pianta	9
1.10	Esempio di SMA	10
2.1	Cellula animale e vegetale	15
2.2	Gradiente osmotico nella cella	16
2.3	Parete cellulare	17
2.4	Differenza tra protoplasto e apoplasto	18
2.5	Pressione nella cella	19
2.6	Grafico velocità movimenti idraulici	23
2.7	Movimento di un fungo	24
2.8	Stoma	25
2.9	Mimosa	26
2.10	Pianta carnivora	27
2.11	Cambio di curvatura nella pianta	29
2.12	Variazione sulla superficie della pianta	29
2.13	Fasi di movimento della foglia	30
2.14	Struttura della foglia	31
2.15	Snap per diversi valori di α	33
2.16	Struttura adattiva	35
2.17	Esperimento struttura adattiva	36
2.18	Modifica prestazione ala	36
2.19	Robot venus flytrap	38
2.20	Snap robot	39
3.1	Grafico potenza/peso di diverse tipologie di attuatore	41

3.2	Tabella proprietà fisica di martensite e austenite	43
3.3	Processo di ottenimento di martensite detwinned	44
3.4	Effetto superelastico	45
3.5	Ciclo deflessione-temperatura SMA	46
3.6	Relazione carico critico- temperatura della trasformazione mar- tensitica	48
3.7	Schema temperatura-sforzo-deformazione SMA	49
3.8	Diagramma sforzo- temperatura SMA	50
3.9	Grafico sforzo deformazione superelasticità	51
3.10	Effetto superelastico monocristallo	52
3.11	Effetto superelastico policristallino	53
3.12	Ciclo di carico SMA	54
3.13	Proprietà fatica SMA	54
3.14	Diagramma temperatura deformazione SMA a doppia via	55
3.15	Cambiamento cristallino Nitinol	57
3.16	Temperature di transizione di diversi SMA	58
3.17	Proprietà di diversi SMA	59
3.18	Geometria molla SMA	60
3.19	Forza deformazione con teorica lineare e non lineare	61
3.20	Angolo di pitch in funzione dello sping index	62
3.21	Cerchi Von Mises nelle diverse configurazioni	64
3.22	Grafico caratteristico SMA e ottenimento di H^{cur}	66
3.23	Variazione di diametro della molla per grandi deformazioni	67
3.24	Grafico forza-spostamento e sforzo-deformazione con variazi- one di diametro	68
3.25	Variazione geometrica durante la deformazione	69
3.26	Grafici sperimentali austenite e martensite	72
3.27	Relazione tra risultati teorici e simulazioni di SMA	73
3.28	Variazione di martensite in funzione della temperatura	74
3.29	Calorimetro differenziale	75
3.30	Curva ottenuta dal calorimetro differenziale per ciclo di SMA	76
3.31	Configurazioni per ottenere la bias force per l'utilizzo dell'SMA	80
4.1	Piano tangente e normale ad una superficie	84
4.2	Superfici dalla diversa curvatura	85
4.3	Posizionamento classico BPA	86
4.4	Problematiche di utilizzo di BPA	87
4.5	Posizionamento di SMA negli MPA	88
4.6	Geometria modello 60°	91
4.7	Geometria modello 90°	91
4.8	Geometria modello 180°	91

4.9	Lamina di BeCu	92
4.10	Prova di trazione materiale	93
4.11	Nodo aggiuntivo creato alle estremità	94
4.12	MPC all'estremità	94
4.13	Nodo traslato di -0.002 mm	95
4.14	Nodo traslato di 0.002 mm	95
4.15	Carico applicato all'MPC	96
4.16	Modello di angolo 60 °	97
4.17	Modello di angolo 90 °	97
4.18	Modello di angolo 180 °	98
5.1	Nodo all'estremità opposta al SMA	99
5.2	Spostamenti modello 90°	101
5.3	Stress sulla superficie	103
5.4	Grafico forza spostamento per superficie di 90°	105
5.5	angolo sotteso dalla superficie	106
5.6	Grafico forza angolo sotteso per superficie di 90°	106
5.7	Rotazione primaria e secondaria per superficie di 90 °	107
5.8	Punto in cui si valutano gli spostamenti	108
5.9	Grafico coordinata x ed y per superficie di angolo sotteso pari a 90°	109
5.10	Deformazioni e stress della superficie di 60 ° pre snap	110
5.11	Deformazioni e stress della superficie di 60 ° post snap	111
5.12	Deformazioni e stress della superficie di 180 ° pre snap	112
5.13	Deformazioni e stress della superficie di 180 ° pre snap	113
5.14	Grafico forza spostamento per le diverse superfici	114
5.15	Grafico coordinata x e spostamento per le diverse curvature	115
5.16	Grafico curvatura spostamento per diverse curvature	115
5.17	Grafico forza spostamento per superfici di lato 0.05 m e angolo di 60° e 90°	116
5.18	Grafico coordinata x spostamento per superfici di lato 0.05 m e angolo di 60° e 90°	117
5.19	Grafico forza spostamento per superfici di lato 0.15 m e angolo di 60° e 90°	117
5.20	Grafico coordinata x spostamento per superfici di lato 0.15 m e angolo di 60° e 90°	118
5.21	Comparazione di grafici forza spostamento per le diverse lun- ghezze della superficie per angolo 60°	119
5.22	Comparazione di grafici forza spostamento per le diverse lun- ghezze della superficie per angolo 90°	119
5.23	Modello di superficie con AR pari a 2	120

5.24	Modello di superficie con AR pari a 3	121
5.25	Modello di superficie con AR pari a 4	121
5.26	Grafico forza spostamento per diversi AR	122
5.27	Grafico coordinata x e spostamento per i diversi AR	123
5.28	Grafico coordinata y e spostamento per i diversi AR	123
5.29	Deformazione di ritorno alla configurazione iniziale	125
5.30	Grafico forza deformazione per il ritorno	126
5.31	MPC con nodo posto sopra la superficie	127
5.32	Spostamenti modello 90° per curvatura finale discorde	128
5.33	Stress sulla superficie dalla curvatura discorde	130
5.34	Grafico forza spostamento per angolo sotteso pari a 90 ° discorde	131
5.35	Grafico angolo sotteso spostamento della curvatura iniziale e secondaria di segno opposto	132
5.36	Grafici forza spostamento per due diversi angoli sottesi: 60° e 90°	133
5.37	Superfici parallele con curvatura finale concorde	134
5.38	Superfici parallele con curvatura finale discorde	135
5.39	Grafici forza spostamento per modello singolo e accoppiato concorde	135
5.40	Grafici forza spostamento per modello singolo e accoppiato discorde	136
5.41	Modello di superfici sovrapposte	136
5.42	Stress di superfici sovrapposte	137
5.43	Modello con peso all'estremità	138
5.44	Grafico forza-spostamento per diversi pesi	139
5.45	Grafico coordinata x-spostamento per diversi pesi	139
5.46	Esempio di forza applicata dall'SMA	140

ELENCO DELLE TABELLE

4.1	Tabella che definisce i valori di raggio necessari ad ottenere gli angoli sottesi adatti	90
4.2	Tabella che definisce le proprietà del materiale.[3]	93
5.1	Tabella che definisce i valori di raggio per i diversi AR	121
5.2	Tabella che definisce le proprietà dell'SMA al nitinol [32]	141
5.3	Tabella che definisce i parametri geometrici dell'SMA per diverse superfici.	143
5.4	Tabella che definisce i tempi di dispiegamento e ritorno per diverse superfici e diversi valori di corrente	144
5.5	Tabella che definisce i tempi di dispiegamento e ritorno per diverse superfci e diversi valori di corrente	144

LISTA SIMBOLI

P Pressione

A Area

V Volume

d Diametro filo

D Diametro molla

N Numero avvolgimenti

ν Viscosità

F Forza, carico

S entropia

ε Deformazione

t Tempo

E Modulo di Joung

G Modulo di taglio

ν Coefficiente di Poisson

ρ Densità

τ Sforzo

ξ Frazione martensite

C Spring index

T Temperatura

A_s A_s Temperatura transizione austenite

M_s M_s Temperatura transizione martensite

X Calore latente

σ_s Tensione di snervamento

δ Spostamento, deformazione

R Resistenza

h Coefficiente convettivo

ξ_S Frazione di martensite detwinning

1. INTRODUZIONE

Da sempre l'ingegneria è alla ricerca di nuove tecnologie in grado di modificare, ottimizzare e, alle volte, rivoluzionare le tecnologie attuali.

Nel periodo in cui la tecnica è al massimo dell'espansione, la ricerca di queste nuove tecnologie verte sull'ingegno e la capacità di osservazione e comprensione di fenomeni al giorno d'oggi ancora non compresi o addirittura inosservati, con lo scopo di carpire informazioni ed ottenere qualcosa di nuovo, di mai analizzato oppure semplicemente ottenere uno sviluppo di qualcosa di attuale.

Lo scopo di questa tesi è la ricerca di una tecnologia che prende le fondamenta sempre da un fenomeno naturale e che questo venga utilizzato per gestire e sviluppare una metodologia che consenta il dispiegamento.

Prima di definire il problema è giusto però accennare perchè la ricerca si concentra nell'osservazione dei fenomeni naturali per ottenere dei risultati e perchè ciò avviene; è perciò utile definire la storia di questo tipo di ricerca e i settori in cui se ne trova un'applicazione.

Se l'uomo ha sempre cercato di piegare la natura al proprio volere, con il tempo si è accorto di quanto essa potesse essere straordinaria e piena di meraviglie e dunque cerca di apprendere da essa.

Proprio in questa parte della ricerca nasce la branca dell'ingegneria che prende il nome di biomimesi (dal latino bios=natura e mimesis=imitazione) che studia i fenomeni naturali per cercare di riprodurli o prenderli come fulcro per l'ideazione di qualcosa di nuovo e non ancora sviluppato[2].

L'osservazione di fenomeni naturali ha sempre affascinato l'uomo, basti pensare a Leonardo che nel suo studio per la costruzione di macchine volanti, osservava il volo degli uccelli per cercare di capire tale dinamica e di utilizzarla per il proprio fine.

Vi è però una discrepanza tra l'osservazione con lo scopo di apprendere tali tecniche e la loro effettiva utilità pratica, ci sono voluti molti anni infatti per avere la prima applicazione di studi di biomimetica.

Primo e famoso esempio di tale scienza nella pratica risale al 1851 quando, in occasione della prima Esposizione Universale, si era alla ricerca di un simbolo che proiettasse verso il futuro e verso quella che poteva essere l'evoluzione della ricerca e della tecnologia.

Come icona di questo avvenimento l'architetto Joseph Paxton, non a caso famoso per le sue doti di costruzioni di serre, decise di progettare un edificio innovativo, con lo scopo di mostrare quanto la natura potesse essere straordinaria e quanto si potesse apprendere dalla sua osservazione, in questo caso grazie all'osservazione delle ninfee.

La Figura 1.1 rappresenta ciò che è stata l'ispirazione naturale per la copertura del palazzo: nell'immagine si nota Annie, la figlia dell'architetto, all'interno di un campo di ninfee.



Fig. 1.1: Illustrazione della figlia di Joseph Paxton in un campo di ninfee. Immagine tratta da [https://it.wikipedia.org/wiki/Crystal_Palace_\(palazzo\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Crystal_Palace_(palazzo))

Venne così alla luce il Crystal Palace di Londra [5], un palazzo maestoso, liberamente ispirato alla natura.

Più nello specifico l'architetto si è lasciato ispirare dalle nervature della foglia di ninfea *Victoria Amazonica*, che permettono di ottenere una struttura leggera e al tempo stesso consentono di massimizzare l'esposizione solare.

In Figura 1.2 è illustrata la facciata del palazzo; si nota la somiglianza con la ninfea nelle nervature radiali.

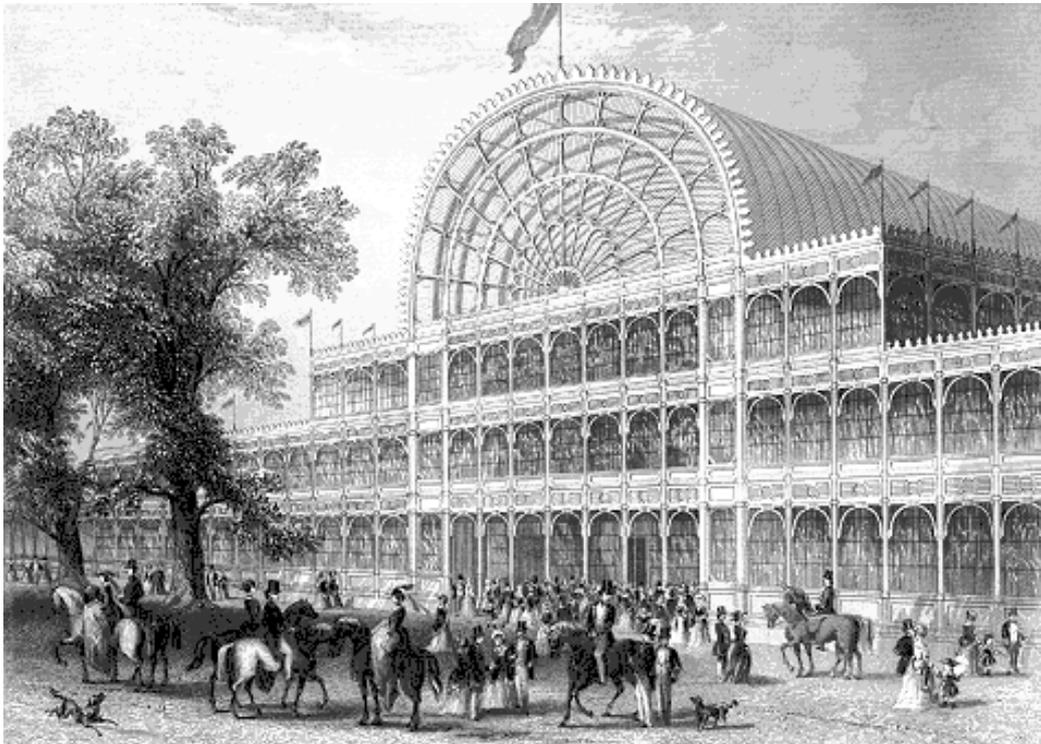


Fig. 1.2: Illustrazione del Crystal palace di Londra; si notano le somiglianze con la ninfea soprattutto per le nervature radiali. Immagine tratta da [https://it.wikipedia.org/wiki/Crystal_Palace_\(palazzo\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Crystal_Palace_(palazzo))

Se il destino del palazzo non è però stato fortunato, distrutto in un incendio nel 1936, non si può dire lo stesso dell'ideale che ne sta alla base: con il tempo la ricerca verso le forme naturali non si è arrestata ma è in continua espansione.

Molto tempo è passato da quel primo tentativo di realizzare qualcosa di innovativo, e al giorno d'oggi molte delle tecnologie in parte ispirate al mondo naturale, sia esso animale o vegetale, sono divenute di uso comune; basti pensare al Velcro, inventato nel 1941 dall'ingegnere svizzero George de Mestral, che durante una passeggiata nel bosco con il suo cane notò come i frutti del cardo rimanessero attaccati alla pelliccia dell'animale.

Una volta tornato a casa li osservò al microscopio e notò come vi fossero degli uncini all'estremità del frutto, che funzionano come dispositivi di presa; nello stesso anno presentò il brevetto del velcro come oggi è conosciuto[29].

In Figura 1.3 sono mostrati il frutto del cardo (sinistra) ed un esempio di velcro (destra).



Fig. 1.3: Ispirazione per l'invenzione del velcro. A sinistra il frutto del cardo dotato di uncini, a destra un esempio di velcro. Immagine tratta da <https://yourshot.nationalgeographic.com/photos/9122943/>

Oltre agli esempi sopraccitati di strutture liberamente ispirate alle piante, sono in rapida diffusione anche vernici o colle bio-inspired, come esempio si può nominare l'effetto della superidrofobia delle foglie di loto, dotate di superfici simili alla cera e dunque capaci di respingere l'acqua e lo sporco. (Figura 1.4)

L'utilizzo di tale effetto, definito lotus effect, consentirebbe di ottenere materiali idrofobi e autopulenti.[33]



Fig. 1.4: Foglia di loto con caratteristiche idrofobe. Immagine tratta da https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_loto

Ora che sono stati elencati classici esempi di studi biomimetici, è utile definire lo scopo della tesi per quanto riguarda il meccanismo di dispiegamento e dove si colloca questa ricerca all'interno delle tecnologie attuali.

Come da titolo si vuole ricercare una metodologia di dispiegamento, ovvero una tecnologia che consenta il movimento di un componente a seguito di un qualche fenomeno iniziale.

In particolare in questa tesi è stato definito un dispiegamento che consenta una rotazione di una definita quantità angolare.

L'elemento che consente il moto al meccanismo prende il nome di attuatore: esso può essere di tipo meccanico, elettrico, termico o magnetico ed è controllato da un software che ne regola l'utilizzo.

Il dispiegamento trova particolare applicazione nella robotica e nell'ingegneria aerospaziale.

Entrambi i settori necessitano di strutture compatte che riescano poi a dispiegarsi.

Il dispiegamento trova particolare riscontro nel campo robotico: si pensi al dispiegamento e al movimento di tutte le parti meccaniche della moderna industria dell'automazione o in ambiti biomedici e, ovviamente, militari.

In Figura 1.5 è rappresentato un esempio di questa tecnologia: un robot origami con scopi medici, militari o spaziali.

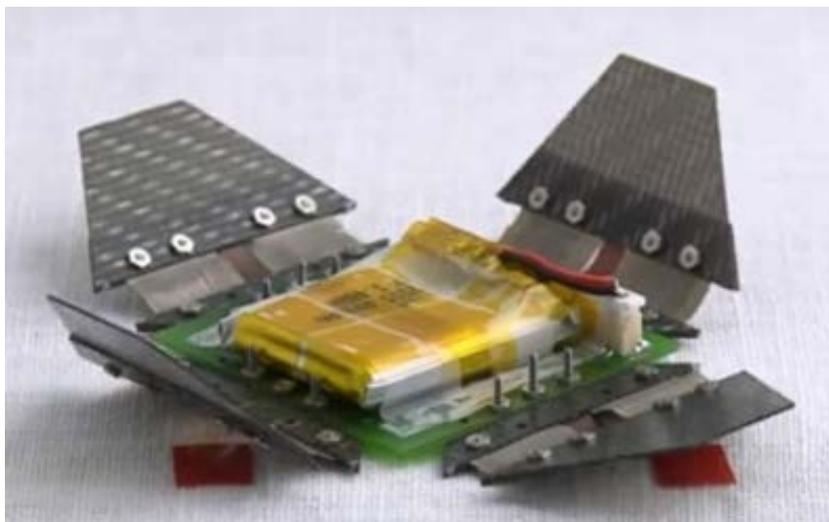


Fig. 1.5: Esempio di dispiegamento; nella figura è illustrato un robot origami per scopi medici. Immagine tratta da <https://www.robotiko.it/origami-robot/>

E' nel campo spaziale comunque dove il concetto di deployment trova una migliore definizione; se si pensa ai costi e ai problemi dell'industria spaziale è immediato pensare alla realizzazione di strutture e sistemi compatti; ciò però può essere in contrasto con il sistema che si è realizzato o che si intende utilizzare.

Più recente esempio di questo tipo di tecnologia nell'ambito spaziale è il telescopio Webb, il cui lancio in orbita è previsto per il 2020.

Tale telescopio a raggi infrarossi, dotato di un telescopio di diametro pari a 6.5 [m], è il più grande telescopio fin ora mai lanciato in orbita: tali incredibili dimensioni permettono di ottenere risoluzioni maggiori e una precisione migliore.

Per ottenere una tale superficie però gli specchi devono essere dispiegati da una configurazione di partenza compatta.

In Figura 1.6 è illustrato il telescopio nella sua forma dispiegata e nella sua forma compatta all'interno del razzo Ariane 5 per il lancio.



Fig. 1.6: Illustrazione del telescopio Webb. A sinistra la forma dispiegata mentre a destra la forma compatta per il lancio. Immagine tratta da http://www.lescienze.it/news/2018/06/28/news/ritardo_lancio_telemoscopio_spaziale_webb_costi-4030908/ e <https://www.tomshw.it/altro/pronto-james-webb-il-telescopio-spaziale-migliore-di-sempre/>

L'esempio appena descritto è un caso unico in questo ambito, ma vi sono esempi utilizzati più frequentemente per le missioni spaziali; stiamo parlando del dispiegamento di antenne e pannelli solari.

Questo tipo di tecnologia infatti molto spesso è utilizzata a partire da sistemi compatti che poi vengono dispiegati per garantire il loro corretto funzionamento.

Il dispiegamento di questo tipo di strutture viene effettuato mediante una

particolare superficie detta tape spring: i tape springs sono delle strisce rettilinee a parete sottile con una cross section dotata di una certa curvatura caratterizzata da un raggio di curvatura R lungo la direzione trasversale [26]. In Figura 1.7 è illustrato un esempio di tape spring.

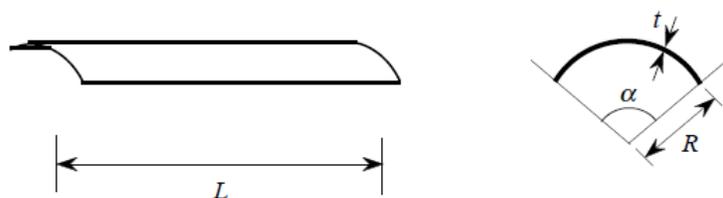


Fig. 1.7: Esempio di tape spring.[26]

Tali superfici hanno la capacità di immagazzinare energia una volta piegati e, una volta rilasciati i vincoli, riescono a tornare alla propria forma originaria, tramite un fenomeno a snap di propagazione di instabilità; si fa inoltre notare come la zona di piegatura subisca una variazione di curvatura, con la curvatura iniziale che si azzera.[7]

In Figura 1.8 è illustrato un esempio di dispiegamento di questo tipo.

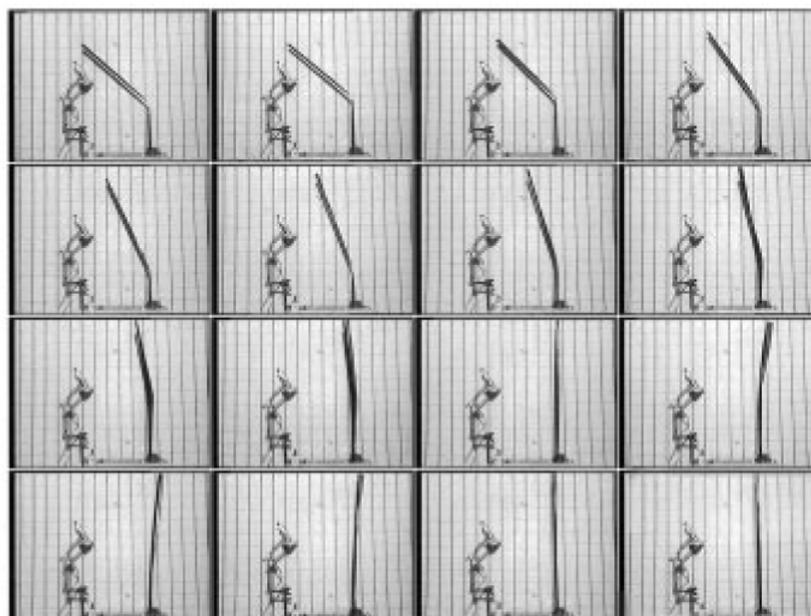


Fig. 1.8: Esempio di deployment di tape spring.[26]

La superficie del tape spring ha dunque caratteristiche uniche, sarà infatti questa la geometria che verrà utilizzata in questo studio per definire una nuova metodologia di dispiegamento.

Descritto quindi brevemente perchè il dispiegamento delle strutture è importante, si passa ora a descrivere quello che costituisce la tesi e cosa è stato studiato in questo elaborato.

Nel capitolo 2 sono descritte e analizzate le varie metodologie che consentono alle piante di muoversi con lo scopo di ottenere una metodologia ispirata ad esse per definire un metodo di dispiegamento.

Sono perciò stati definiti e analizzati i movimenti delle piante, studiando quali fenomeni vi siano alla base e quali vincoli e limiti vi siano.

Al termine del capitolo è stato poi definito il metodo di attuazione che si intende adottare, definendo uno studio basato sul dispiegamento di una superficie.

In Figura 1.9 è illustrato un tipico esempio di movimento delle piante.



Fig. 1.9: Esempio di movimento di una pianta. In figura è illustrata la pianta carnivora *Dionaea muscipula*. Immagine tratta da <https://www.youtube.com/watch?v=SvzEPdeu5wg>

Nel capitolo 3 si passa poi a definire la tipologia di attuatore necessario

per ottenere lo snap desiderato.

L'attuatore scelto per questa tipologia di analisi è uno Shape memory alloy (SMA) mediante variazione di temperatura; all'interno del capitolo è descritto il fenomeno fisico che permette l'attivazione di questa tipologia di attuatori e la loro modalità di utilizzo.

Nella seconda parte del capitolo vi è il dimensionamento meccanico e termico per questa tipologia di attuatori.

In Figura 1.10 è illustrata una molla di materiale SMA.



Fig. 1.10: Tipica molla costituita di materiale SMA. Immagine tratta da <https://www.explainthatstuff.com/how-shape-memory-works.html>

Nel capitolo 4 si passa quindi a definire la forma del meccanismo ispirato alla pianta carnivora che si vuole studiare e la posizione in cui applicare l'SMA.

Per questa analisi è stato utilizzato quello che viene chiamato BPA (bend propagation actuator), in cui l'SMA non è posizionato centralmente come solitamente si usa fare ma è stato applicato all'estremità e lo snap avviene mediante propagazione delle forze.

Nella seconda parte del capitolo viene poi descritto il modello.

Nel capitolo 5 sono poi descritti e analizzati i risultati ottenuti dalle analisi in maniera approfondita.

I dati ottenuti dalle analisi sono stati inoltre importati nel programma Matlab

con lo scopo di ottenere dei grafici che verificassero la bontà delle simulazioni e la garanzia del successo del dispiegamento.

Nella seconda parte del capitolo sono infine state utilizzate le formule di dimensionamento degli SMA descritte nel capitolo 3 per definire le caratteristiche geometriche dell' SMA in modo da garantire il dispiegamento e, con formule di scambio termico, ottenere i tempi nei quali avviene tale dispiegamento.

Nell'ultimo capitolo sono infine tratte le conclusioni a seguito dello studio e sono tracciate le strade per possibili seguiti.

2. MONDO VEGETALE

Se si pensa all'essere umano o al mondo animale ci si rende conto di come queste creature riescano a compiere un gran numero di azioni grazie al proprio apparato muscolare.

Le piante però, che non sono dotate di tali apparati, riescono ugualmente a compiere determinati movimenti; non stupisce dunque che molti studiosi rimangano affascinati dal mondo vegetale, capace di sorprendere con meccanismi a volte semplici ma allo stesso tempo ingegnosi, che ancor oggi facciamo fatica a comprendere.

In molti si sono cimentati nello studio delle piante; lo stesso Darwin è stato uno dei pionieri dello studio di questo settore con il suo "Insectivorous Plants" pubblicato nel 1875[6] nel quale elencava le sue osservazioni, compiute nell'arco di anni, su numerose piante e dei loro movimenti.

Tutti gli studiosi comunque erano alla ricerca di qualche applicazione di origine naturale capace di cambiare e, alle volte, rivoluzionare la tecnologia attuale e le piante, con i loro movimenti, sono la giusta risposta se si vuole perseguire questo obiettivo.

La domanda a cui tutti cercano di dare una risposta comunque è sempre la stessa: come fanno le piante a muoversi?

Le piante hanno diverse tipologie di movimento: ci sono piante che hanno nella crescita la loro unica facoltà; ci sono però molte altre piante che non si limitano ad una crescita ma che riescono a compiere dei movimenti attraverso metodologie particolari ed eleganti.

Il comune denominatore a tutte queste tipologie di movimenti è, sia che si tratti della normale crescita, sia che si parli di movimenti reversibili, l'acqua. Quando si pensa alla crescita di una pianta è normale pensare all'acqua come fonte di sostentamento: basti pensare ad un mazzo di fiori recisi che senza una adeguata dose di acqua in breve tempo appassisce e si flette mentre, una volta che viene adeguatamente annaffiato, torna alla propria naturale bellezza.

Dopo molte ricerche su diversi tipi di piante [21] si è osservato che altri movimenti che le piante compiono in maniera spontanea senza bisogno di aiuto esterno, sono però frutto di sistemi idraulici ben congegnati.

Vi sono inoltre movimenti che, anche se non collegati strettamente al campo

idraulico, sfruttano gli stimoli esterni sempre associati all'acqua: si pensi alle pigne che si aprono sfruttando l'umidità dell'aria circostante.

In questa tesi si vuole utilizzare un' applicazione dei sistemi idraulici concepiti naturalmente per lo sviluppo e lo studio di una tecnologia che risulti efficace per quanto concerne il deployment.

Per riuscire a definire tale metodologia si deve però comprendere come avvenga tale movimento e individuare il sistema migliore che può essere utilizzato per il nostro obiettivo.

2.1 Pressione idrostatica e osmotica

Le piante come detto riescono a muoversi attraverso l'acqua quindi nel corpo delle piante questo elemento deve essere contenuto in grande quantità[8]; è stato infatti osservato che esse contengono al loro interno fino al 75% di acqua, mentre la restante parte è formata da una parete solida di cellulosa che racchiude le celle delle piante.

La differenza del movimento degli animali rispetto al movimento delle piante va quindi ricercato a livello cellulare; anche se le cellule animali e vegetali sono entrambe eucariote e quindi pluricellulari, la cellula vegetale dispone al suo interno di una membrana detta vacuolo, che funziona come vescica semimpermeabile.

Nella Figura 2.1 sono illustrate le differenze tra la cellula animale/umana e vegetale.

Proprio la caratteristica della semimpermeabilità della struttura della pianta consente all'acqua di fluire attraverso di essa e ottenere perciò un effetto idraulico.

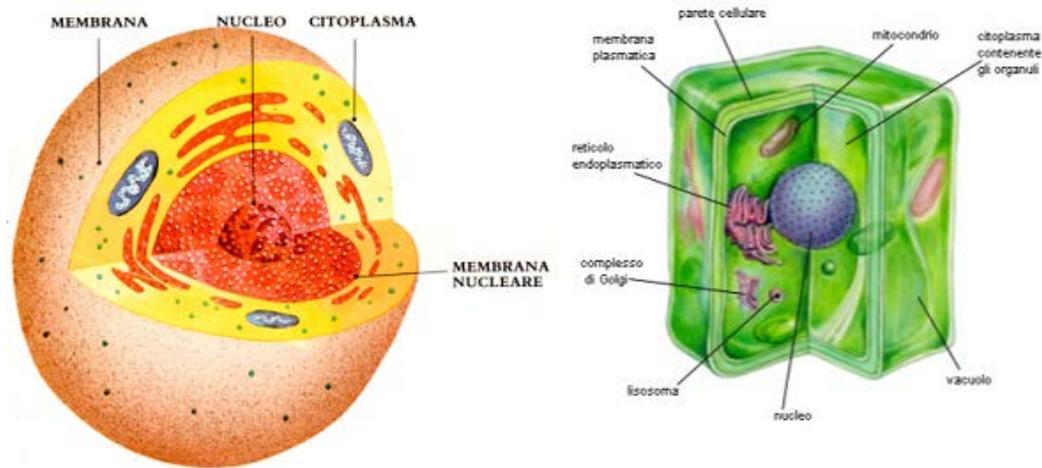


Fig. 2.1: La cellula vegetale è diversa da quella animale: si nota la presenza di parete cellulare e vacuolo. Immagine tratta da <http://www.scienze-naturali.com/differenze-scientifiche/cellula-animale-e-vegetale>

La variazione di acqua all'interno del vacuolo delle celle della pianta è dunque la ragione per la quale la pianta riesce ad ottenere un movimento: la modifica della quantità di acqua all'interno dei vacuoli consente infatti di ottenere una pressione idraulica; il vacuolo di conseguenza si espande spingendo la membrana contro la parete cellulare che, una volta gonfiatasi, ne garantisce il movimento.

In altre parole il trasferimento d'acqua tra le varie celle crea una pressione che, agendo sulle pareti delle celle, ne consente l'espansione e, sommando queste espansioni, esse consentono alla pianta di creare un movimento armonioso.

La pressione idrostatica che si viene a formare nelle piante prende il nome di turgore cellulare.

Vi sono però delle domande a cui si deve dare risposta per riuscire a completare la descrizione di tale metodologia: come avviene questo movimento di acqua che consente alle piante di muoversi? O, ancora meglio, come fa a fluire l'acqua all'interno delle celle?

Tale passaggio di acqua, e quindi variazione di pressione, avviene sfruttando il fenomeno chimico dell'osmosi.

La definizione del fenomeno di osmosi è la diffusione del solvente attraverso una membrana semipermeabile (che fa passare quindi solvente e non soluto). Il movimento della soluzione (nel nostro caso acqua) avviene da una regione a minore concentrazione di soluto verso una regione a maggiore concentra-

zione, quindi secondo il gradiente di concentrazione, in modo da garantire l'equilibrio.

In altre parole l'acqua è capace di fluire attraverso la membrana semipermeabile delle celle e raggiungere il vacuolo che espandendosi porta alla formazione della pressione idrostatica la quale consente al vacuolo di gonfiarsi; la pressione necessaria ad ottenere questo passaggio è detta appunto pressione osmotica.

In Figura 2.2 è mostrato l'effetto del gradiente osmotico per la cellula vegetale, evidenziando come varia la forma della parete cellulare a seguito del passaggio di acqua.

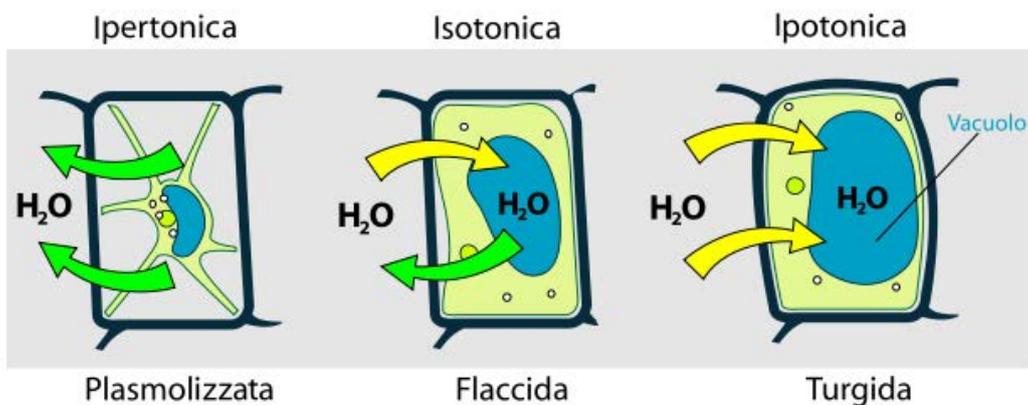


Fig. 2.2: Effetto del gradiente osmotico: l'acqua passa attraverso la parete cellulare rendendo turgida la cella grazie alla pressione. Immagine presa da https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/Turgor_pressure_on_plant_cells_diagram-it.svg

Tale aumento di pressione all'interno della cella, come detto, consente alla pianta di riuscire a garantire un movimento; i valori di pressione possono essere elevati.

Degli studi hanno consentito di determinare i valori di gradiente osmotico di diverse celle[34]: i valori più bassi di gradiente osmotico sono fatti registrare all'interno delle alghe, capaci di sviluppare un gradiente osmotico pari a 0.5 [MPa], mentre il valore medio delle piante si aggira intorno ad un valore di pressione pari ad 1 [MPa] ma si sono riscontrati valori complessivi fino a 30 [MPa] nelle selci.

Ma come fa l'acqua a fluire attraverso la membrana? Come detto essa fluisce attraverso le membrane semipermeabili grazie ad un processo di osmosi, ma non sono ancora definite le vie nelle quali scorre l'acqua.

Prima di definire come riesce a fluire l'acqua bisogna però identificare le

caratteristiche della parete cellulare.

Essa è composta da 3 elementi:

1. La cellulosa, che conferisce la componente a fibra della parete cellulare; essa è composta da diverse microfibre orientate nella stessa direzione che formano una fibra di cellulosa
2. Le emicellulose, molecole che consentono di legare tra loro le varie fibre di cellulosa.
3. Le pectine, molecole che riescono a legare tra loro le cellule adiacenti.

In Figura 2.3 è illustrata la composizione della parete cellulare vegetale.

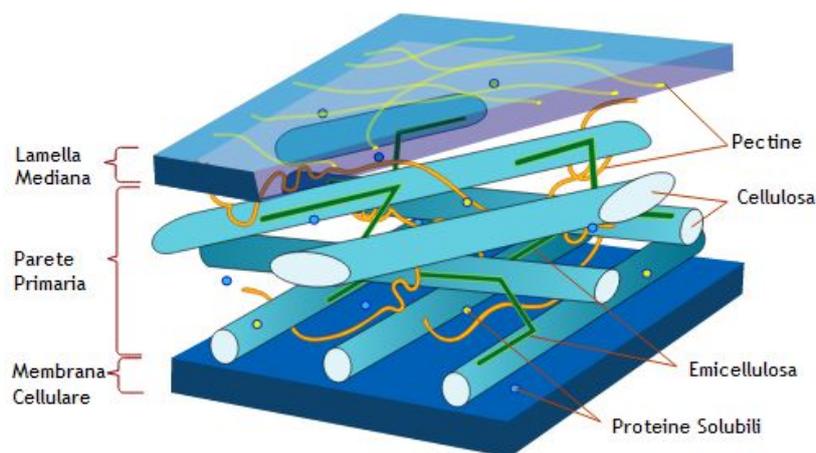


Fig. 2.3: Composizione della parete cellulare. Si riesce a definire la cellulosa, l'emicellulosa e la pectina e le loro funzioni. Immagine tratta da <https://www.chimica-online.it/biologia/parete-cellulare.htm>

La pectina è l'elemento fondamentale che consente all'acqua di fluire; grazie alla disposizione di pectine infatti la parete cellulare assume la caratteristica di porosità necessaria a renderla semipermeabile e dunque consente all'acqua di passare.

Solitamente comunque non tutte le pareti cellulari sono rese semipermeabili.

Dopo aver definito la struttura fisica della parete cellulare riusciamo quindi a definire le due vie nelle quali l'acqua è libera di fluire:

1. via apoplastica
2. via simplastica

Come si può vedere dalla Figura 2.4 nella modalità apoplastica l'acqua è libera di fluire attraverso la parete cellulare semipermeabile senza passare per la membrana. Si nota quindi che l'acqua è libera di scorrere in tutte le pareti che non sono state rese impermeabili.

Tale insieme di pareti è detto per l'appunto apoplasto.

Nella modalità simplastica invece l'acqua non è libera di scorrere ma è costretta a fluire attraverso le membrane rese semipermeabili che collegano le varie cellule.

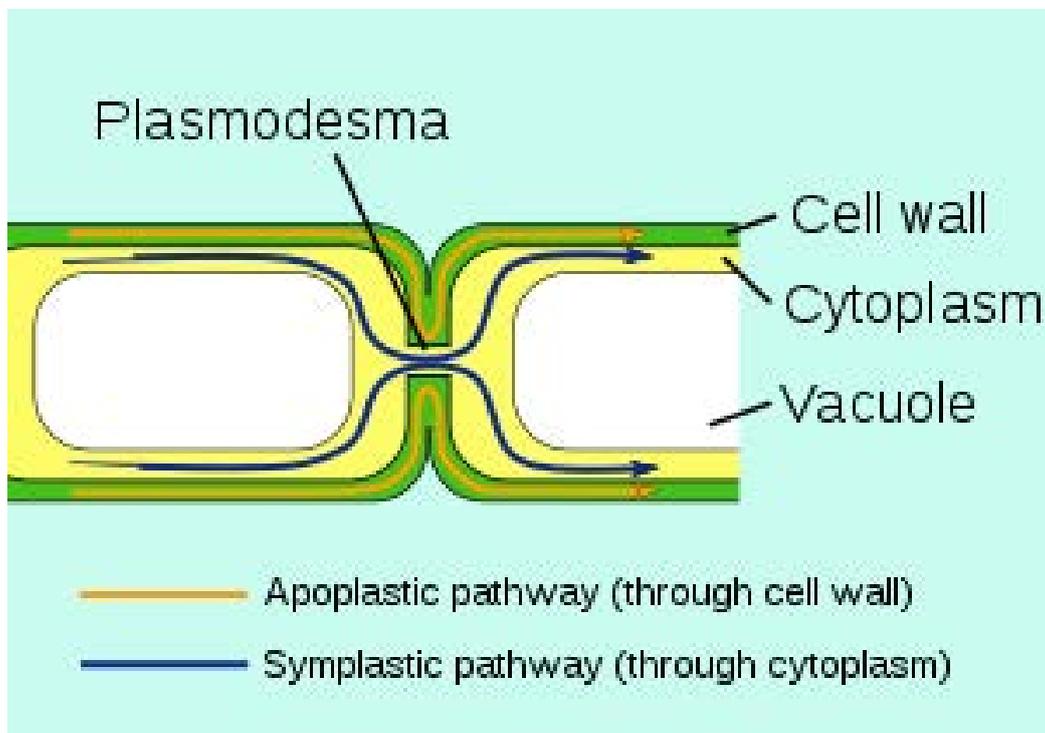


Fig. 2.4: L'acqua all'interno della cella può scorrere sia per via apoplastica (arancione) sia per via simplastica (blu). Immagine tratta da <https://byjus.com/biology/apoplast/>

Entrambe le vie comunque, come si vede dalla Figura 2.5 consentono alla cella di espandersi e dunque sono responsabili del movimento.

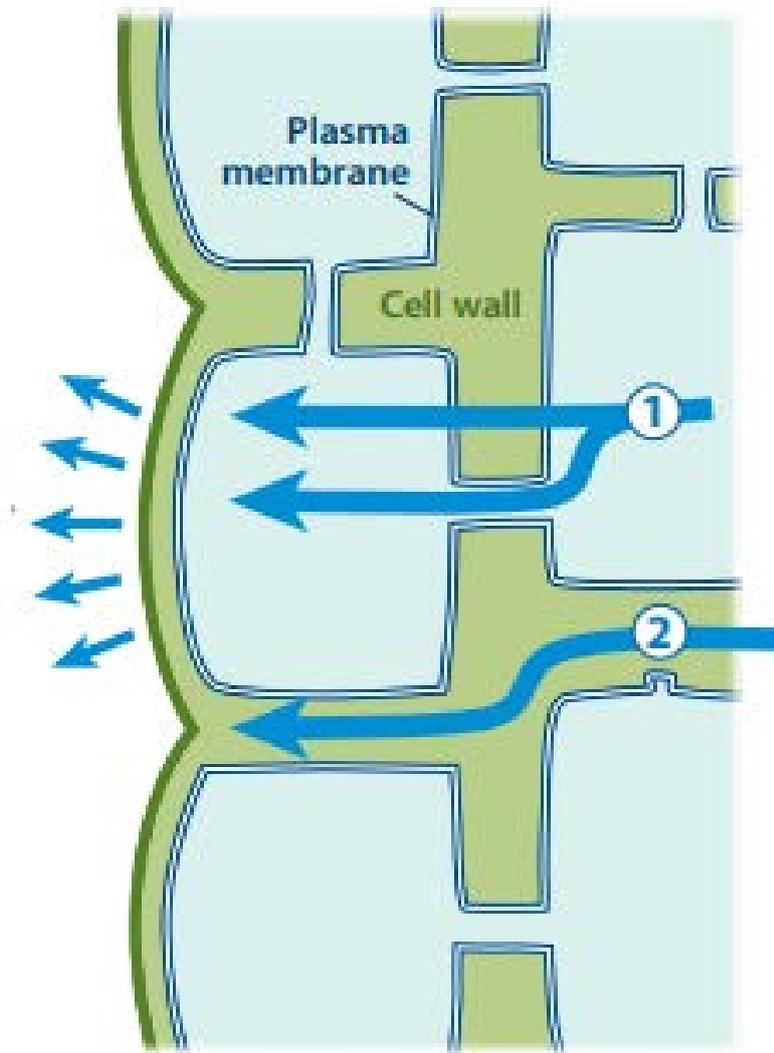


Fig. 2.5: L'acqua che entra all'interno della cella consente l'espansione. Con il numero 1 è indicata la via apoplastica, con il 2 la via simplastica. Immagine tratta da <https://dicciomed.usal.es/palabra/apoplasto>

Volendo poi verificare cosa avviene all'interno delle celle si nota che l'aumento di pressione comporta un'espansione da parte delle celle che dunque variano il proprio volume grazie, come abbiamo già detto, alla pressione idrostatica.

E' stata ricavata[21] una formula che riesce a definire la variazione di volume della cella in funzione del flusso di acqua e, di conseguenza, della pressione. Tale formula si ottiene considerando la formula del potenziale dell'acqua con-

siderando un flusso d'acqua j .

Prima di tutto si considera la formula del potenziale chimico definita da:

$$U_j = U_j^* + U_{\text{pressione}} + U_{\text{concentrazione}} + U_{\text{elettrico}} + U_{\text{gravitazionale}} \quad (2.1)$$

L'Equazione 2.1 mostra come il potenziale sia definito da una parte costante a cui va sommato il potenziale della specie o della concentrazione (legge di Fick), il potenziale di pressione (Legge di Poisselle), elettrico (legge di Ohm) e gravitazionale (Legge di gravitazione).

Nel nostro caso però vi è solamente il potenziale di pressione che identifica la pressione di turgore e il potenziale della specie che definisce il gradiente osmotico.

L'Equazione 2.1 quindi si riduce al valore di potenziale dell'acqua dato dalla formula

$$\Delta\Psi = U_j - U_j^* = -\Delta P + \Delta\pi \quad (2.2)$$

che definisce il potenziale dell'acqua tramite differenza tra pressione idrostatica interna ed esterna della cella e della pressione osmotica identificata con π .

Quando vi è scambio di acqua però non si ha più l'equilibrio e allora vi è una variazione di volume dato dalla formula:

$$\frac{dV}{dt} = jA = -AL_p\Delta\Psi = AL_p(-\Delta P + \Delta\pi) \quad (2.3)$$

dove A è l'area della membrana, P la pressione idrostatica e π è la componente osmotica.

L_p è la conducibilità delle pareti della cella che l'acqua deve attraversare.

Essa può essere regolata grazie all'apertura dei pori e varia tra i $10^{-13} < L_p < 10^{-11} \left[\frac{m}{sPa} \right]$.

Tale formula, conosciuta come equazione di Starling, definisce le forze necessarie al movimento di fluidi attraverso le membrane capillari e, nel mondo animale, definisce come la variazione di volume della cella sia ottenuta tramite una pressione idrostatica e una variazione di concentrazione nella cella

(gradiente osmotico) rispetto ad una configurazione di equilibrio.

2.2 *Movimenti idraulici*

Attraverso il movimento dell' acqua le piante riescono a compiere dei movimenti; l'aumento di pressione funge quindi da attuatore per le varie strutture. Essendo però il moto governato da un flusso d'acqua in movimento esso avrà un movimento a velocità finita: vi è infatti la presenza di una barriera temporale definita dal tempo necessario affinché il flusso d'acqua riesca a fluire attraverso le celle.

Si riesce comunque a definire il tempo limite di attuazione di tali meccanismi; prima di tutto si cerca di determinare il tempo limite al livello cellulare[27]. Esso deve tenere in considerazione come debba esserci un gradiente osmotico che consente all'acqua di passare attraverso le pareti perciò sarà influenzato dalla conducibilità delle membrane.

E' stata perciò ottenuta una formula:

$$\tau_{\text{cell}} = \frac{V}{A(E + \Delta\pi)L_p} \quad (2.4)$$

pari al tempo necessario affinché avvenga una perturbazione di pressione nella cella.

In altre parole il valore τ_{cell} ottenuto per mezzo dell' Equazione 2.4 è pari al movimento idraulico a livello cellulare.

In tale formula V è il volume della parete cellulare ed E il modulo di Young della cellula.

Tale valore di E , essendo la pianta un essere vivente, non è di facile identificazione a causa della variazione tra strutture microscopiche e macroscopiche; studi hanno però mostrato come tali moduli siano indicativamente vicini ad 1 [MPa][8].

La parete cellulare poi ha deformazioni elastiche solamente in una piccola parte di deformazione, ciò spiega la necessità di avere molte cellule per riuscire ad ottenere un movimento dai grandi valori.

Tale tempo in ogni caso è solamente il tempo limite a livello cellulare, nel complesso il tempo è più alto: ciò è dovuto al fatto che non vi è solo una variazione di gradiente osmotico ma vi è anche il processo diffusivo compiuto dal flusso d'acqua.

La formula in questo caso deve tenere conto della lunghezza della membrana e di un coefficiente di permeabilità che consente il movimento; la formula finale quindi risulta:

$$\tau_p = \frac{\eta L^2}{kE} \quad (2.5)$$

definito tempo poroelastico.

Nella Equazione 2.5 η è la viscosità dell'acqua e k il valore di permeabilità. Tale tempo poroelastico consente di definire il tempo limite con il quale le piante riescono a muoversi e dunque permette di definire il tempo limite di attuazione; l'insieme di sistemi che utilizzano l'acqua come fonte principale per il movimento sono definiti attuatori idraulici.

Vi sono però delle tipologie di attuatori naturali che riescono a compiere movimenti in tempo minore al valore limite di tempo poroelastico definito dall'Equazione 2.5; essi sono gli attuatori che sfruttano l'instabilità o buckling.

In Figura 2.6 sono graficati i diversi tempi di movimento di diverse piante e il loro tempo di attuazione; tramite tali valori si riesce a definire se i movimenti di tale piante agiscono tramite attuatori idraulici semplici o tramite instabilità.

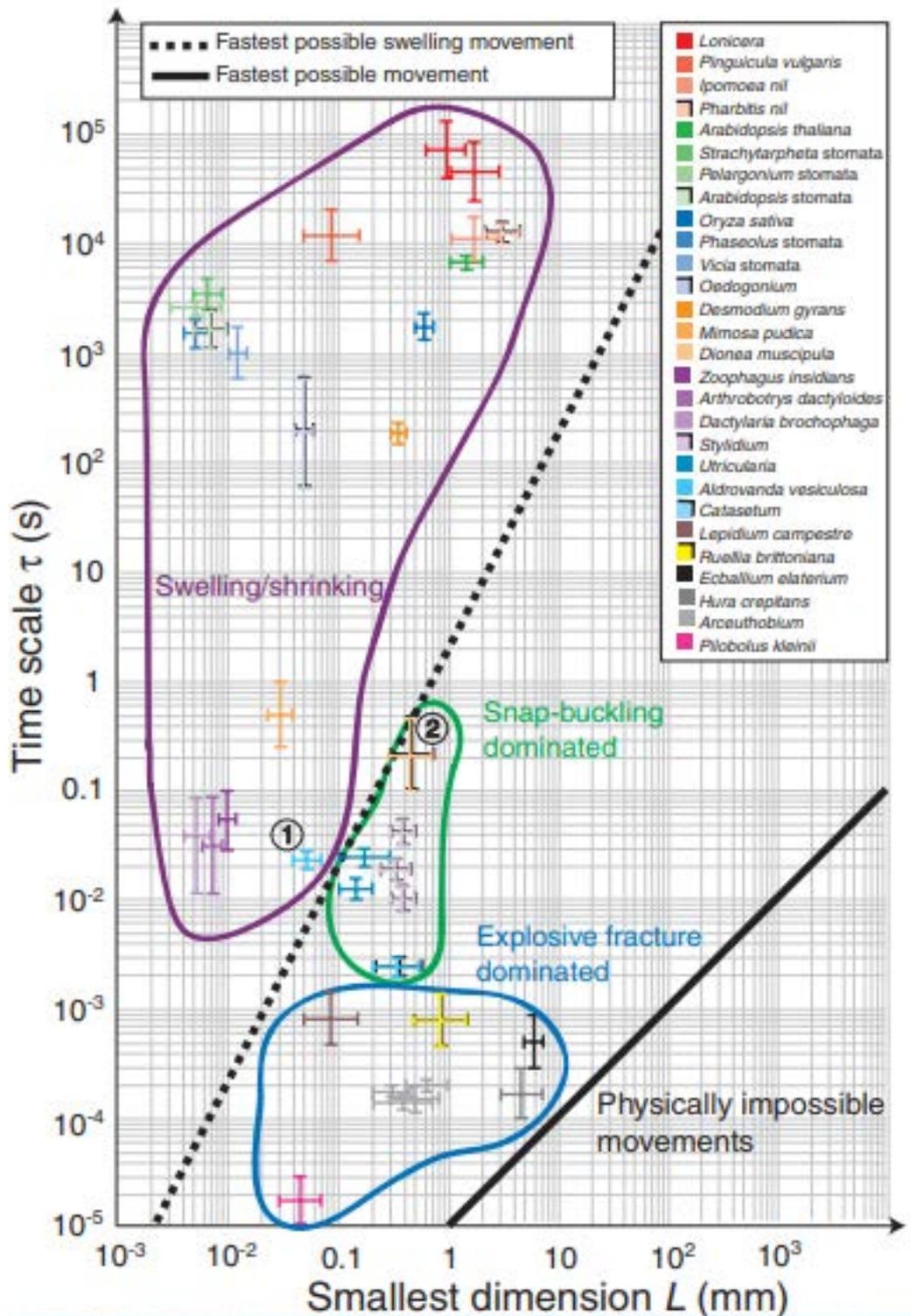


Fig. 2.6: Grafico che definisce per ogni pianta la velocità di movimento; si possono riscontrare all'interno dell'insieme viola le piante che si muovono mediante semplice effetto idraulico, nell'insieme verde invece piante che si muovono per effetti di instabilità.[8]

2.3 Tipologia di attuatori delle piante

Le piante anche se prive di muscolatura, sono dotate di meccanismi che fungono da veri e propri attuatori.

Nella seguente parte della tesi sono descritti vari tipi di attuatori naturali che utilizzano la variazione di pressione per riuscire a generare il movimento.

2.3.1 Attuatori osmotici

Se si pensa all'effetto che l'acqua ha sulle piante ciò che risalta su tutto è la crescita: tale processo avviene sì grazie alla presenza del sole ma studi hanno dimostrato che devono avvenire due fenomeni contemporanei affinché la pianta riesca a crescere: la cella deve aumentare il proprio volume e in contemporanea l'acqua deve riuscire a penetrare all'interno della cella in modo da sorreggere lo sviluppo; si può dunque pensare alla crescita come attuatore. Uno splendido esempio di uso della pressurizzazione per riuscire ad avere una crescita si può trovare nei funghi[22].

La famiglia dei funghi *Arthrobotrys Brochopaga* è dotata di una struttura circolare che, sfruttando un movimento idrostatico interno, gli consente di catturare e successivamente cibarsi dei nematodi: in un primo momento la struttura circolare è aperta e, quando un sensore rivela la presenza della preda all'interno del cerchio, vi è un movimento idraulico che garantisce la chiusura del cerchio e la conseguente cattura della preda.

In Figura 2.7 è illustrato il processo di attuazione idraulica del fungo.

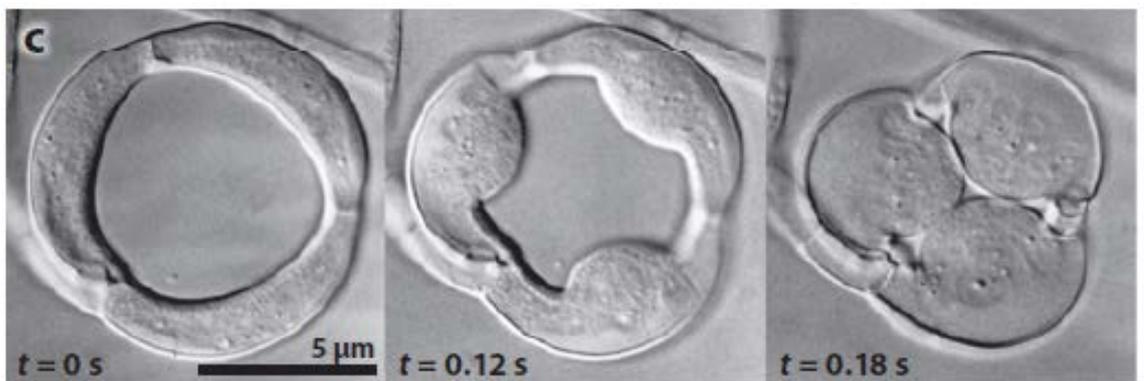


Fig. 2.7: Il fungo *Arthrobotrys Brochopaga* grazie a movimenti idraulici permette la chiusura del cerchio con conseguente intrappolamento della preda.[22]

Se la crescita però è un processo irreversibile, vi sono altri tipi di attuatori che consentono dei piccoli movimenti reversibili sfruttando il movimento dell'acqua per creare piccoli cambiamenti di pressione, spesso di tipo osmotica con trasporto di solvente, mediante delle pompe naturali.

L'aumento ottenuto per singola cella in questo modo però è di piccola entità se considerato il basso valore di elasticità delle piante; per ottenere un grande movimento, bisogna considerare una grande quantità di celle che si muovono in contemporanea.

Il più diffuso tipo di questo attuttore sono le stoma[11].

Le stoma sono dei piccoli fori sulla parete posteriore delle piante addette al controllo della traspirazione mediante il passaggio di anidride carbonica e ossigeno.

Come si può vedere nella Figura 2.8 la stoma è formata da due celle che, all'aumentare di pressione, variano la propria geometria cambiando la curvatura delle proprie celle consentendo ai pori di aprirsi/chiudersi in modo da garantire la corretta traspirazione.

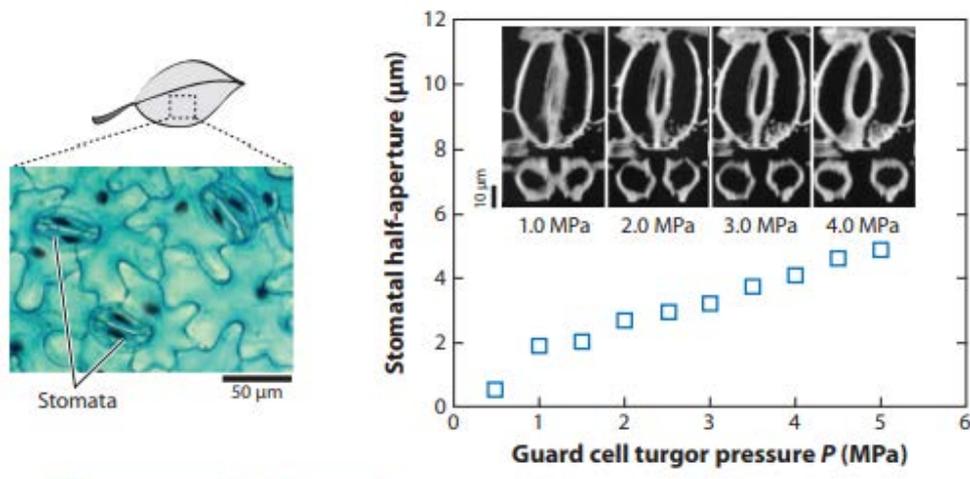


Fig. 2.8: Mediante variazione di pressione i pori inferiori della stoma si aprono consentendo il passaggio di CO_2 garantendo quindi la corretta respirazione della pianta.[11]

Quando poi la pressione idrostatica decresce le celle tornano alla propria forma originale consentendo ai pori una rapida chiusura.

Un altro esempio di variazione di forma mediante la variazione di pressione si ha nello studio della pianta sensitiva appartenente alla famiglia delle

mimose (*Mimosa pudica*)[12].

In questo caso la pressione non consente l'apertura o la chiusura di una struttura ma permette un movimento rotatorio dello stelo di una pianta: lo stelo infatti ha al suo interno un gran numero di celle che, espandendosi, consentono allo stelo di cambiare composizione variando angolo.

In Figura 2.9 è illustrato il fenomeno di pressurizzazione ed espansione con conseguente variazione della struttura.

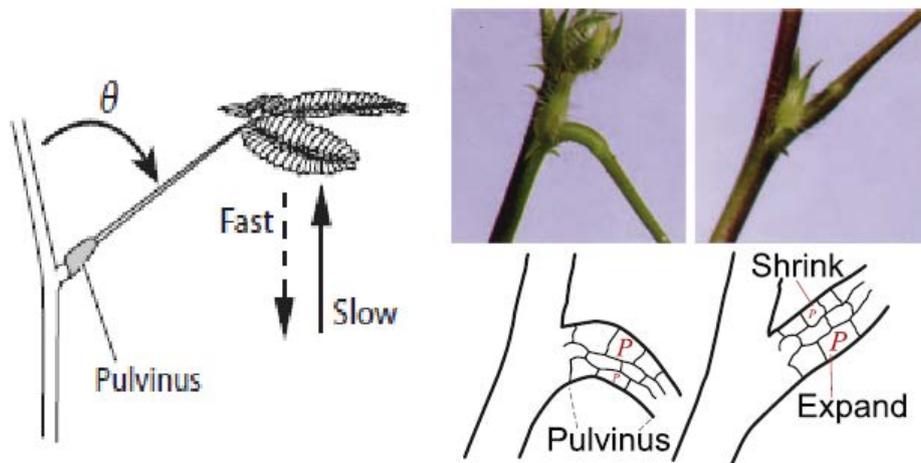


Fig. 2.9: grazie all'aumento di pressione la mimosa è in grado di irrigidirsi.[12]

L'acqua contenuta nelle piante dunque non influenza solamente la crescita ma viene utilizzata anche per il movimento reversibile di alcune parti della pianta.

Come detto però vi sono attuatori che sfruttano l'instabilità per riuscire ad ottenere il movimento desiderato ed essi utilizzano l'acqua come fonte primaria perciò ne diamo una rapida descrizione analizzando quella che è la pianta più famosa che utilizza questo tipo di attuatori, la pianta carnivora Venus Flytrap.

2.3.2 Attuatori osmotici con instabilità

Il fenomeno di instabilità si basa sul principio che una piastra sottile può passare da una configurazione di bassa energia ad un'altra.[10]

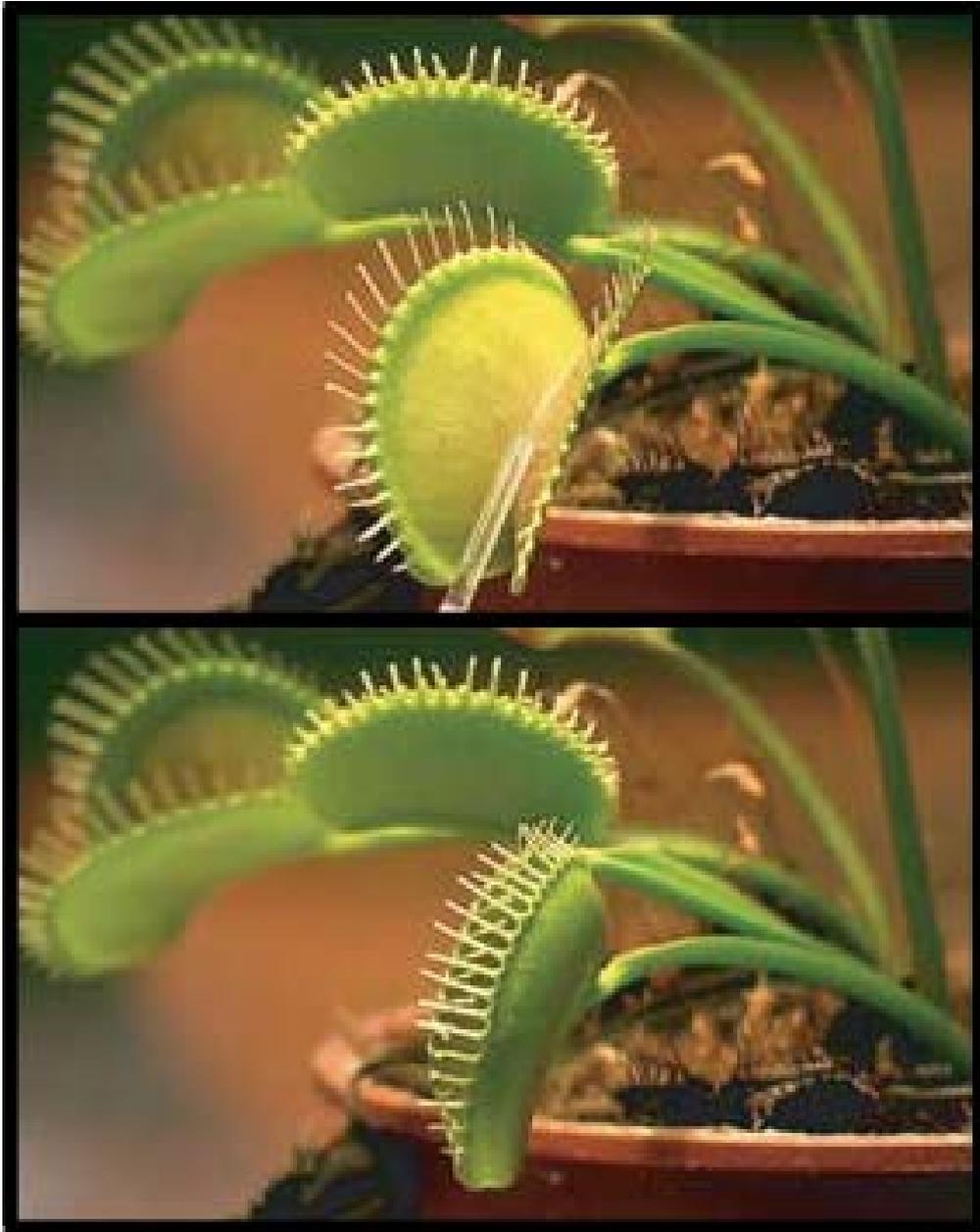


Fig. 2.10: Pianta carnivora Venus Flytrap in configurazione aperta (sopra) e chiusa (sotto).[10]

La transizione tra una configurazione ad un'altra viene raggiunta mediante un carico che permette al sistema di immagazzinare energia che poi viene rilasciata consentendo di oltrepassare la barriera energetica necessaria

al cambio di configurazione.

Le piante utilizzano questo fenomeno per riuscire ad effettuare movimenti ad una velocità superiore a quella della barriera definita dal tempo poroelastico. Particolarmente rilevante in questa discussione è lo studio della pianta carnivora *Dionaea Muscipula* (Venere Acchiappamosche) che sfrutta un sensore per rilevare quando la preda è adagiata sulle proprie foglie e, una volta rilevata la presenza, attua questo fenomeno per ottenere una rapida chiusura delle foglie consentendo la cattura della preda.

In Figura 2.10 sono illustrate le foglie della pianta carnivora in configurazione aperta (sopra) e chiusa (sotto).

Tale movimento non avviene solamente tramite un aumento di pressione ma è stato sperimentalmente osservato che ciò è possibile grazie soprattutto ad un fenomeno di buckling a scatto o snap che consente alle celle di passare dallo stato iniziale con foglie convesse ad uno stato finale con foglie dalla curvatura opposta.

Come avviene dunque questo fenomeno di instabilità? O ancora meglio qual è il fenomeno fisico che consente alla foglia di scattare?

Ancora una volta la risposta alle domande è l'acqua, in questo caso il suo movimento permette alle celle della pianta di accumulare energia che poi viene rilasciata consentendo una rapida chiusura della pianta.

La chiusura ha velocità molto elevate: la pianta è infatti capace di raggiungere velocità di 0.1ms: tale rapidità non è però ancora stata compresa fino in fondo; le ultime ricerche hanno ipotizzato che la foglia abbia due distinti strati nei quali vi è una diversa pressione; in un primo momento la pressione nella parte superiore della foglia è maggiore e dunque si ha la configurazione a foglia aperta e convessa; quando la preda è però sulla foglia essa scatta facendo passare la pressione maggiore nella parte inferiore della foglia e quindi facendo passare la configurazione da una forma convessa ad una dalla forma concava.

In Figura 2.11 e Figura 2.12 sono illustrate delle simulazioni che mostrano come la foglia cambi la propria curvatura durante la fase di snap.

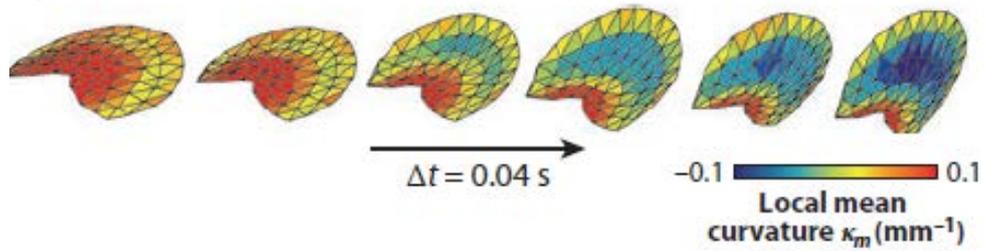


Fig. 2.11: Simulazione che mostra come la pianta passi da una configurazione a curvatura convessa ad una curvatura concava. [10]

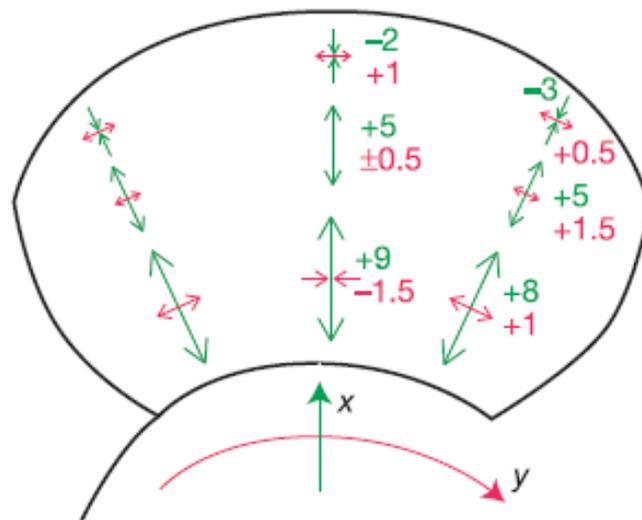


Fig. 2.12: misurazioni della deformazione della pianta durante il processo. Valori positivi indicano espansione mentre valori negativi sono associati a compressioni. La massima deformazione si ha perpendicolarmente alla foglia (asse x) mentre è molto minore in direzione Y. [10]

Nello specifico sono definite tre fasi di movimento:

1. una prima fase di movimento lento
2. una fase centrale molto veloce in cui avviene lo snap
3. una terza fase in cui vi è nuovamente il movimento lento

con la seconda fase responsabile del cambio di curvatura della foglia che passa dall'essere convessa a concava.

In Figura 2.13 sono illustrate le tre fasi della foglia in cui si può notare come nella seconda la foglia sia sostanzialmente piatta, mentre nelle altre due fasi sia dotata di una curvatura.

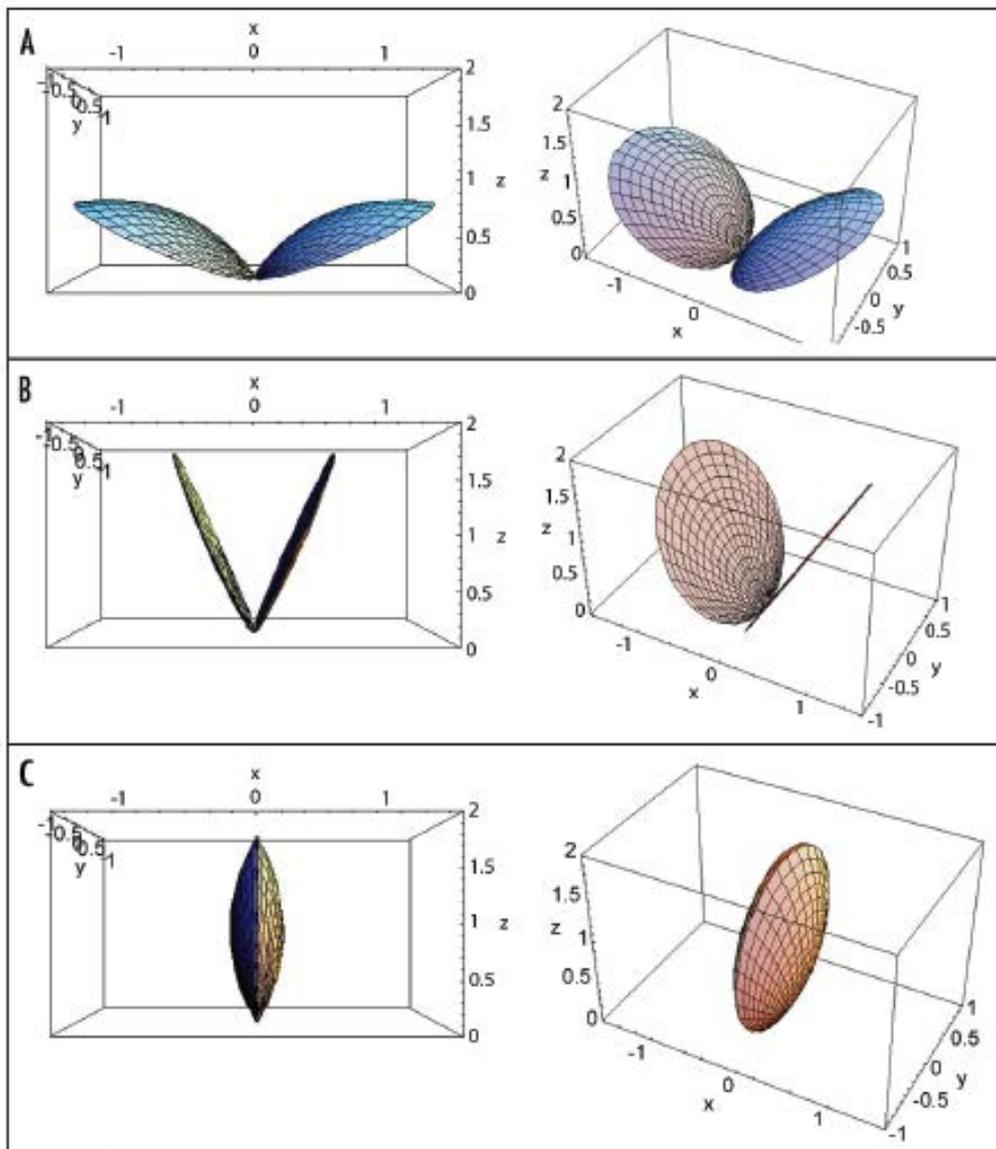


Fig. 2.13: la foglia nelle sue tre fasi: A-fase convessa B-snap C-forma concava. [20]

Anche se come detto microscopicamente tale fenomeno non è ancora capito fino in fondo, macroscopicamente si riesce a ricavare come tale snap avvenga solamente grazie alla forma particolare della foglia[20].

Il cambio di curvatura è garantito solamente dalle caratteristiche geometriche della foglia e non dalla pressione, infatti in questa metodologia la variazione di pressione all'interno della foglia serve solamente ad accumulare energia che consente dunque il cambio di configurazione.

Se si considera infatti la foglia formata da due distinte superfici e siano esse caratterizzate da due pressioni diverse (Figura 2.14), se la pressione della superficie B è maggiore di quella che si ha sulla superficie A si ha la geometria che corrisponde alla foglia chiusa, mentre nel caso opposto, ovvero quando la pressione maggiore si viene ad avere sulla superficie A, si ha la configurazione di foglia aperta.

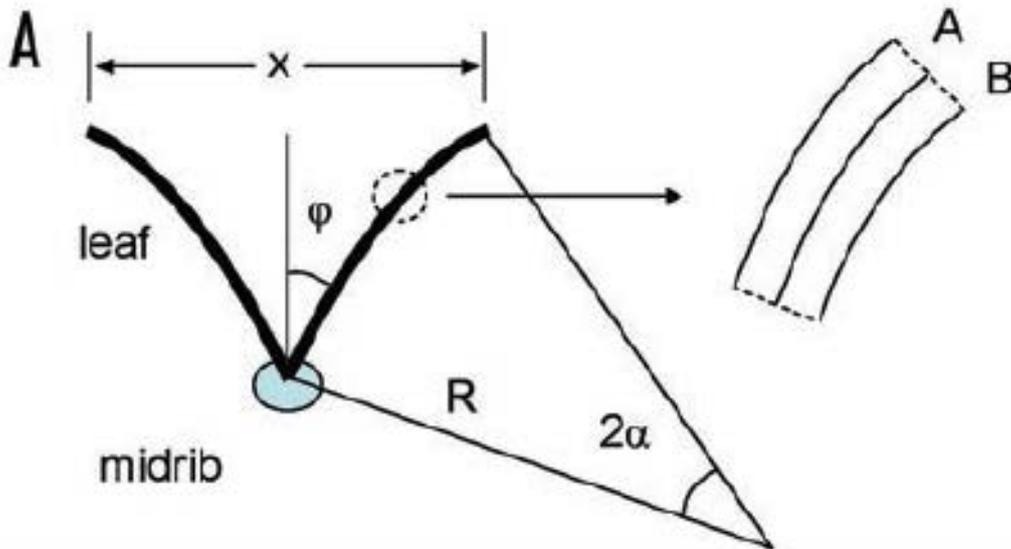


Fig. 2.14: La foglia è formata da due superfici ognuna delle quali ha una pressione diversa. Il piano medio definisce la curvatura della foglia.[20]

Le due configurazioni di foglia aperta e foglia chiusa sono ottenute minimizzando l'equazione dell'energia che è:

$$E = 1/2K_0[(C_M - aP_A - b_A)^2 + (-C_M - aP_B - b_B)^2] + 1/2K_G C_M \quad (2.6)$$

dove C_M è la curvatura della foglia, P_A e P_B sono le pressioni delle due superfici, K definisce l'elasticità e a e b sono due parametri che definiscono la capacità della foglia di essere piegata a causa della curvatura iniziale. E' stato poi riscontrato come tale snap avvenga molto più velocemente al variare del valore

$$\alpha = \frac{L^4 * K^2}{h^2} \quad (2.7)$$

parametro che lega la curvatura e le dimensioni geometriche della foglia. Vi è un valore limite $\alpha_c = 0.8$; per valori inferiori lo snap avviene lentamente, per valori maggiori invece il fenomeno dello snap avviene velocemente. In Figura 2.15 è illustrata la variazione di curvatura della foglia durante lo snap per valori superiori ed inferiori al parametro limite. La foglia durante lo snap mostra un comportamento stabile in entrambe le configurazioni; in altre parole la foglia si comporta come struttura bistabile con curvatura concava e convessa.

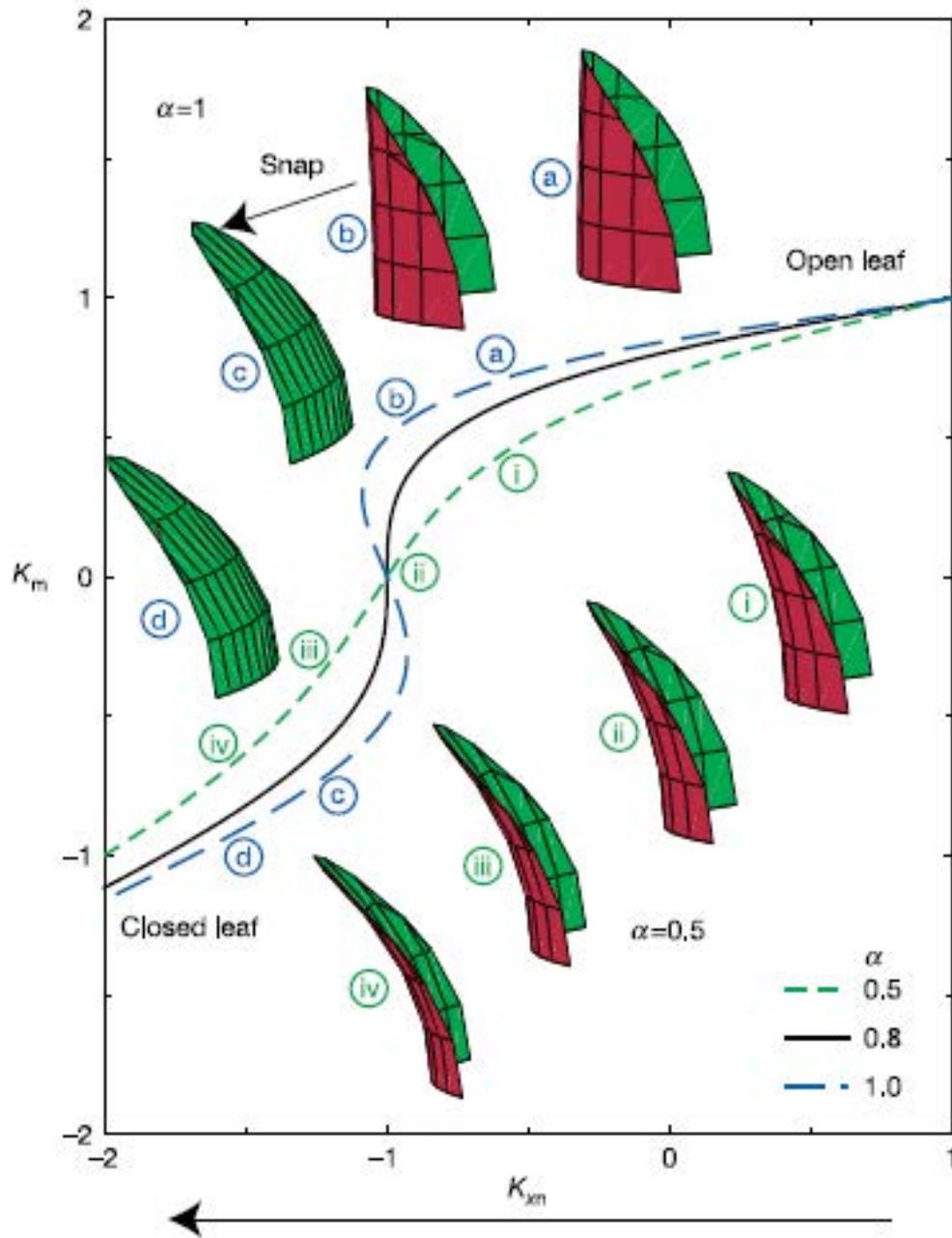


Fig. 2.15: la variazione del parametro α influenza il fenomeno dello snap. Per valori di α minori di quello limite lo snap avviene in maniera debole e dunque lenta, per valori superiori a quello limite lo snap è forte e dunque veloce. [20]

2.4 *Meccanismi plant inspired*

Al giorno d'oggi molti sono i tentativi di applicare tali metodologie allo scopo di ottenere strutture che possano dispiegarsi con facilità e in maniera efficace[18]

2.4.1 *Meccanismi con attuatori di pressione*

Il movimento delle piante come detto avviene solamente grazie alla variazione di pressione interna alla cella della pianta e dunque la ricerca in questo ambito riguarda strutture che consentono il dispiegamento mediante variazione di pressione.

Per quanto riguarda questa tipologia di attuatori essi trovano particolare applicazione nelle cosiddette strutture adattive: strutture che mediante una variazione nell'ambiente circostante sono capaci di variare la propria configurazione e geometria.

Le strutture adattive possono dunque variare la geometria e le caratteristiche rispetto alle modifiche ambientali; tra queste particolarmente rilevanti sono gli shape memory alloy che sfruttano la variazione di temperatura per ottenere delle variazioni geometriche, variazioni elettriche, magnetiche e, per l'appunto variazioni di pressione.

Tali strutture trovano particolare riscontro nel campo dell'ingegneria civile[14] e soprattutto in ambito dell'ingegneria aerospaziale[30].

Gli ultimi studi in questo ambito sono rivolti verso la creazione di strutture che consentano una modifica del profilo alare di un aereo mediante variazione geometrica ottenuta tramite gradienti di pressione; a seguito della variazione geometrica del profilo si riescono ad ottenere profili dalla grande efficienza per diverse configurazioni di volo: siano essi la partenza o il volo ad altezza di progetto.

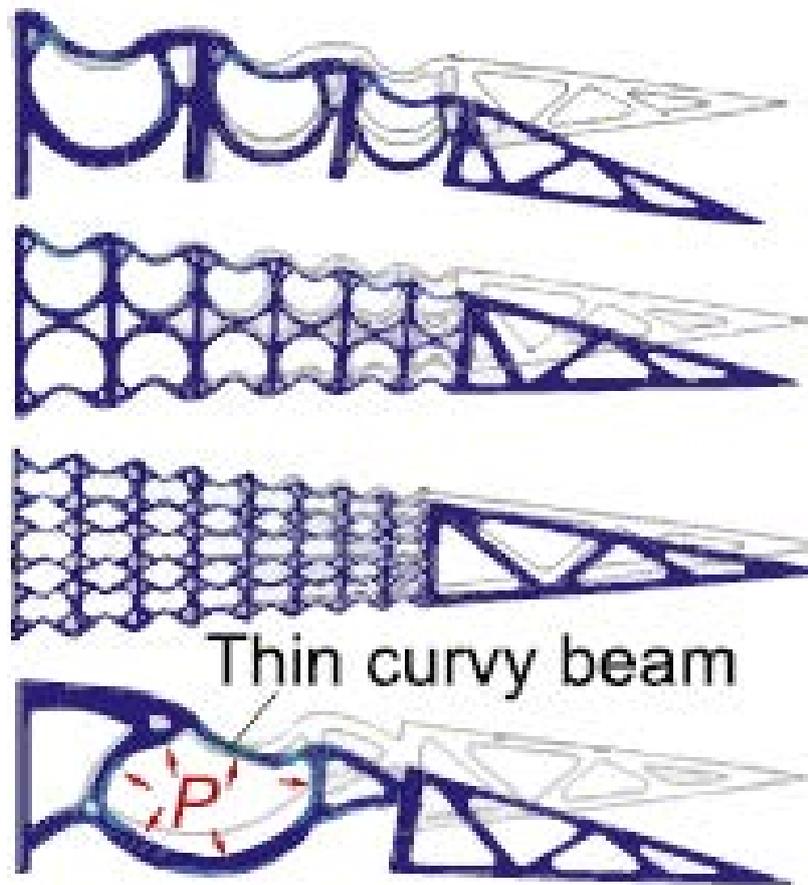


Fig. 2.16: Esempio di struttura adattiva per la modifica del profilo alare[18]

Come si può notare nella Figura 2.16 ciò è possibile grazie ad un numero congruo di celle che, una volta adeguatamente pressurizzate, modificano il proprio volume e quindi muovono le celle circostanti modificando la geometria completa.

Sperimentalmente un'ala di questo tipo è costituita da una parte rigida e da una parte costituita di celle, siano esse a forma di honeycomb[30] o di forma pentagonale[23], che consentono di modificare il trailing edge con conseguente variazione di efficienza.(Figura 2.17 e Figura 2.18)

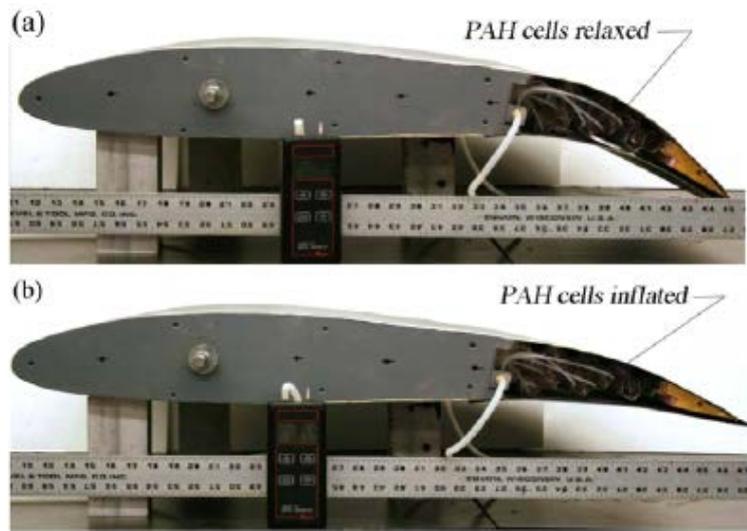


Fig. 2.17: La struttura adattiva formata da honeycomp viene utilizzata per modificare il trailing edge del profilo[30]

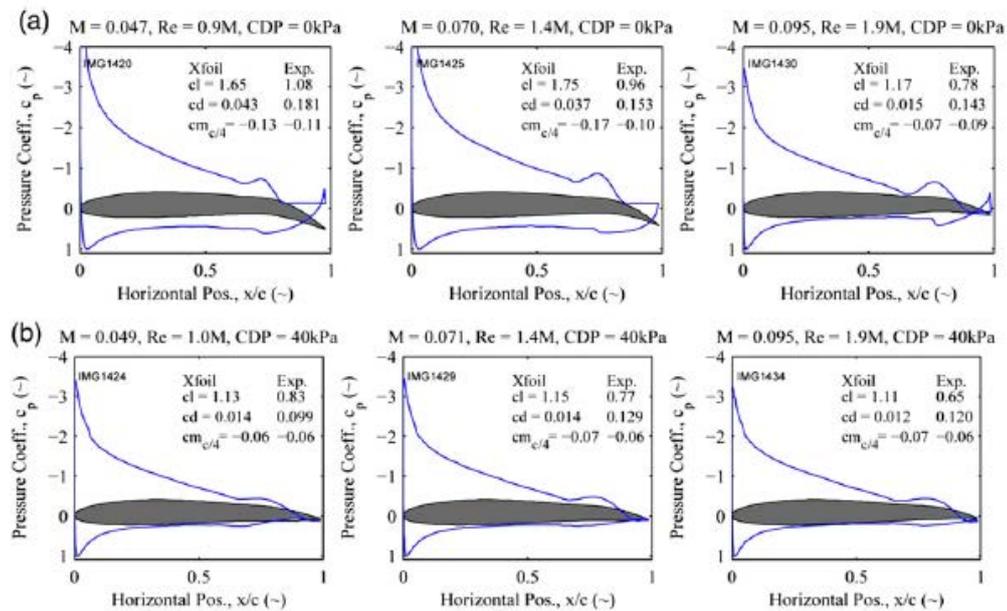


Fig. 2.18: Modifica del coefficiente di pressione per variazione di profilo[30]

Tale variazione di pressione può essere implementata in due distinte maniere: in maniera naturale e dunque grazie ad una variazione di pressione

esterna (nelle ali ad esempio) oppure mediante delle pompe.

Tale metodologia però non è facilmente applicabile nel campo del deployment, soprattutto in ambito spaziale, a causa della complessità di tali geometrie e della difficoltà di gestione della pressione, oltre alla difficoltà di ottenere un adeguato metodo di attuazione.

Più facile in questo senso è l'utilizzo di attuatori che sfruttano l'instabilità e non il fenomeno osmotico.

2.4.2 *Meccanismi con attuatori basati sul fenomeno di instabilità*

Alcune piante come detto riescono a compiere dei movimenti con una velocità di molto superiore a quella che si ottiene solamente considerando il limite di scorrimento dell'acqua all'interno della pianta, ciò è possibile come detto grazie ad un fenomeno di instabilità.

Tale fenomeno, come si è visto, avviene grazie ad una variazione di geometria, e dunque il gradiente di pressione non influisce direttamente nel fenomeno dello snap ma è solo un fattore utilizzato per l'incremento di energia e quindi non è essenziale; si può dunque sostituire la pressione con un altro elemento che consente l'aumento di energia per la riproduzione di tale fenomeno.

Grazie a ciò tale metodologia è dunque una scelta migliore per la ricerca dell'attuatore voluto.

Tale effetto è stato studiato e riprodotto in un robot che ha lo scopo di simulare la chiusura della pianta Venus Flytrap che utilizza tale fenomeno[17] (Figura 2.19) Il robot si compone di una struttura dotata di una certa curvatura capace di passare da una configurazione ad un'altra mediante un fenomeno a snap; tali configurazioni sono stabili in entrambe le posizioni, ciò è stato possibile grazie all' utilizzo di un composito che dopo un apposito ciclo di cura, mostra un comportamento bistabile.

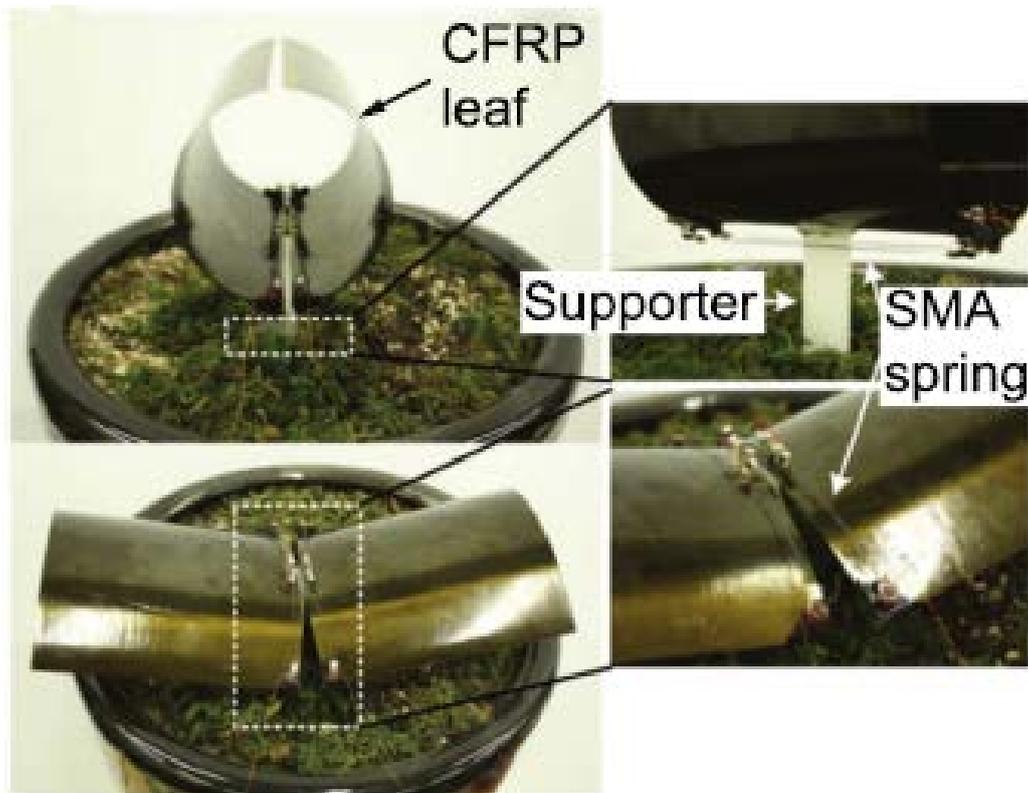


Fig. 2.19: Robot che simula la chiusura della pianta carnivora. Esso si compone di una superficie di materiale composito ed un attuttore SMA[17]

Per riuscire ad attuare il movimento a snap non è stata utilizzata la pressione che era solamente il mezzo con il quale si ottiene la variazione di geometria, ma è stato utilizzato un attuttore basato sullo shape memory alloy che consente di ottenere lo spostamento mediante variazione di temperatura a seguito di un riscaldamento elettrico.

Tale attuttore prende il nome di BPA, bend propagation actuator; questo tipo di attuazione si ottiene mediante due SMA, uno sopra la superficie ed uno nella parte sottostante della stessa.

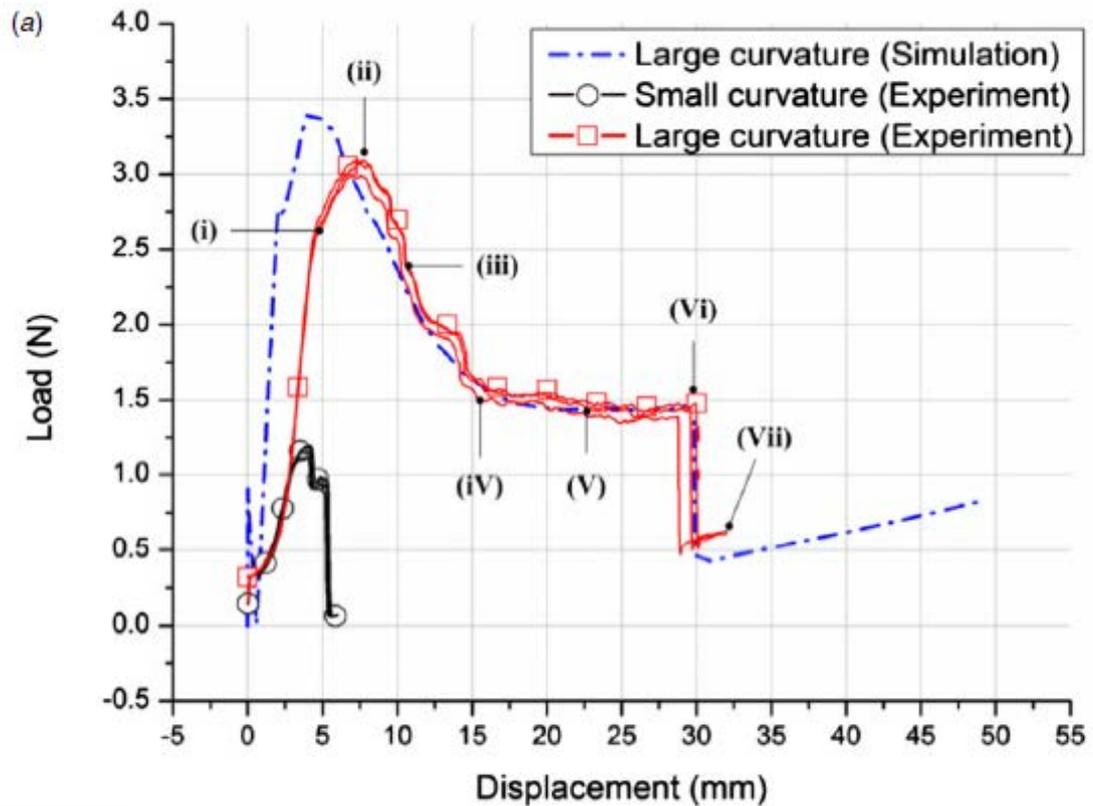


Fig. 2.20: Grafico che illustra la forza necessaria per avere l'instabilità; il calo di forza in VI corrisponde al fenomeno dello snap[17]

Osservando i risultati (Figura 2.20) si può vedere come vi sia un fenomeno dello snap per una determinata deformazione; per tale valore si ha quindi il dispiegamento.

Tale metodologia è dunque la base di lavoro per il nostro studio di un attuatore plant inspired.

Nel prossimo capitolo sarà descritto accuratamente il funzionamento dei materiali shape memory alloy in modo da poterli poi utilizzare per lo sviluppo di attuatore desiderato.

3. ATTUATORE CHE IMPIEGA SHAPE MEMORY ALLORY

Negli ultimi decenni vi è una ricerca verso i cosiddetti materiali intelligenti: essi sono materiali capaci di variare le caratteristiche geometriche e le loro proprietà grazie ad un'imposizione di un carico esterno, sia esso di tipo elettrico, magnetico o variazione di temperatura.

Nello specifico gli shape memory alloy, o leghe a memoria di forma, sono quella tipologia di materiali che riescono a riprendere la propria configurazione iniziale una volta applicata una variazione di temperatura.

Grazie a questa caratteristica gli SMA riescono dunque ad essere utilizzati come attuatori[9].

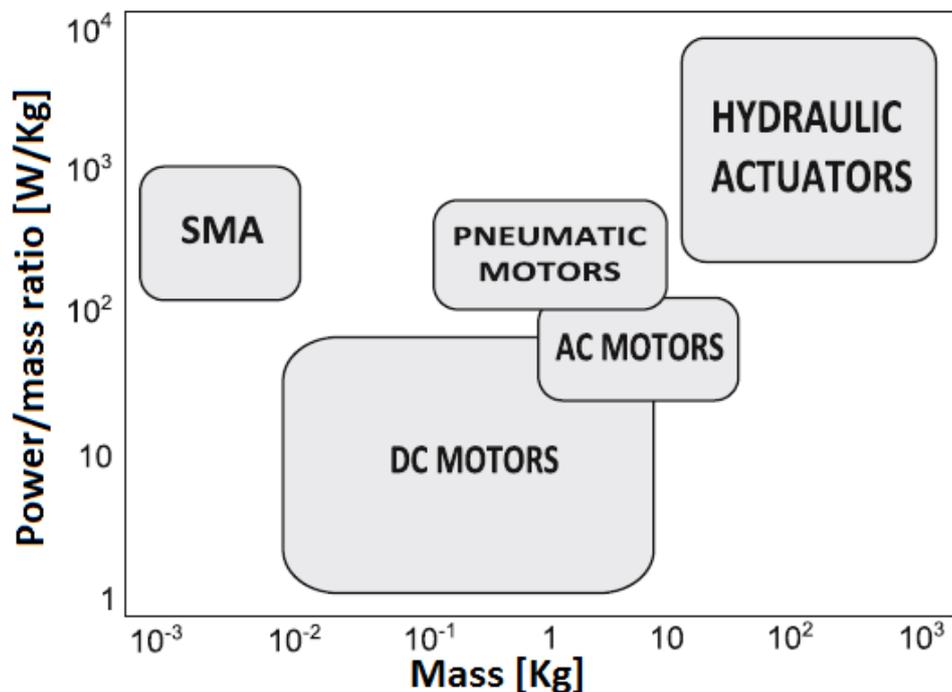


Fig. 3.1: Grafico che mette in evidenza il grande rapporto potenza peso degli SMA in confronto agli altri tipi di attuatori.[9]

Essi trovano particolare riscontro pratico nella robotica come utilizzo sostitutivo di attuatori di tipo elettrico/magnetico o idraulico. Tale vasto utilizzo in questo settore è dato dal grande valore di rapporto potenza peso rispetto agli altri attuatori sopra elencati, oltre che il basso costo di fabbricazione.

In Figura 3.1 sono comparati diversi tipi di attuatori per quanto riguarda la potenza che sono in grado di esplicare in funzione del proprio peso.

Gli SMA sono perciò utilizzati per la grande densità di forza.

Vi sono diversi modi per usare gli SMA come attuatori: il metodo più semplice è l'utilizzo di un filo che una volta scaldato permette di ottenere una variazione di lunghezza e producendo una forza; esso ha la caratteristica di avere una elevata densità di forza ma un piccolo valore di spostamento.

Per ovviare a questo problema il filo di SMA viene sostituito con una molla che consente, a seconda dei propri parametri geometrici, di avere un migliore bilanciamento di queste due caratteristiche.

Nella prima parte del capitolo si descrive dettagliatamente come avviene tale trasformazione e cambiamento di fase e si definisce lo shape memory effect e la superelasticità, nella seconda parte del capitolo si definisce il processo che porta al dimensionamento del sistema.

3.1 Comportamento meccanico degli shape memory alloy

Come detto gli SMA consentono, mediante variazione di temperatura, di ottenere una deformazione che viene dunque utilizzata come metodo di attuazione.

Si ha però la necessità di dimensionare la forma dell'SMA per ottenere un attuatore dalle caratteristiche volute.

Prima di definire quali problemi si vengono ad incontrare per il dimensionamento e il successivo uso di tale metodologie, è opportuno descrivere gli effetti che consentono al fenomeno di avvenire.

Gli SMA sono stati scoperti negli anni 60 quando un filo di materiale al Nitinol (NiTi), dopo essere stato deformato plasticamente, torna alla sua forma originaria mediante un aumento di temperatura.

Tale fenomeno avviene per cambiamento di fase tra martensite, stabile alle basse temperature, e l'austenite stabile a temperature maggiori.

Come si vede dalla tabella la martensite ha una capacità di elongazione molto maggiore rispetto all'austenite e dunque si ha un valore di deformazione finale maggiore rispetto ad una normale deformazione di sola austenite (Fi-

gura 3.2).

	Martensite	Austenite	Stainless Steel	Titanium
Ultimate Tensile Strength (MPa)	103-1100	800-1500	483-1850	540-740
Tensile Yield Strength (MPa)	50-300	100-800	190-1213	390
Modulus of Elasticity (GPa)	21-69	70-110	190-200	105-110
Elongation at failure (%)	Up to 60	1-20	12-40	16

Fig. 3.2: Tabella che illustra le proprietà fisiche di diversi materiali.[9]

Nello specifico partendo da una configurazione austenitica, a seguito di un raffreddamento si ottiene martensite di tipo twinned[15].

Questo processo avviene quando, raffreddando, i legami tra gli atomi non si rompono e perciò si dispongono in una configurazione a lisca di pesce.

Quando poi la martensite subisce uno sforzo esterno passa ad una configurazione detta detwinning ottenendo il valore deformazione finale pari alla deformazione di sola martensite.

Una volta scaldato, il filo torna allo stato originale di sola austenite e il valore di deformazione finale sarà pari alla deformazione di sola austenite.

In Figura 3.3 è illustrato il processo di utilizzo di un SMA.

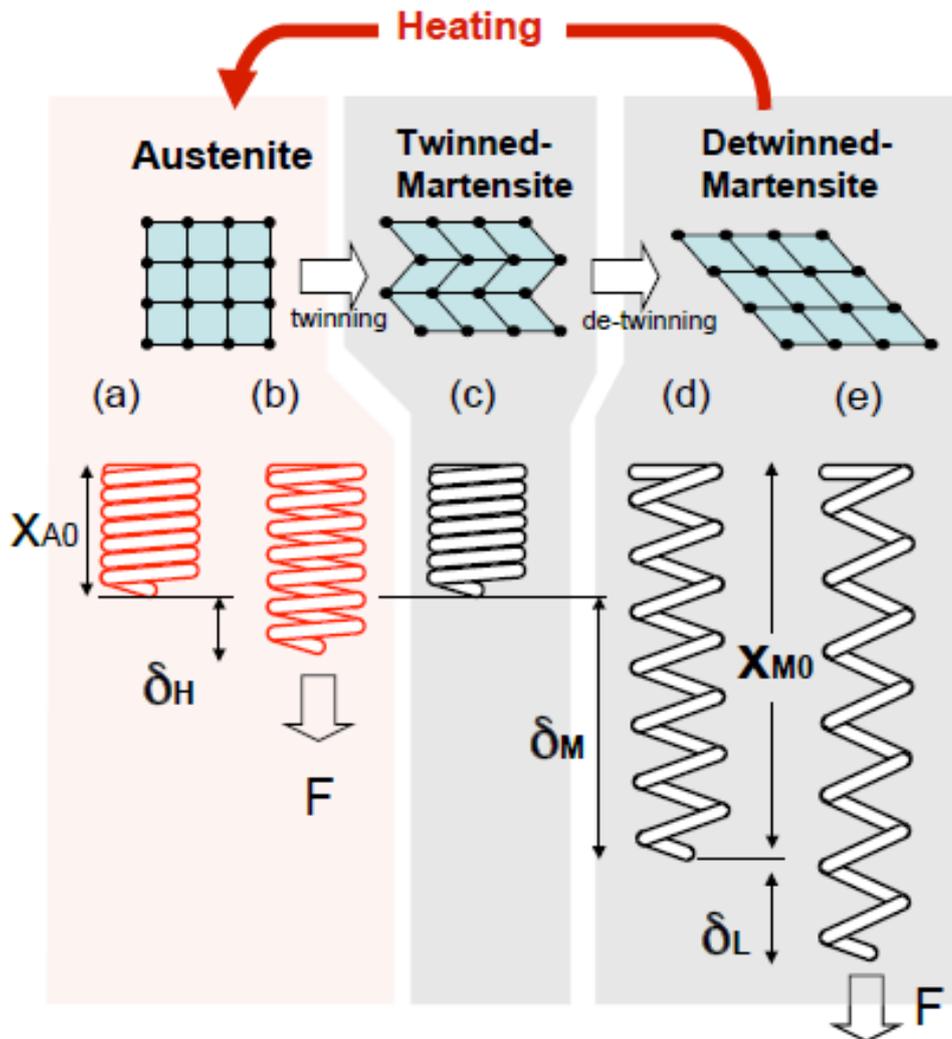


Fig. 3.3: processo di ottenimento di martensite detwinned: A- si ha la presenza di sola austenite B-austenite deformata C-raffreddamento fino a martensite twinned D/E-ottenimento di martensite detwinned attraverso un' applicazione di carico[15]

In un grafico forza deformazione si nota come questa tipologia di materiali formi un diagramma ciclico (Figura 3.4).

I fenomeni coinvolti in tale tipologia di attuatori sono lo shape memory effect e la superelasticità.[25]

Lo shape memory effect è proprio la capacità di un materiale di riprendere, a seguito di un riscaldamento, la forma originale anche dopo aver subito una deformazione plastica.

La superelasticità è al contrario la capacità dell'SMA di ottenere un grafico tensione deformazione caratteristico che consente di definire un ciclo.

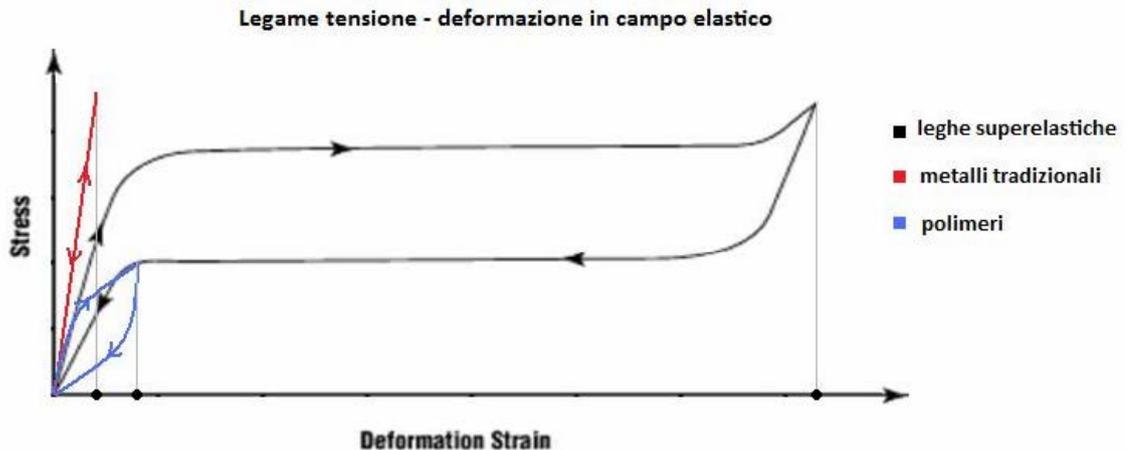


Fig. 3.4: Il materiale SMA mostra un comportamento ciclico a differenza dei metalli tradizionali. Immagine tratta da https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5a/Legame_tensione-deformazioni_-_polimeri%2Cmetalli%2Csuperelastici.jpg

3.1.1 Trasformazione martensitica degli shape memory alloy

La trasformazione da martensite ad austenite si ha quando l'energia libera della martensite è minore dell'energia libera dell'austenite; ciò corrisponde ad un valore di temperatura pari a T_0 . [25]

Tale trasformazione però non avviene propriamente a $T=T_0$ ma ad una temperatura più bassa definita M_s da cui inizia ad avvenire la trasformazione fino a che non viene raggiunta una temperatura detta M_0 in cui si ha la completa trasformazione di austenite in martensite.

Allo stesso modo quando si ha la trasformazione da martensite ad austenite tramite aumento di temperatura, vi è una temperatura iniziale definita A_s , maggiore di T_0 , nella quale la martensite inizia a trasformarsi in austenite e, al crescere della temperatura, si ha una temperatura finale A_f nella quale tutta la martensite si è trasformata in austenite.

Nella Figura 3.5 sono illustrate le varie temperature di transizione.

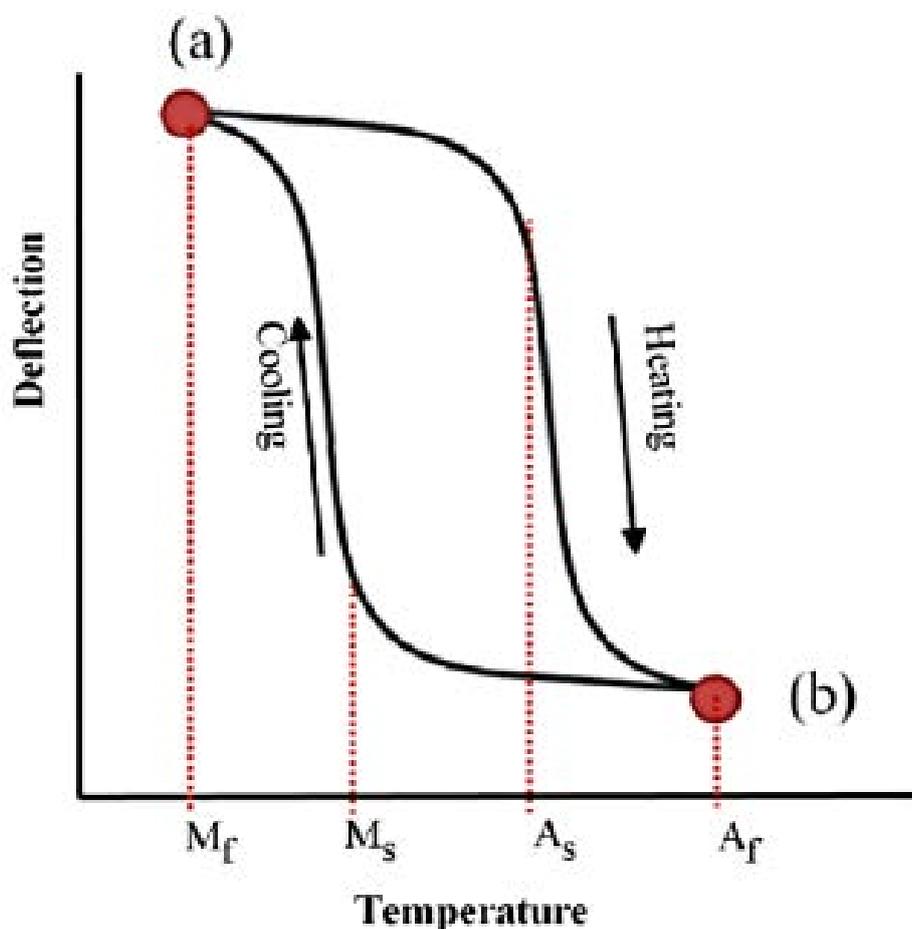


Fig. 3.5: L'SMA ha un ciclo di trasformazione da austenite a martensite che segue un processo di isteresi. Più propriamente la zona di incremento di temperatura corrisponde a passaggio da martensite ad austenite, la zona di raffreddamento corrisponde alla trasformazione da austenite a martensite.[1]

La temperatura di equilibrio T_0 vale approssimativamente:

$$T_0 = (M_s + AfF)/2 \quad (3.1)$$

Tale temperatura di trasformazione dipende maggiormente dal processo produttivo del SMA e coinvolge le proprietà microstrutturali del materiale. Durante tali trasformazioni vi è un sostanziale cambiamento delle proprietà fisiche della struttura: durante la trasformazione tra martensite ed austenite vi è un accumulo di calore e dunque una trasformazione endotermica, al con-

trario durante la trasformazione tra austenite in martensite vi è un rilascio di calore.

La quantità di calore per una data temperatura sarà allora proporzionale alla frazione volumetrica di materiale trasformato.

Come detto però la trasformazione da austenite in martensite è influenzata anche dal carico applicato; l'applicazione di un carico esterno σ fornirà infatti un contributo energetico che modifica di conseguenza il punto energetico di T_0 .

Si definisce quindi un valore di entropia S e un valore di deformazione ε e si ha un valore di equilibrio dato da:

$$- [\Delta S]^M A \Delta T - [\Delta \varepsilon]^m a : \Delta \sigma = 0 \quad (3.2)$$

che definisce il legame tra entropia e stress della trasformazione.

Nel bilancio non è stata considerata la deformazione data dalla differenza di temperatura poichè in confronto con la deformazione meccanica essa è trascurabile.

Tramite tale formula si definisce un legame tra il carico applicato e la temperatura critica di trasformazione.

Il grafico che lega lo sforzo applicato e la temperatura per la quale si inizia ad avere la trasformazione, permette di definire come avviene questa trasformazione da martensite ad austenite (Figura 3.6).

Dato un carico iniziale σ_0 si riscontra una temperatura critica per la quale si ha un inizio di trasformazione pari a M_s^g ; allo stesso modo data una temperatura T si riesce a definire il carico per il quale si ha l'inizio di trasformazione.

Vi è poi un aumento fino al valore di M_y nel quale il carico applicato coincide con il carico critico plastico austenitico.

Oltre tale valore di temperatura, il carico segue la curva di deformazione plastica fino alla temperatura limite M_d oltre il quale non vi è più trasformazione di fase.

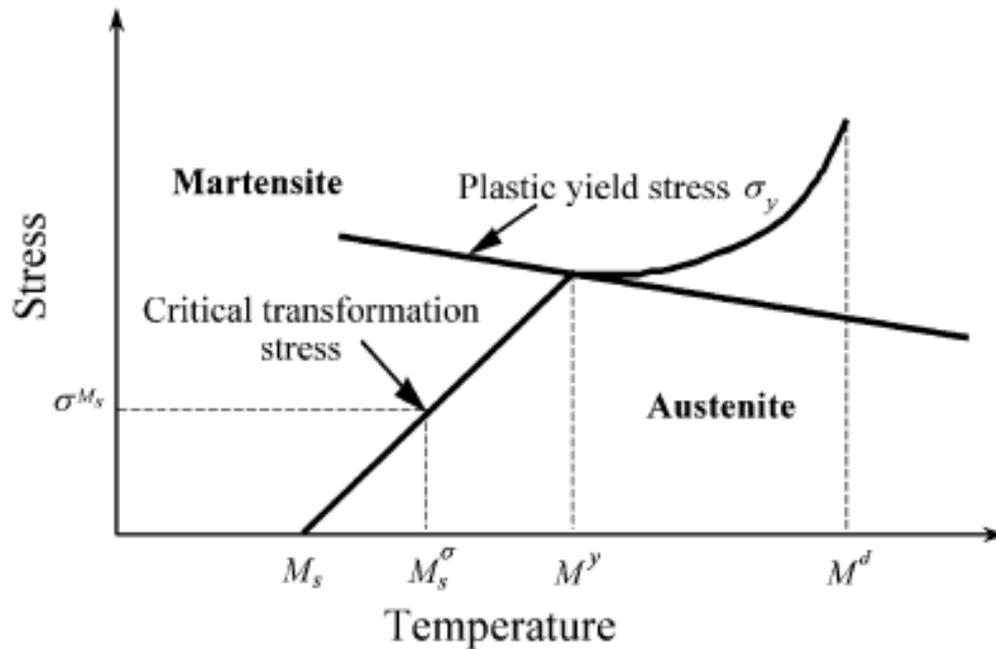


Fig. 3.6: relazione tra il carico critico e la temperatura critica del processo di trasformazione da martensite ad austenite. M_Y è la temperatura critica e il carico critico avvengono allo stesso momento, M_d è la temperatura ultima in cui avviene la trasformazione.[25]

3.1.2 Shape memory effect

Come detto in precedenza lo shape memory effect (SME) è la capacità di questo tipo di materiale di tornare alla propria forma iniziale dopo un cambiamento di fase termomeccanico.

Nello specifico si può tracciare un grafico tridimensionale carico-deformazione-temperatura che permette di definire in maniera efficace le caratteristiche del fenomeno (Figura 3.7).

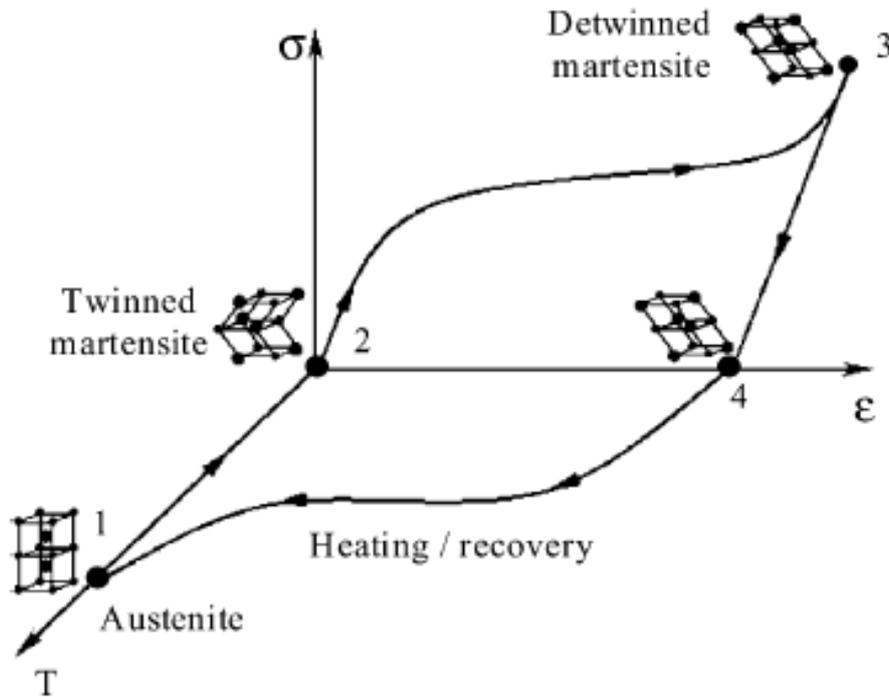


Fig. 3.7: schema temperatura-carico-deformazione che lega la variazione cristallografica nello shape memory effect[25]

Partendo da un materiale austenitico si ha un decremento di temperatura che porta una trasformazione da austenite a martensite di tipo twinned (tratto 1-2 del grafico).

Dal punto 2-3 vi è poi l'applicazione di carico meccanico che porta l'SMA ad assumere una configurazione deformata e, per quanto riguarda il comportamento cristallino di martensite, i vari cristalli assumono una geometria detwinned.

Al rilascio del carico poi la martensite in configurazione detwinned rimane in configurazione deformata (tratto 3-4)

Come ultima azione vi è immissione di calore con conseguente aumento di temperatura che consente al sistema di tornare alla fase iniziale e quindi si viene ad avere la trasformazione da martensite ad austenite.

3.1.3 Pseudoelasticità

La pseudoelasticità è la capacità di un materiale di essere deformato plasticamente per poi tornare alla propria forma originale.

Un esempio di questo è dato dal grafico che descrive la risposta termomeccanica del fenomeno di trasformazione (Figura 3.8)

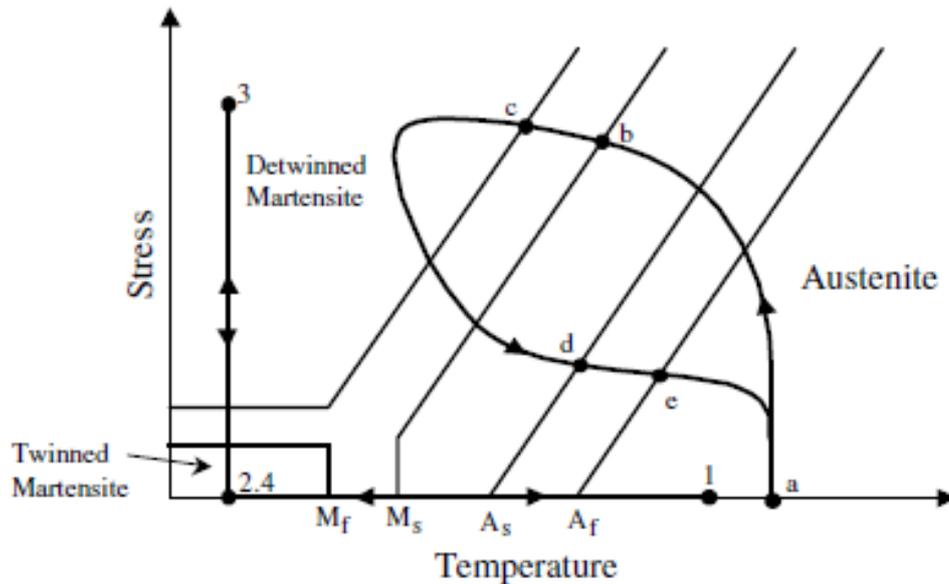


Fig. 3.8: Diagramma che indica la relazione tra sforzo e temperatura nel ciclo austenite-martensite[25]

dove vi è un passaggio a-b-c-d-e fino ad un ritorno al punto a.
 Partendo con un carico iniziale pari a 0 nella fase austenitica, esso viene successivamente caricato termomeccanicamente fino ad una fase detta critica in cui vi è l'inizio della trasformazione (a-b).
 Con l'aumento di carico vi è dunque la trasformazione che comporta una grande deformazione plastica con l'ottenimento finale di detwinning martensite.
 Dal tratto c-d non vi è un cambiamento di fase ma vi è un allineamento di martensite in twinning martensite.
 Dal tratto d poi vi è un ritorno alla forma austenitica in cui tutte le deformazioni diventano 0 fino ad un completo ritorno al punto a iniziale.
 Per quanto riguarda il legame tra sforzo e deformazione si riesce a definire il ciclo osservando individualmente i diagrammi di austenite e martensite.(Figura 3.9)

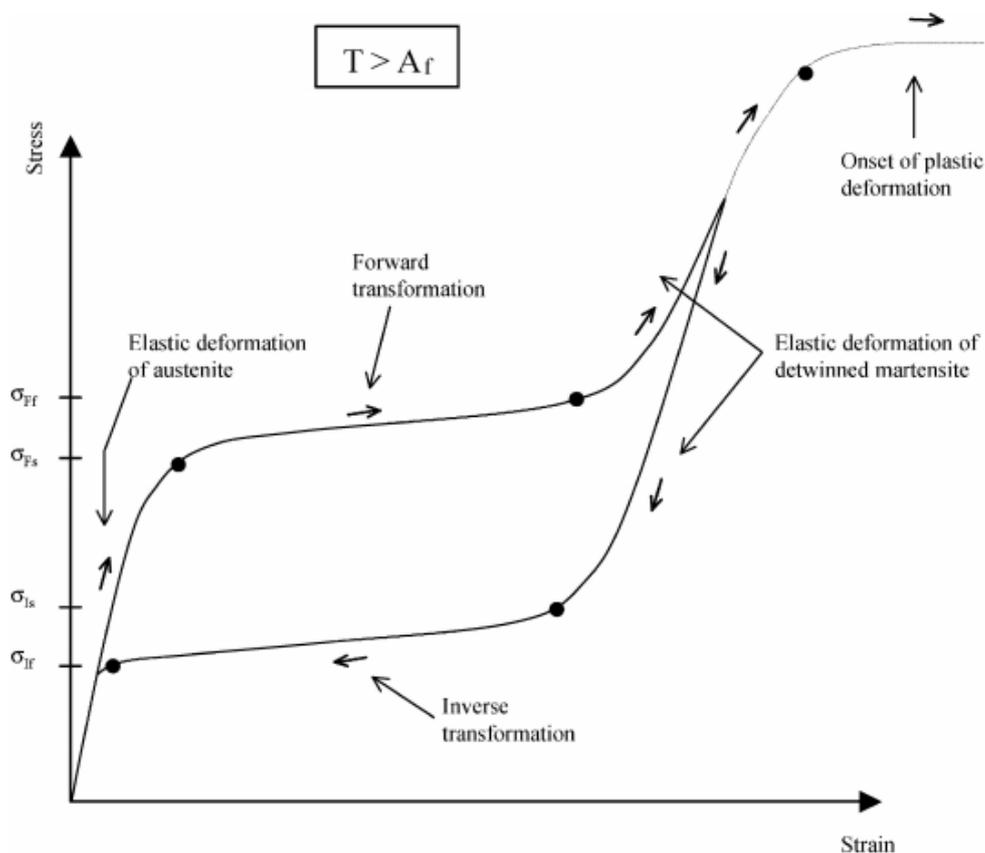


Fig. 3.9: Nella figura è illustrato il grafico dell'effetto superelastico della trasformazione dell'SMA. La parte superiore della curva equivale alla trasformazione da austenite a martensite, la parte inferiore invece corrisponde alla trasformazione da martensite ad austenite. Immagine tratta da <http://www.ing.unitn.it/~luttero/materialinnovativi/sma.pdf>

In tale grafico si nota come vi sia un fenomeno di steresi.

3.1.4 Effetto della microstruttura negli shape memory effect

I cristalli definiscono il comportamento e le caratteristiche di un SMA; essi possono essere realizzati sia in configurazione monocristallina che in configurazione policristallina.

In Figura 3.10 è illustrato il grafico sforzo deformazione per quanto riguarda un SMA monocristallino.

Per un sistema monocristallino una volta raggiunto il valore per cui inizia la trasformazione σ_s si ha una deformazione inelastica molto alta fino al termine della trasformazione data dal valore σ_f .

Allo stesso modo per la trasformazione inversa si ha una partenza dal valore σ_a fino a terminare ad un valore σ_{af} . Come si evince dal grafico sottostante, anche a temperature diverse, si ha un processo di steresi che è pressochè identico nella forma. (Figura 3.10)

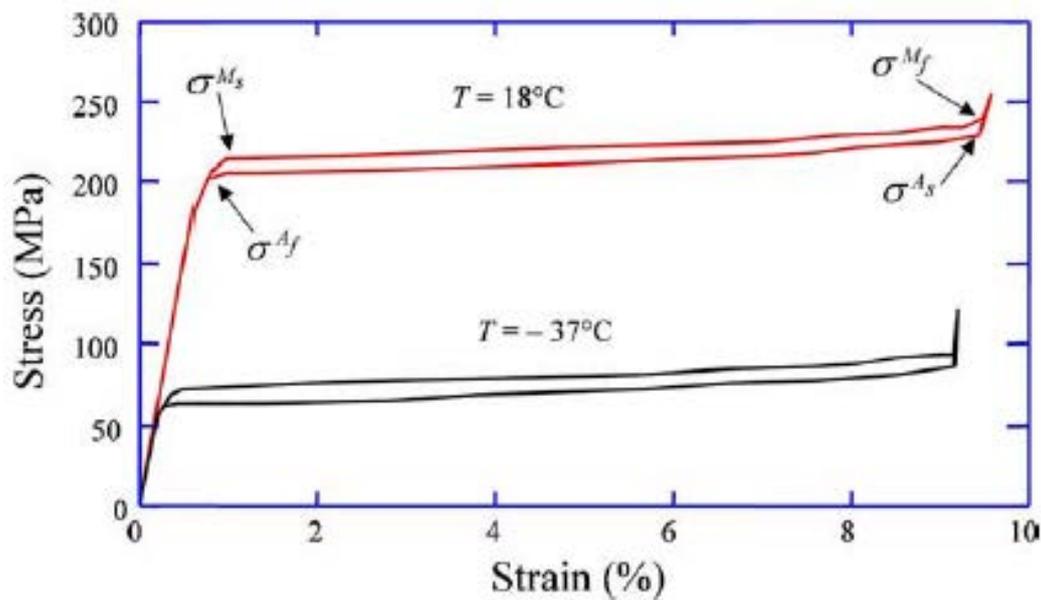


Fig. 3.10: effetto superelastico osservato in Cu69Zn16Al15 monocristallo a due diverse temperature. Lo stress in cui avviene la trasformazione è costante[25]

Le cose però sono diverse nel caso di SMA policristallino infatti come detto gli aspetti microstrutturali hanno grande rilevanza nel processo e la differenza di direzione tra i vari cristalli produce differenti grafici. (Figura 3.11)

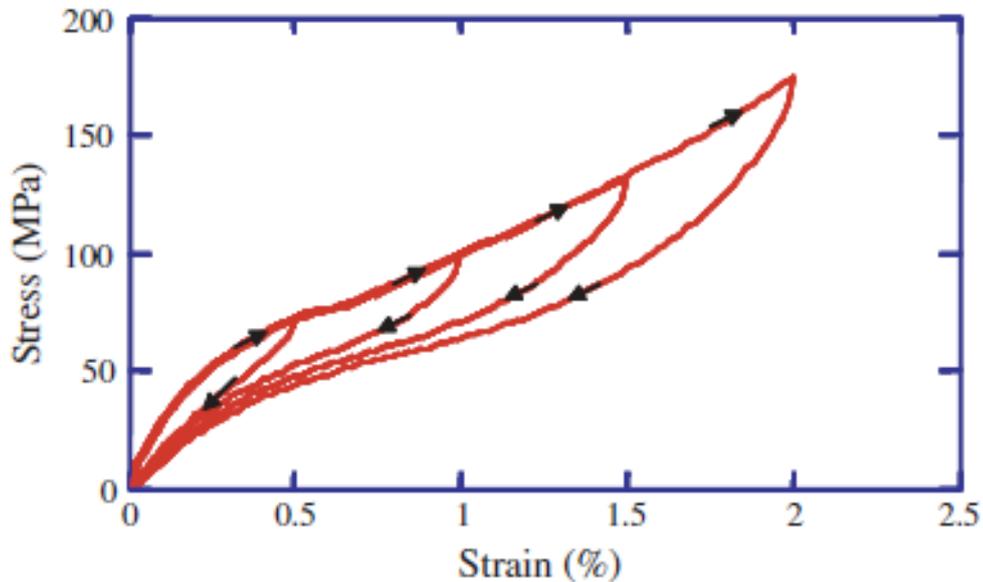


Fig. 3.11: Effetto superelastico osservato in Cu66.1Zn24.4Al8.4Ni1.1 policristallo a T ambiente. Il ciclo di trasformazione genera un carico progressivo[25]

Per un carico applicato ad un materiale austenitico la trasformazione martensitica è indotta progressivamente, il grafico di isteresi incrementa di area e la trasformazione avviene gradualmente e non con un valore costante di stress come invece avveniva nel caso monocristallino. Tale differenza di comportamento si spiega osservando che microscopicamente ogni singolo cristallo martensitico è orientato e dunque non vi è un'orientazione singola ma una per ogni grano.

3.1.5 Fatica

Prima di ottenere un valore deformazione temperatura stabile si deve effettuare un numero consistente di cicli per stabilizzare l'effetto.[31]

Per i primi cicli infatti si nota come il ciclo di isteresi vari fino a diventare stabile; esso accade per dei fenomeni di deformazione plastica che tendono a diminuire la resistenza del materiale fino ad un punto di saturazione.

In Figura 3.12 sono graficati vari cicli di carico/scarico fino all'ottenimento di configurazioni stabili.

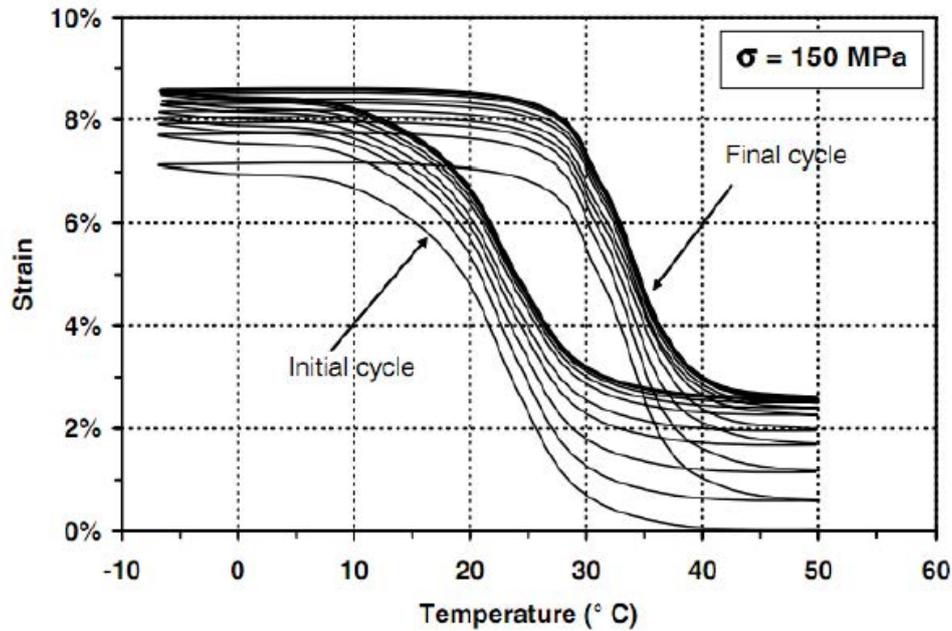


Fig. 3.12: ciclo di deformazione per un filo NiTi sotto un carico costante di 160 MPa[31]

I cicli permettono di definire poi una resistenza a fatica: essa viene identificata come il numero di cicli che si possono effettuare prima di ottenere una deformazione finale minore del 70% di quella iniziale.

Nella Figura 3.13 sono definiti i cicli di vita di diverse tipologie di SMA.

Alloy	Structure of Low-Temp Phase	Thermal Hysteresis (K)	Shape Recovery Strain (%)	Fatigue Life (cycles)
Ni-Ti Ni-Ti-Fe	Rhombohedral	2-3	1	1,000,000
Ni-Ti-Cu	Orthorhombic	10-15	4-5	10,000
Ni-Ti	Monocline	20-40	6-8	<100

Fig. 3.13: Resistenza a fatica di alcuni SMA[31]

I dati comunque dipendono molto dal ciclo di carico SMA, dalle proprietà cristalline del materiale, del trattamento termico che esso ha ricevuto, dal carico a cui esso è sottoposto.

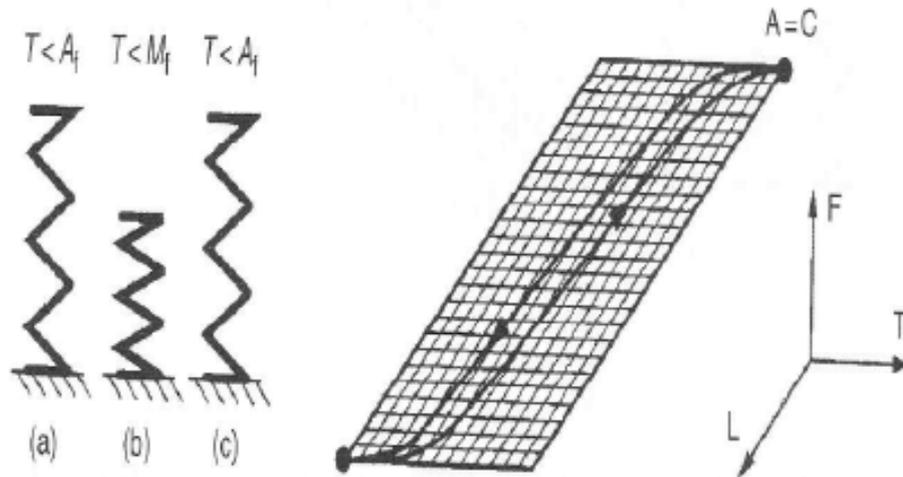


Fig. 3.14: Diagramma temperatura deformazione SMA a doppia via. Si nota che non sono necessari sforzi per ottenere la configurazione iniziale[31]

3.1.6 Two way SMA

Fino ad ora si è presa in esame solamente la caratteristica di un SMA per la quale durante la fase di raffreddamento non si ha variazione di ϵ e mantiene la geometria deformata se non c'è l'applicazione di un carico esterno; vi è però la possibilità di ottenere un SMA capace di variare la sua deformazione durante la fase di raffreddamento e dunque non necessita di carico esterno; tale tipologia di SMA prende il nome di two way SMA.[31]

Nella Figura 3.14 è graficato il ciclo di un Two way SMA nel quale si nota come il grafico sia sul piano L-T non essendoci carico esterno.

Al contrario dello shape memory effect e della pseudoelasticità che consentivano il comportamento descritto in precedenza, questo fenomeno non è intrinseco del materiale ma è ottenuto mediante un trattamento termomeccanico: tale trattamento prende il nome di ciclaggio termico non forzato della martensite.[4]

Il processo avviene facendo passare l'austenite da una temperatura di circa 500°C ad un rapido raffreddamento che consente di ottenere della martensite in cui vi sono delle dislocazioni che consentono alla martensite di svilupparsi in direzioni preferenziali.

A questo punto vi sono due metodologie per ottenere SMA a due vie:

1. Shape memory effect formato: una volta raffreddato fino a T inferiori a M_f , si piega poi fino alla deformazione voluta e successivamente si riscalda fino a T superiori ad A_f , ciò per 20/30 cicli.
2. Stress induced martensite: si raffredda fino a T superiori a M_s , poi si piega fino alla condizione voluta, raffreddato fino a T inferiori a M_f e poi scaldato fino a T maggiori di A_f , ciò sempre per 20/30 cicli.

3.2 Dimensionamento di un attuatore shape memory effect

Ora che è stato illustrato il fenomeno fisico che consente la creazione e la modalità di utilizzo di questo tipo di attuatori analizzeremo parte di dimensionamento che definisce le caratteristiche geometriche e fisiche che deve avere l'attuatore.

Come detto in precedenza il tipo di attuatore SMA può essere utilizzato semplicemente con l'utilizzo di un filo dal materiale appropriato, ma per avere un elemento più gestibile, si utilizza un filo dotato di un numero di avvolgimenti creando così una molla.

3.2.1 Materiale

La proprietà degli SMA vengono definite a seconda della proprietà chimica del materiale.

Largamente utilizzato è il NiTi che viene utilizzato per i suoi grani fini e la sua bassa anisotropia che consentono di ottenere valori di deformazione fino all' 8 % e un alto valore di resistenza alla corrosione e dunque biocompatibile.[28][25]

In Figura 3.15 è illustrata la variazione di cristalli durante il processo.

Per una composizione Ni50Ti50 vi è un valore di temperature caratteristiche $M_s=288$ [K] e $A_f=362$ [K], con un' incertezza di 40 [K] causata dal metodo di produzione e di trattamento.

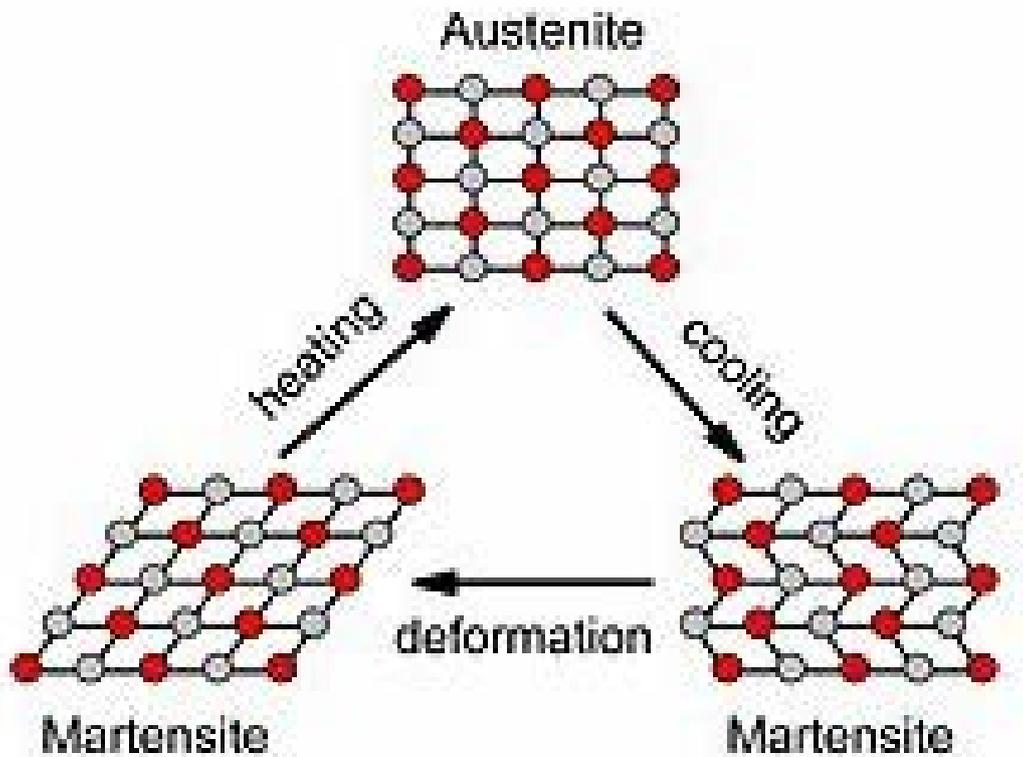


Fig. 3.15: Cambiamento di cristalli durante la trasformazione del nitinol[28]

Oltre al semplice NiTi, che solitamente viene utilizzato in un modello equiatomico, può essere aggiunto un terzo elemento per modificare le temperature di transizione.

Con l'aggiunta di Cu ad esempio vi è una riduzione e stabilizzazione del ciclo di isteresi ed è molto utilizzato anche perchè riduce la sensibilità alla differenza di composizione: composizioni differenti dal Ni50Ti50 portano a delle variazioni significative di temperature M_s e A_s , con l'aggiunta del rame questo effetto è molto mitigato.

Valori in composizione di rame superiore al 10 % tuttavia hanno mostrato un comportamento fragile del sistema.

Vi è poi la possibilità di aggiungere una percentuale di zirconio in sostituzione al Ti che comporta un aumento di temperatura di trasformazione.

Per una composizione Ni47Ti38Zr15 si raggiunge una $M_f=373$ [K] ed un valore di $A_f=503$ [K]

Allo stesso modo dello zinco può essere utilizzato l'anzio in sostituzione del Ti; in questo caso le temperature raggiunte sono ancora maggiori dello zirco-

nio con minori percentuali di concentrazioni, vi è però un decremento molto elevato di pseudoelasticità.

Altri tipi di elementi che possono essere inseriti per migliorare le caratteristiche sono il Pd (temperature di trasformazione più alte), Pt (migliori caratteristiche meccaniche) e F (migliori caratteristiche di fatica).

Nella Figura 3.16 sono elencate le temperature di transizione per le diverse composizioni chimiche degli SMA.

NiTi Based SMAs	M_f	M_s	A_s	A_f
$Ti_{50}Ni_{50}$	15	55	80	89
$Ti_{50.0}Ni_{50.0}$	-28	37.5	48.2	77.8
$Ti_{49.5}Ni_{50.5}$	-78	-19	9	53
$Ti_{49.1}Ni_{50.9}$	-115.8	-30.7	1.9	44.6
$Ti_{49}Ni_{51}$	-153	-114	-89	-40
$Ti_{48.5}Ni_{51.5}Cu_{10}$	14.4	37.5	42.6	60.0
$Ti_{49}Ni_{41}Cu_{10}$	8	30	35	50
$Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$	21	41	53	67
$Ti_{44}Ni_{47}Nb_9$	-175	-90	-85	-35
$Ti_{42.2}Ni_{49.8}Hf_8$	50	69	111	142
$Ti_{40.7}Ni_{49.8}Hf_{9.5}$	61	90	118	159
$Ti_{40.2}Ni_{49.8}Hf_{10}$	103	128	182	198
$Ti_{35.2}Ni_{49.8}Hf_{15}$	95	136	140	210
$Ti_{30.2}Ni_{49.8}Hf_{20}$	127	174	200	276
$Ti_{48}Ni_{47}Zr_5$	20	65	75	138
$Ti_{43}Ni_{47}Zr_{10}$	45	100	113	165
$Ti_{38}Ni_{47}Zr_{15}$	100	175	175	230
$Ti_{33}Ni_{47}Zr_{20}$	205	275	265	330
$Ti_{50}Pd_{50}$	550	563	580	591
$Ti_{50}Ni_{20}Pd_{30}$	208	241	230	241
$Ti_{50}Ni_{10}Pd_{40}$	387	403	419	427
$Ti_{50}Ni_5Pd_{45}$	467	486	503	509
$Ti_{50}Ni_{45}Pt_5$	10	29	36	49
$Ti_{50}Ni_{40}Pt_{10}$	-8	18	-27	36
$Ti_{50}Ni_{30}Pt_{20}$	241	300	263	300
$Ti_{50}Ni_{20}Pt_{30}$	537	619	626	702

Fig. 3.16: Elenco di temperature di trasformazione per SMA dai diverse leghe.[31]

Vi sono poi gli shape memory alloy basati sul Cu, accoppiato rispettivamente con Al e Zn; essi rispetto al NiTi mostrano valori più bassi di isteresi ma un fenomeno di decomposizione ad alte temperature.

La temperatura di trasformazione è molto dipendente dalla composizione ed anche in questo caso si utilizza un terzo elemento per migliorarne le caratteristiche.

Il CuAlNi riesce ad avere un alto range di temperatura a seconda del valore di alluminio presente nella composizione ma vi è un limite alla trasformazione pari a 473 [K]. Materiali monocristallini con questo tipo di configurazione

comunque mostrano valori di pseudoelasticità molto elevati.

Esistono infine SMA di tipo ferroso ma sono caratterizzati da una riduzione molto elevata dello shape memory effect fino a volte a scomparire. Più interessanti sono invece gli SMA NiAl che sono molto fragili, ma, con l'aggiunta di ferro diventano abbastanza duttili da essere utilizzati; hanno inoltre il vantaggio di avere una buon SME e un buon controllo sulla temperatura di trasformazione grazie alla presenza dell'alluminio.

In Figura 3.2.1 sono illustrate le diverse proprietà di SMA dalle diverse composizioni.

Alloy	NiTi	CuZnAl	CuAlNi	FeNiCoTi	Unit
Range of Transformation Temperature	-100 to +90	-200 to +100	-150 to 200	-150 to +550	°C
Hysteresis Width	30	15	20		K
Max. one-way effect	8	4	6	1	% Strain
Max. two-way effect	4	0.8	1	0.5	% Strain
Fatigue Strength	800...1000	400...700	700...800	600...900	N/mm ²
Admissible Stress for Actuator Cycling	150	75	100	250	N/mm ²
Typical Number of Cycles	>100 000	10 000	5 000	50	
Density	6450	7900	5000	50	kg/m ³
Electrical Resistivity	80...100	7...12	10...14		10 ⁻⁸ Ωm
Young's Modulus	50	70...100	80...100	170...190	GPa
Corrosion Resistance	Very good	Fair	Good	Bad	

Fig. 3.17: Proprietà di diversi SMA[31]

3.2.2 Modello meccanico

Partendo dunque da un elemento costituito da un avvolgimento si vogliono determinare le caratteristiche meccaniche che deve avere l' SMA a partire dal modello costitutivo.[1][32][31]

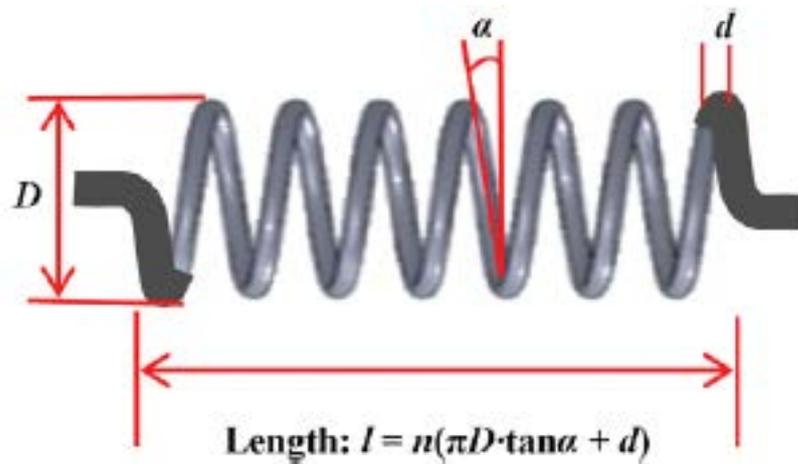


Fig. 3.18: geometria di SMA a molla[1]

Per l'utilizzo del SMA si devono dunque determinare 4 parametri fondamentali (Figura 3.18):

1. d =diametro del filo
2. D =diametro molla
3. N =numero di avvolgimenti
4. α =angolo di pitch

Per la determinazione di questi 4 parametri si impongono le condizioni iniziali di spostamento e di forza; i loro valori saranno funzione solamente delle caratteristiche geometriche dell' SMA.

Per lo studio quindi si è partiti da un modello costitutivo adeguato che consentisse di determinare le caratteristiche fisiche.

Si deve però tenere conto che l'SMA è capace di ritornare in configurazioni originali anche per sforzi non elastici, ciò deve essere preso in considerazione nello studio del modello costitutivo poiché porta ad ottenere una curva sforzo-deformazione molto diversa da quella che si ottiene considerando solamente la deformazione elastica (Figura 3.19).

Tale diverso comportamento porta quindi a definire modelli costitutivi diversi da quello classico dato dalla legge di Hooke.

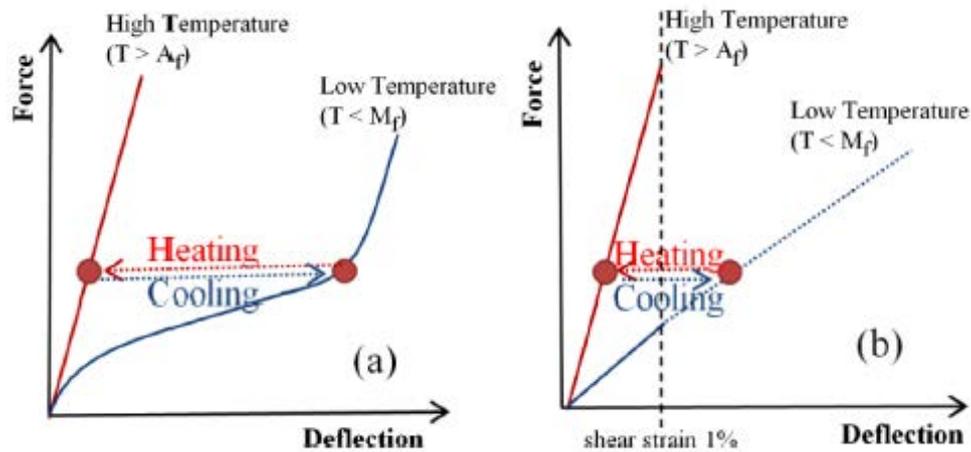


Fig. 3.19: grafico forza deformazione. A sinistra il grafico che descrive il fenomeno reale, a destra modello classico[1]

Modello elastico

L'SMA è in grado di tornare alla propria forma indeformata anche per riduzioni dell' 6-8% ma ciò comporta una zona di fase inelastica e dunque non linearità.

Per rimanere nel campo elastico sono considerate deformazioni pari all' 1%; per valori maggiori vi è l'effetto inelastico che comporta il fenomeno di detwinning della martensite.

Con valori di deformazione superiori ad 1 % si entra nel campo di applicazione dello shape memory effect e si possono ottenere dunque fenomeni di deformazione e ritorno molto più elevati.

Ciò è evidente se si considerano i grafici che relazionano lo spring index C , un coefficiente che rapporta il valore di diametro della molla con il diametro del filo.

$$C = D/d \quad (3.3)$$

Per valori maggiori del coefficiente, l'angolo di pitch della molla cresce in maniera molto più elevata nel caso di deformazioni inelastiche rispetto a quelle di deformazioni elastiche e si ottengono deformazioni molto più elevate.(Figura 3.20)

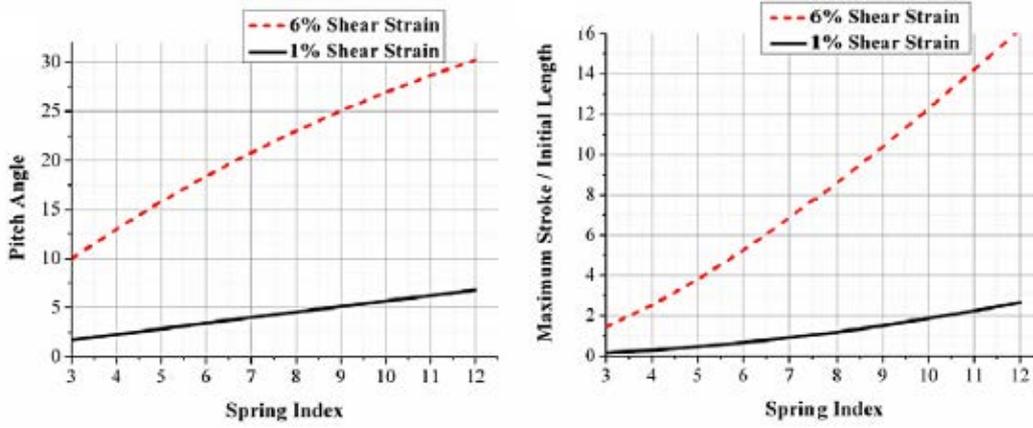


Fig. 3.20: per deformazioni superiori a quelle elastiche i valori di pitch angle e di deformazione in funzione dell'indice della molla.[1]

Definiti i limiti del modello elastico si nota tuttavia come esso sia la base di partenza per la definizione successiva del modello non lineare e dunque è utile la definizione di tale modello costitutivo.

Come si è visto dal grafico precedente un cambiamento di fase all'interno dell'attuatore consente di ottenere una variazione del modulo di rigidità e dunque alla definizione di diversi moduli di taglio in base alla temperatura in cui si trova la molla.[19]

1. G_m se $T < M_f$ e $T < A_s$ e dunque sola martensite
2. G quando $M_f < T < A_f$ e dunque cambio di fase
3. G_a quando $T > A_f$ e $T > M_s$ e dunque sola austenite

Scopo del modello è definire una variazione di lunghezza che corrisponde alla differenza di deformazione tra martensite ed austenite.

$$\Delta\delta = \delta M - \delta A \quad (3.4)$$

Per la definizione del modello allora si parte dalle formule classiche della molla che definiscono la deformazione in funzione di una forza F :

$$\delta = \frac{8FD^3N}{d^4G} \quad (3.5)$$

che deve essere considerata come differenza di deformazione tra martensite ed austenite e quindi:

$$\delta = \frac{8FD^3N}{d^4}(1/G_M - 1/G_A) = F \frac{8D^3N(G_A - G_M)}{d^4G_MG_A} \quad (3.6)$$

Tale formula come detto è valida nel caso di martensite in cui non avviene il fenomeno di detwinning e bassi valori di deformazione.

Modello inelastico

Il modello inelastico tiene conto non solamente della trasformazione in termini di variazione di rigidezza, ma considera anche le modifiche geometriche che la molla subisce oltre che, come detto, dal fenomeno di detwinning. Per tale studio si considerano dunque i cambiamenti che avvengono negli sforzi di taglio durante la trasformazione.

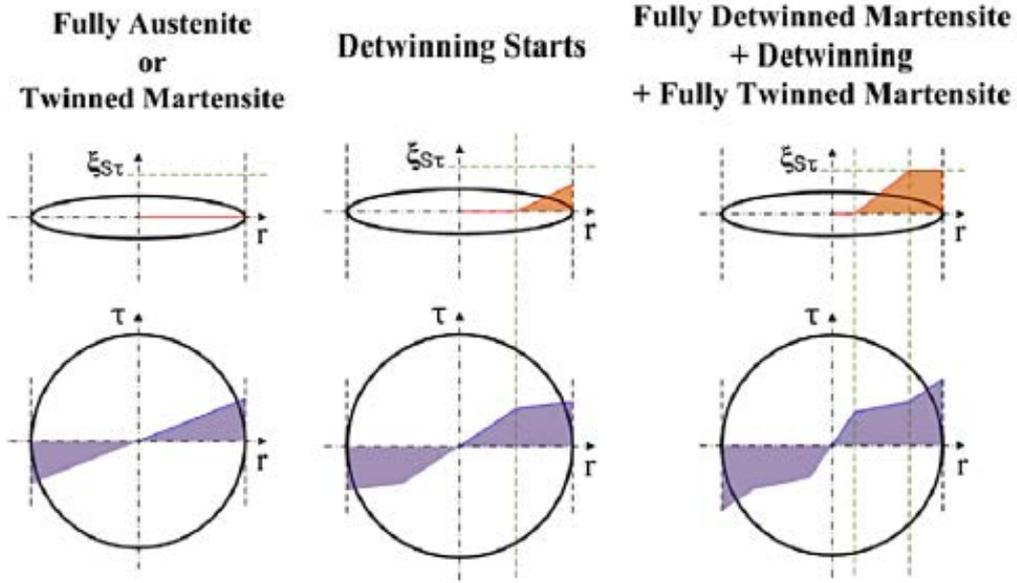


Fig. 3.21: Il cerchio di Von Mises nelle diverse configurazioni. A sinistra sforzi elastici nel caso di martensite twinned/austenite; al centro stress non lineari durante il fenomeno di detwinning e a destra stress per martensite completamente detwinned[1]

Osservando i cerchi di Von Mises (Figura 3.21) si nota come all' inizio del fenomeno di detwinning non vi è più la linearità degli sforzi e dunque non vi è neppure una variazione lineare del modulo di taglio.

Il modello costitutivo quindi deve tenere conto di questi fattori, perciò è stato definito un modello costitutivo che dipende da 3 fattori: gli sforzi, la frazione di martensite e la temperatura:[32]

$$\tau = Gd\gamma + \frac{\Omega}{\sqrt{3}}(d\xi) + \frac{\theta}{\sqrt{3}}dT \quad (3.7)$$

che, una volta integrata permette di definire gli sforzi rispetto all'istante iniziale:

$$\tau - \tau_0 = G(\gamma - \gamma_0) + \frac{\omega}{+} \sqrt{3}(\xi - \xi_0) \frac{\theta}{\sqrt{3}}(T - T_0) \quad (3.8)$$

Il modulo di taglio inoltre è definito in funzione della percentuale di martensite:

$$G = G^a + \xi(G^m - G^a) = \frac{D}{2[1 + [\nu^a + \xi(\nu^3 - \nu^a)]]} \quad (3.9)$$

Nelle tre formule sono stati definiti tre tensori D , θ e ω che definiscono rispettivamente i tensori di rigidezza, termoelasticità e trasformazione.

I tensori D e θ sono ottenuti dalla teoria classica e sono associati ai valori di elasticità e al coefficiente di espansione termica; il terzo tensore invece è definito considerando la trasformazione della martensite e come essa avviene[31]:

$$\omega = -DH^{cur}(\vartheta) \quad (3.10)$$

dove H^{cur} è il massimo sforzo di trasformazione per uno stress specifico.

Tale valore di H^{cur} si ottiene graficamente dal grafico sforzo/deformazione del processo, tracciando delle rette tangenti che identificano il modulo di elasticità rispettivamente di austenite e martensite.(Figura 3.22)

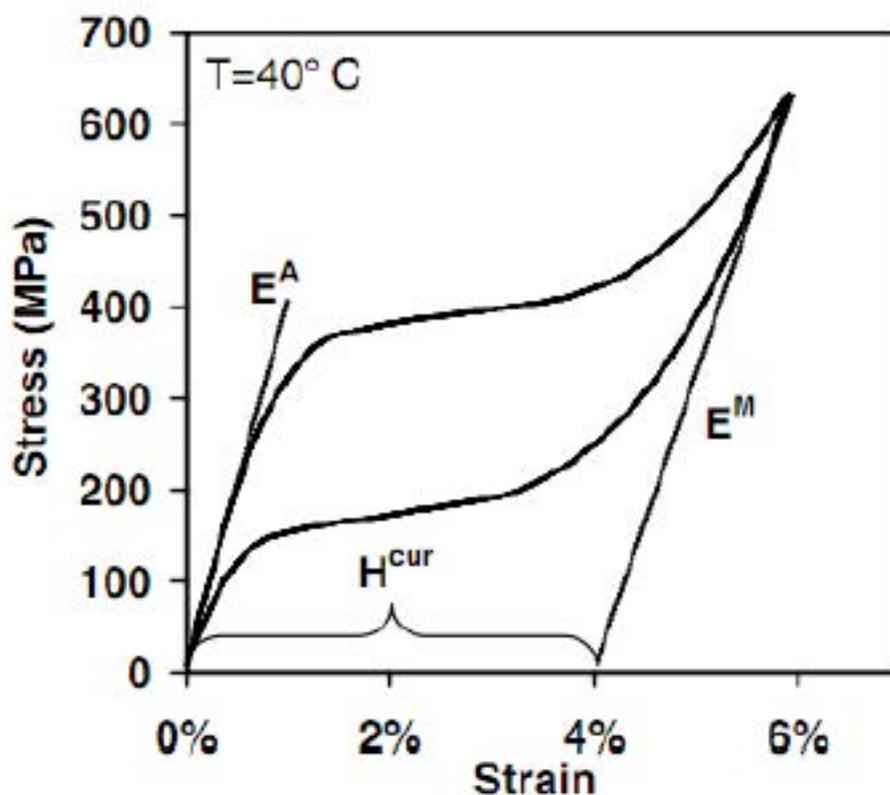


Fig. 3.22: Il grafico caratteristico forza deformazione permette di definire il valore di H^{cur}

Particolarmente rilevante è l'Equazione 3.9 che definisce come si modifica il modulo di taglio della trasformazione in funzione della frazione volumetrica di martensite ξ .

L'Equazione 3.8 poi consente di determinare il massimo sforzo di taglio, imponendo le condizioni iniziali pari a 0 per una trasformazione non ancora avvenuta e dunque:

$$\gamma_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{G} - \frac{\omega}{G\sqrt{3}}\xi - \frac{\theta}{G\sqrt{3}}T \quad (3.11)$$

Se si considera la formula classica che lega la deformazione e lo sforzo di taglio di una molla e si sostituisce l'Equazione 3.8 si ottiene

$$\delta = \frac{\pi D^2 N}{d} \gamma_{\max} = \frac{\pi D^2 N}{d} \left(\frac{\tau_{\max}}{G} - \frac{\omega}{G\sqrt{3}} \xi - \frac{\theta}{G\sqrt{3}} T \right) = \frac{\pi D_m^2 N}{d} \left(\frac{8FD_m}{G\pi d^3} - \frac{\omega}{G\sqrt{3}} \xi - \frac{\theta}{G\sqrt{3}} T \right) \quad (3.12)$$

Si ottiene dunque la formula di deformazione per una trasformazione completa:

$$\Delta\delta_{MA} = \frac{\pi D_m^2 N}{d} \left(\frac{8FD_m(G_A - G_M)}{\pi d^3 G_A G_M} + \frac{2(1 + \nu)H^c ur(\vartheta)}{\sqrt{3}} \right) \quad (3.13)$$

Se si confronta questa formula con il modello elastico si nota come vi sia la prima parte che coincide con il modello elastico, ma vi è una seconda parte che definisce il ritorno anelastico e dunque la deformazione finale è sempre maggiore rispetto a quella solamente elastica.

Tale formula però tiene solamente conto del fenomeno del detwinning della martensite ma non prende in considerazione il fatto che la molla per grandi deformazioni varia il suo diametro. (Figura 3.23)

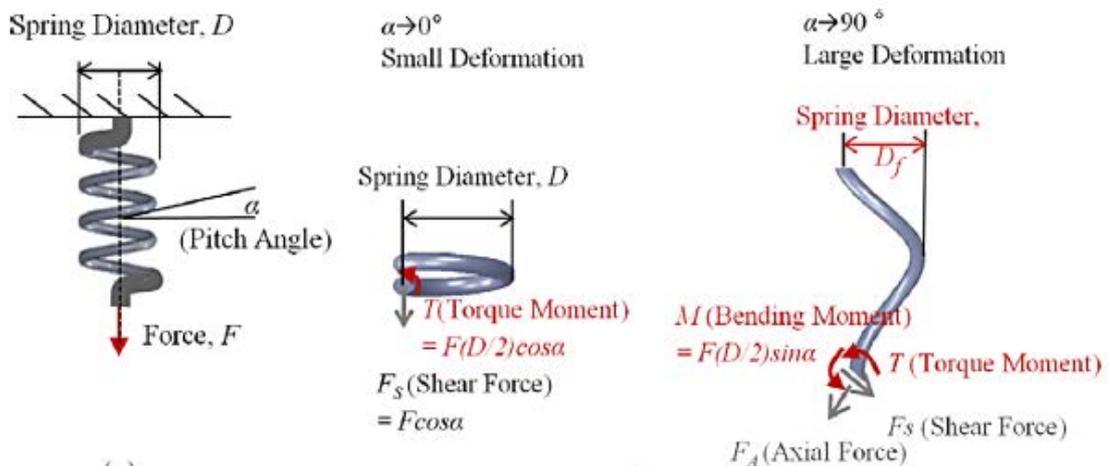


Fig. 3.23: Per grandi deformazioni il diametro della molla varia

Tale variazione ha ripercussioni sul reale funzionamento dell'SMA. Come si evince dalla Figura 3.24 si ha prima una deformazione lineare, seguita poi da un tratto in cui vi è il fenomeno di detwinning della martensite

e infine l'effetto dovuto alla riduzione di diametro della molla.

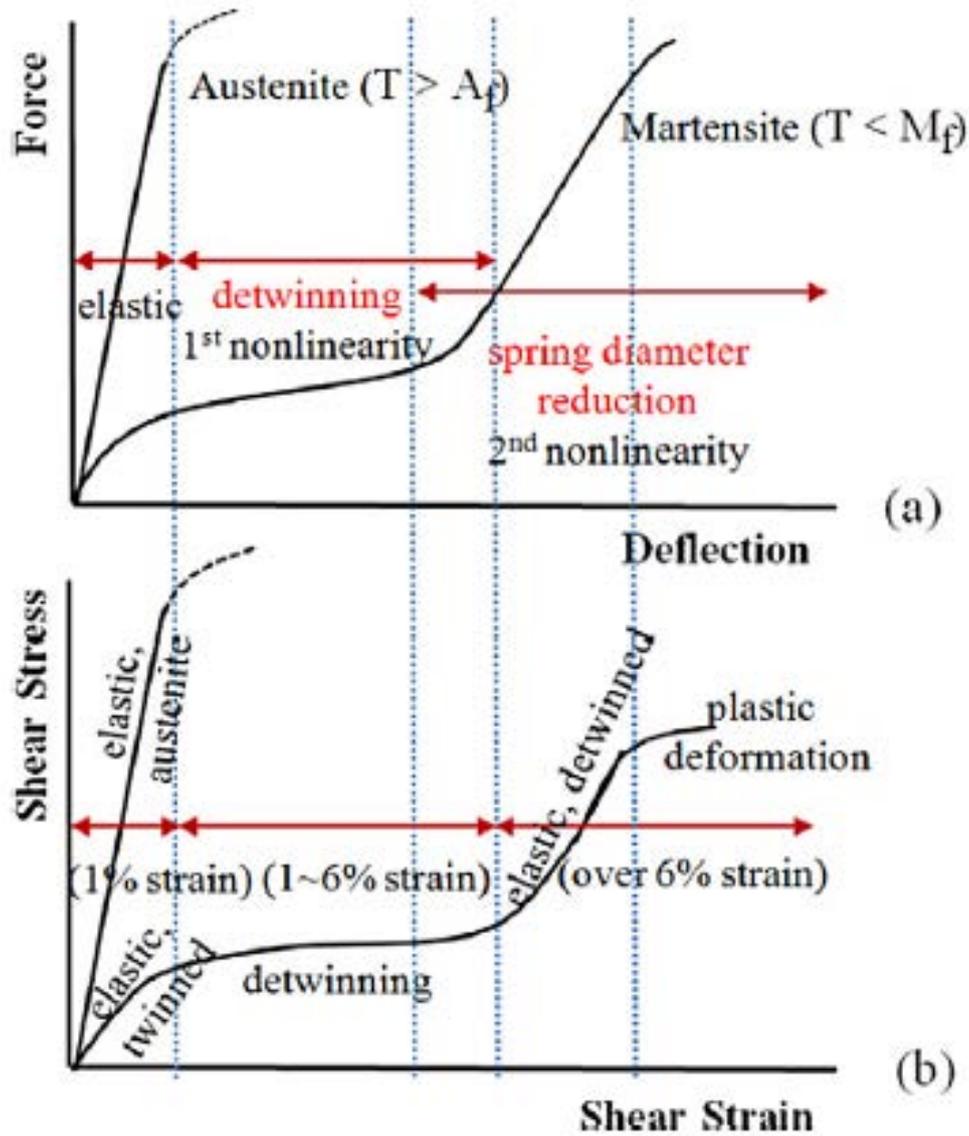


Fig. 3.24: Grafico che descrive la variazione del fenomeno a causa del detwinning e della variazione di diametro[1]

La formula che definisce il modello costitutivo sarà dunque la somma delle componenti di deformazione elastica, detwinning e variazione di diametro:

$$\Delta\delta_{MA} = \delta_d + \delta_l + \delta_A = \frac{\pi\gamma_d D_m^2 N}{d} + \frac{8FD_e^3 f f N}{G_M d^4} - \frac{8FD_m^2 N}{G_A d^4} \quad (3.14)$$

dove i vari elementi sono determinati rispettivamente dal fenomeno di detwinning, deformazione elastica e deflessione nella fase martensitica.

Con D_{eff} si è definito il diametro effettivo una volta avvenuta la trasformazione in martensite ed è ottenuto con:

$$D_{\text{eff}} = D_m \cos(\alpha) \quad (3.15)$$

Vi è però un ulteriore problema in quanto per valori di deformazioni alti il filo prende un andamento sinusoidale e dunque non è più possibile calcolare la deformazione in tale maniera.

C'è inoltre il problema che per larghe deformazioni si crea un momento che deve essere tenuto in considerazione per la definizione del modello.

Due stati

Per tenere in considerazione la variazione del momento si utilizza un' altra metodologia che permette di definire la deformazione a partire dalla variazione geometrica della spira e al detwinning della martensite.[1]

Tale metodologia riesce a simulare con buona approssimazione i grafici di completo stato austenitico e completo stato martensitico.

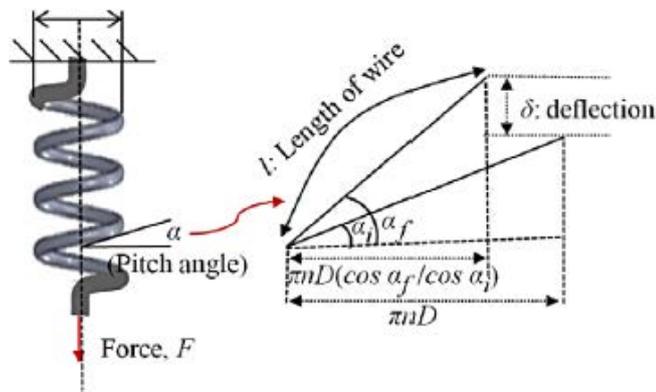


Fig. 3.25: variazione geometrica durante la deformazione[1]

Per una molla che ha subito una grande deformazione (Figura 3.25), si può ricavare il valore di elongazione in funzione della forza e dalla variazione di diametro, e dunque dalla differenza di geometria iniziale e finale, mediante la formula:

$$\delta = \frac{8FD_f^3N}{d^4 \cos \alpha_f} \left(\frac{\cos^2 \alpha_f}{g} + \frac{2 \sin^2 \alpha_f}{E} \right) \quad (3.16)$$

dove i pedici i ed f indicano i valori iniziali e finali degli angoli di pitch. Nel caso dell'SMA però si tratta di un materiale policristallino quindi si è sostituito il modulo di Young in funzione del modulo di taglio

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (3.17)$$

Si può però considerare la deformazione solo come funzione della variazione geometrica (Figura 3.25) e dunque:

$$\delta = \frac{\pi ND}{\cos(\alpha_i)} (\sin \alpha_f - \sin \alpha_i) \quad (3.18)$$

Introdotta l'Equazione 3.18 nell'Equazione 3.16 si può ottenere la relazione tra forza e angolo di pitch:

$$F = \frac{\pi d^4 G}{8D_i^2} \frac{\cos^2 \alpha_i (\sin \alpha_f - \sin \alpha_i)}{\cos^2 \alpha_f (\cos^2 \alpha_f + \sin^2 \alpha_f / (1 + \nu))} \quad (3.19)$$

Lo sforzo in una molla poi come visto si può esprimere mediante:

$$\tau = \frac{8CF}{\pi d^2} \quad (3.20)$$

e, una volta inserito il valore di forza calcolato dall'Equazione 3.19, si ha:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{\cos^2 \alpha_i (\sin \alpha_f - \sin \alpha_i)}{C \cos^2 \alpha_f (\cos^2 \alpha_f + \sin^2 \alpha_f / (1 + \nu))} \quad (3.21)$$

L'Equazione 3.21 però è valida solamente quando si è in presenza di sola austenite e non si è considerata la trasformazione.

Nel caso di bassa temperatura e durante la trasformazione in martensite si deve quindi tenere in considerazione l'effetto di detwinning della martensite e la formula per il calcolo dello sforzo diviene:

$$\tau = G_M \gamma - (G_M \gamma_L) \xi_S \quad (3.22)$$

In cui ξ è la frazione volumetrica di martensite detwinned rispetto al totale volume di martensite all'interno dell'SMA.

Inserendo il valore di γ ottenuto dall' Equazione 3.18 e considerando di risolvere per la forza si ottengono le seguenti formule:

$$F = \frac{G_A d^4 \cos^3 \alpha_i}{8D^3 N (\cos^2 \alpha_f (\cos^2 \alpha_f + \sin^2 \alpha_f / (1 + \nu)))} \delta \quad (3.23)$$

nel caso di 100% austenite e

$$F = \frac{G_M d^4 \cos^3 \alpha_i}{8D^3 N (\cos^2 \alpha_f (\cos^2 \alpha_f + \sin^2 \alpha_f / (1 + \nu)))} \delta - \frac{\pi d^3}{8D} G_M \gamma_L \xi_S \quad (3.24)$$

nel caso di 100% martensite.

Nella formula precedente ξ_S è la frazione di martensite di tipo detwinned che si ottiene a seguito della forza ed è calcolata mediante la formula:

$$\xi_S = 0.5 \cos \left[\frac{\pi (\tau - \tau_{cr_f})}{\tau_{cr_s} - \tau_{cr_f}} \right] + 0.5 \quad (3.25)$$

dove τ_{cr_s} e τ_{cr_f} definiscono gli sforzi di inizio e fine deformazione di martensite di tipo detwinned.

Se non si considerano i momenti e la variazione di diametro i termini interni alla parentesi divengono uguali ad uno; se si considera poi solo la parte elastica della martensite e dunque eliminando il secondo termine si ottengono due formule semplici che corrispondono all'Equazione 3.5.

La deformazione totale allora è uguale a:

$$\delta_{\max} = \delta_M - \delta_A$$

Nella Figura 3.26 sono plottate le curve che legano forza e deformazione per completa austenite e completa martensite.

Nella Figura 3.27 sono invece confrontati i risultati teorici con quelli sperimentali.

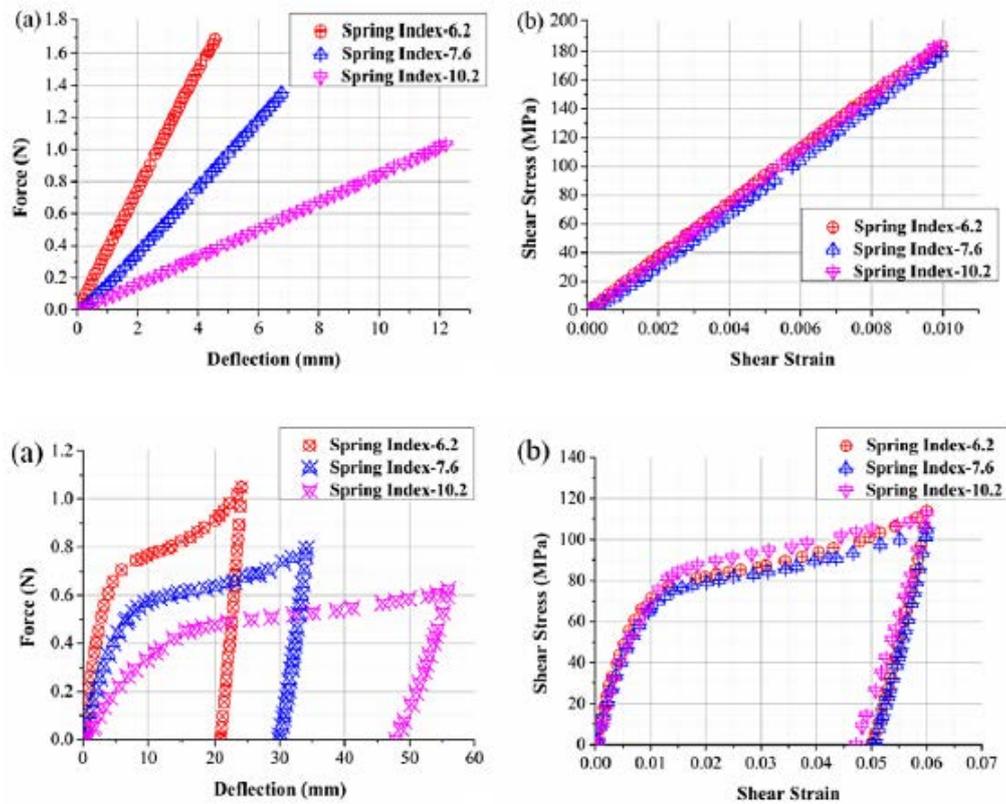


Fig. 3.26: grafici sperimentali per A_{100%}(sopra) e M_{100%}(sotto)[1]

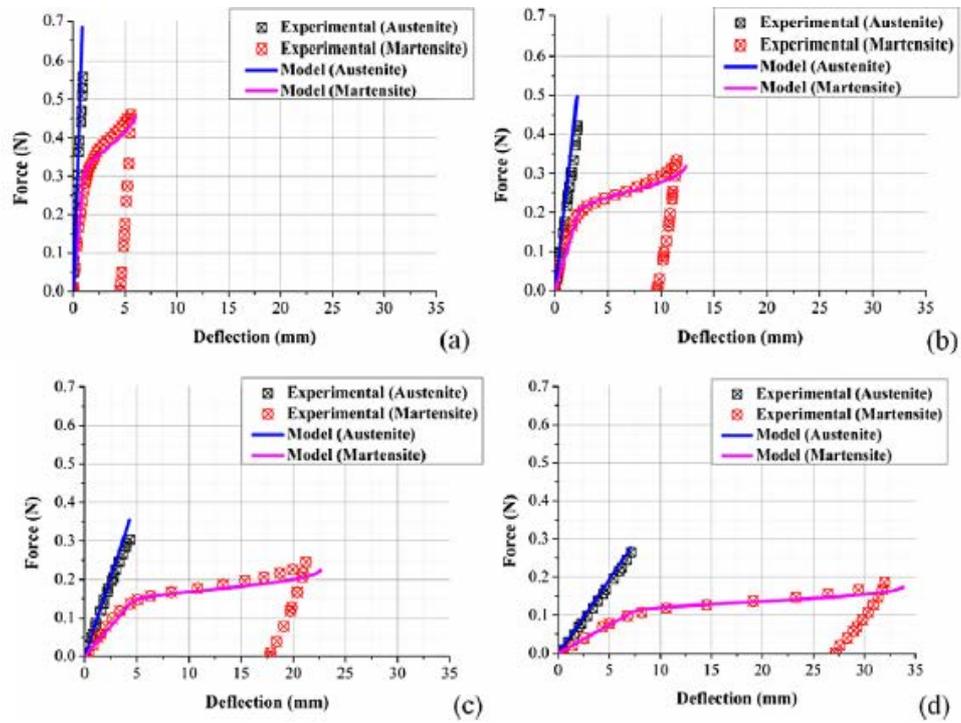


Fig. 3.27: Confronti tra risultati teorici e sperimentali di $A_{100\%}$ e $M_{100\%}$ [1]

Determinato il modello meccanico si possono ricavare le caratteristiche geometriche inserendo come parametri iniziali la forza e la deformazione desiderata.

3.2.3 Modello termico

Descritto il modello meccanico si deve definire un modello termico di applicazione del sistema.[31][24]

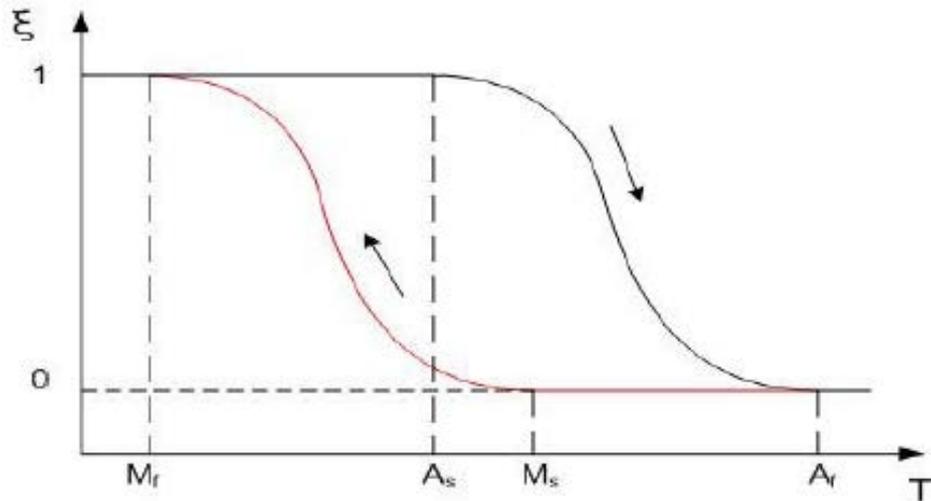


Fig. 3.28: Variazione di indice volumetrico ξ in funzione della temperatura

Durante l'utilizzo come detto vi sono 4 temperature critiche che segnano l'inizio e la fine della trasformazione da austenite a martensite e viceversa. (Figura 3.28)

Gli shaper memory actuator hanno temperature di transizioni molto inferiori a quelle dei metalli classici in modo da riuscire ad effettuare le transizioni di calore in maniera molto semplice.

Le trasformazioni quindi avvengono tramite assorbimento di calore per la trasformazione da austenite a martensite, mentre per la trasformazione tra martensite ad austenite, tramite rilascio di calore.

Questi calori possono essere identificati all'interno di un calorimetro differenziale (Figura 3.29): esso consiste in un macchinario che permette di definire il calore necessario alle trasformazioni.

La misurazione viene effettuata scaldando in egual modo un campione di SMA ed un campione di riferimento, la differenza di energia necessaria ad aumentare la temperatura definisce i parametri termici del campione.

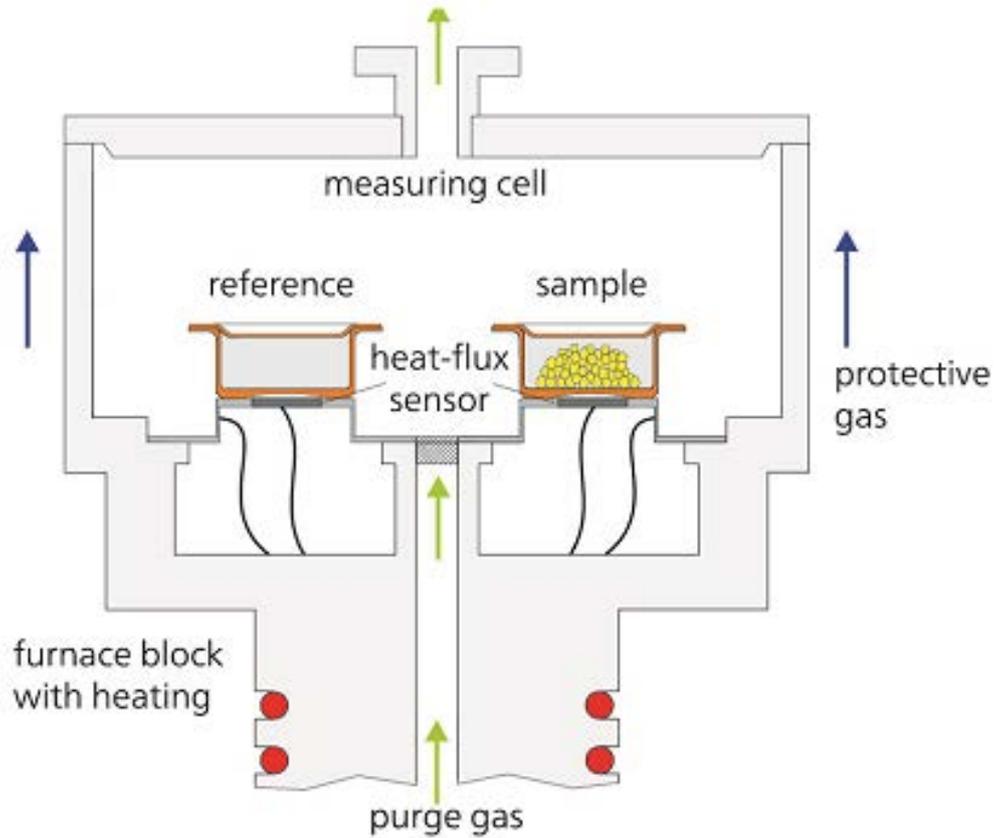


Fig. 3.29: Esempio di calorimetro differenziale. Immagine tratta da <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/it/prodotti-soluzioni/calorimetria-differenziale-a-scansione/dsc-214-polyma/>

Durante la trasformazione tra austenite e martensite il campione necessita di un trasferimento di calore maggiore rispetto a quello del campione di riferimento, che si identifica con un aumento di potenza necessaria all'aumento di temperatura.

In Figura 3.30 è illustrato il grafico finale ottenuto dall'analisi del calorimetro differenziale.

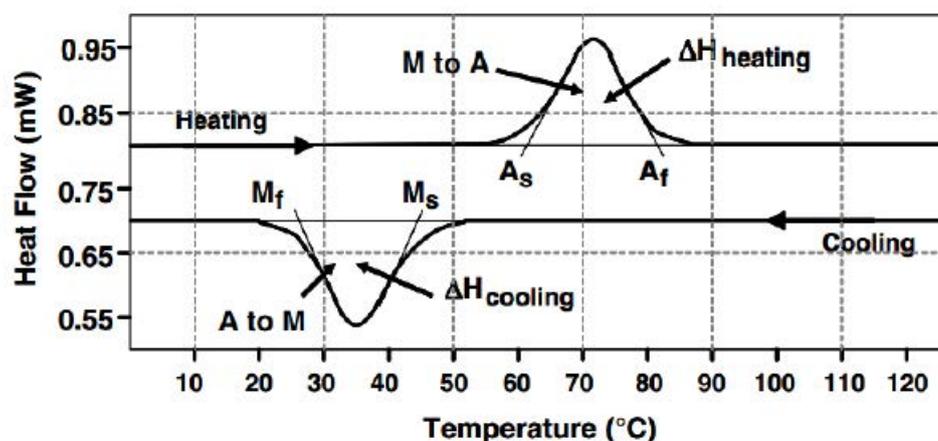


Fig. 3.30: Curva ottenuta dal calorimetro differenziale per un ciclo di aumento/diminuzione di temperatura per un SMA[31]

Inserendo in un grafico la variazione di potenza necessaria si riesce a definire il calore necessario per la trasformazione mentre le rette tangenti permettono di definire le temperature di transizione.

Ora rimane da definire la maniera nella quale tale calore riesce ad essere somministrato al sistema.

Solitamente vi sono due metodologie che consentono all'SMA di riuscire ad immagazzinare energia: il primo metodo classico è soffiare aria calda nell'ambiente circostante all'SMA e successivamente tramite convezione si ha un aumento di temperatura del sistema.

La seconda metodologia che è più caratteristica di questo tipo di attuatori, è l'aumento di temperatura mediante resistenza elettrica.

Tale metodo è caratteristico di SMA a filo poichè si riesce a controllare in maniera accurata l'aumento di temperatura grazie solamente a un controllo di corrente.

Per un filo si riesce a definire un modello termico accurato che consenta di tenere conto della corrente immessa al fine di ricavare il tempo necessario all'aumento di temperatura.

Per definire il modello termico si inizia con l'ipotesi che l'energia totale si conserva e dunque il bilancio energetico è pari a:

$$E_{st} = E_{in} - E_{out} + E_g \quad (3.26)$$

L'energia in ingresso è considerata energia ottenuta tramite effetto joule, energia che si ottiene quando in un materiale scorre della corrente; tale energia è pari a:

$$E_g = RI^2 = I^2 R' L \quad (3.27)$$

dove R ed R' sono rispettivamente la resistenza e la resistenza per unità di lunghezza, mentre I è la corrente che scorre all'interno del filo.

Per quanto riguarda l'energia in uscita si deve considerare sia convezione sia irraggiamento; poichè si considerano temperature inferiori ai 100 °C l'effetto dell'irraggiamento è trascurato.

Si può così definire il valore di energia in uscita pari solamente all'effetto della convezione e dunque:

$$E_{\text{out}} = hA(T(t) - T_{\text{amb}}) \quad (3.28)$$

dove h è la conducibilità termica e A l'area dell' SMA.

L'energia del sistema viene definita dalla definizione di calore all'interno del sistema:

$$E_s t = \rho V C_p \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad (3.29)$$

sostituite nell'Equazione 3.26 di equilibrio il bilancio termico è pari a:

$$\rho V C_p \left(\frac{dT}{dt} \right) = I^2 R' L - hA(T(t) - T_{\text{amb}}) \quad (3.30)$$

questa equazione differenziale deve essere integrata tra due istanti temporali che consentono di passare da T1 a T2, che coincidono con le temperature caratteristiche di inizio e fine trasformazione.

La formula differenziale può essere dunque utilizzata sia per ottenere il valore di calore nel caso di trasformazione da austenite a martensite e dunque

innalzamento di temperatura, sia nel caso di trasformazione da martensite ad austenite e quindi raffreddamento.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{I^2 R - hA(T(t) - T_{\text{amb}})}{\rho V C_p} \quad (3.31)$$

Per ottenere il tempo necessario all' aumento o alla diminuzione della temperatura la formula diviene:

$$dt = \rho V C_p \frac{dT}{I^2 R - hA(T - T_{\text{amb}})} \quad (3.32)$$

che viene integrata tra le due temperature di transizione T1 e T2.

$$\int_0^{\Delta t} dt = \int_{T_1}^{T_2} \rho V C_p \frac{dT}{I^2 R - hA(T - T_{\text{amb}})} \quad (3.33)$$

$$\int_0^{\Delta t} dt = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\frac{-\rho V C_p dT}{hA}}{T - \left(\frac{I^2 R}{hA} + T_{\text{amb}}\right)} \quad (3.34)$$

e si ottiene la differenza di tempo pari a :

$$\Delta t = \frac{-\rho V C_p}{hA} \ln \frac{T_2 - \left(\frac{I^2 R}{hA} + T_{\text{amb}}\right)}{T_1 - \left(\frac{I^2 R}{hA} + T_{\text{amb}}\right)} \quad (3.35)$$

L'Equazione 3.35 quindi permette di definire per una data corrente, il tempo richiesto affinché avvenga la trasformazione.

In tale formula però si è definito il C_p costante; non si è esaminata la trasformazione di fase tra martensite ed austenite.

La variazione di fase deve essere considerata poichè varia la quantità del calore del sistema. Allo stesso tempo tale modifica di fase influisce anche sul calore poichè una trasformazione avviene per assorbimento di calore mentre

una per rilascio di calore.

Per tenere conto di tale trasformazione sono stati definiti due calori specifici differenti per le due fasi che sono la media del calore specifico di ogni singola fase a cui è stata aggiunta l'entalpia della trasformazione divisa per l'intervallo di temperatura di trasformazione; i calori specifici sono allora così definiti:

$$C_{MA} = \frac{C_A + C_M}{2} + \frac{X_{ma}}{A_f - A_s} \quad (3.36)$$

$$C_{AM} = \frac{C_A + C_M}{2} + \frac{X_{am}}{M_s - M_f} \quad (3.37)$$

Si nota come tale formulazione consente anche di definire il fatto che la trasformazione è endotermica oppure esotermica grazie al segno di entalpia: se la trasformazione avviene da martensite ad austenite l'entalpia avrà segno positivo, per trasformazione da austenite a martensite l'entalpia ha segno negativo.

Con tale convenzione di segni sia C_{MA} e C_{AM} risultano positive.

Sostituendo (3.36) e (3.37) all'interno dell'Equazione 3.35 si ottengono le formule che permettono di definire il tempo affinché avvenga la trasformazione:

$$\Delta t_{MA} = \frac{-\rho V C_{MA}}{hA} \ln \frac{A_f - \left(\frac{I^2 R}{hA} + T_{amb}\right)}{A_s - \left(\frac{I^2 R}{hA} + T_{amb}\right)} \quad (3.38)$$

Nel caso di trasformazione da martensite ad austenite.

Per quanto riguarda il tempo necessario affinché avvenga il passaggio da austenite a martensite la formula si semplifica se si considera che non vi è più passaggio di corrente e la formula diviene:

$$\Delta t_{AM} = \frac{-\rho V C_{AM}}{hA} \ln \frac{M_f - T_{amb}}{M_s - T_{amb}} \quad (3.39)$$

Grazie a queste formulazioni si riescono ad ottenere gli istanti temporali necessari a passare da una temperatura T_1 ad una T_2 considerando anche la variazione di fase.

3.2.4 Attuatore

Rimane dunque da definire la configurazione che consente l'utilizzo degli SMA come attuatori.

Come detto solitamente un SMA passa da austenite a twinned martensite e per riuscire ad ottenere la martensite in forma detwinned è necessario applicare una forza.

Vi sono solitamente 3 configurazioni che consentono di definire la forza in modo da ottenere la configurazione di martensite detwinned. (Figura 3.31)

1. Massa attaccata all'SMA
2. Molla attaccata all'SMA
3. Doppio SMA.

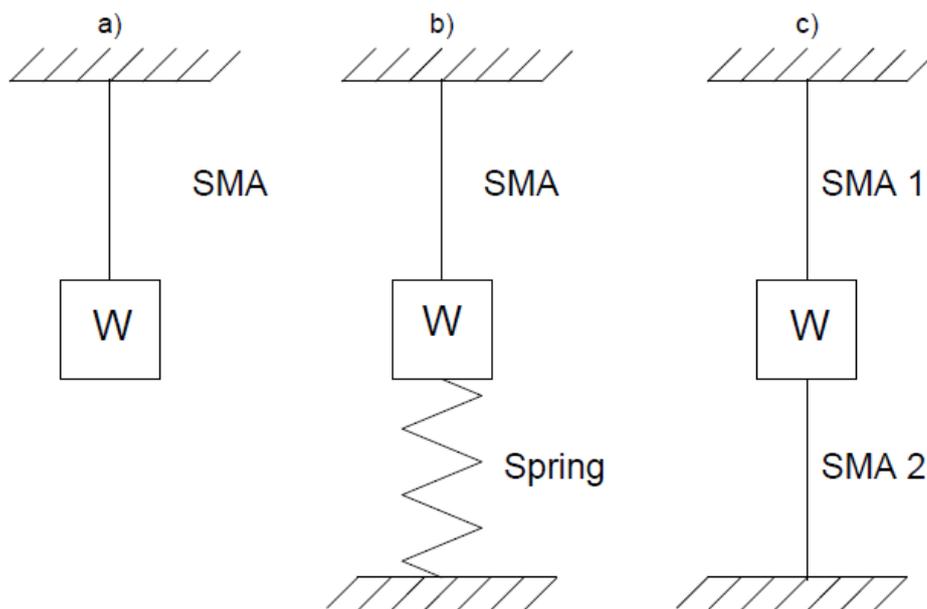


Fig. 3.31: 3 principali configurazioni per ottenere la bias force per l'ottenimento di detwinning martensite per l'utilizzo dell'SMA[31]

Mediante queste tre configurazioni si riesce ad ottenere martensite di tipo detwinning; la forza necessaria per ottenere la configurazione detwinning si chiama bias force.

La bias force è la forza che l'SMA esercita per ottenere la deformazione voluta.

Definito il modello meccanico, termico e definito il tipo di configurazione per ottenere l'attuatore, si possono quindi definire le caratteristiche geometriche dell'SMA e il tempo di attuazione di tale sistema.

Ora che sono definite l'SMA e le sue capacità, possiamo definire il tipo di attuatore che si vuole realizzare.

4. BEND PROPAGATION ACTUATOR

Come detto nei capitoli precedenti le foglie della pianta carnivora Venus Fly-trap riescono a passare da una configurazione a curvatura concava ad una a curvatura convessa per mezzo di una pressione.

Si vuole sfruttare tale metodologia per lo sviluppo di una tipologia di attuatore per il displacement che utilizzi una metodologia analoga.

Prendendo in esempio la foglia si vuole dunque ottenere una superficie che sia in grado di variare la propria curvatura.

Le superfici che mostrano un comportamento simile alla foglia sono ritrovate nella categoria definita "developable surface".

4.1 *Superfici isometriche*

Con il termine "superficie isometrica" si definisce una tipologia di superficie definito dal teorema egregio di Gauss o teorema fondamentale delle superfici. Tale teorema afferma che la curvatura Gaussiana è una caratteristica intrinseca delle superfici che è preservata se si piega la superficie senza deformarla.

Più propriamente un punto in una superficie è caratterizzato da due distinti valori di curvatura dette curvature principali: tali curvature corrispondono al massimo e al minimo della curvatura di una curva passante per la superficie in quel punto; essi corrispondono alle curve contenute nei piani tangenti e normali della superficie.

In sezione 4.1 sono illustrati i due piani che permettono di determinare le curve che consentono di identificare la curvatura della superficie.

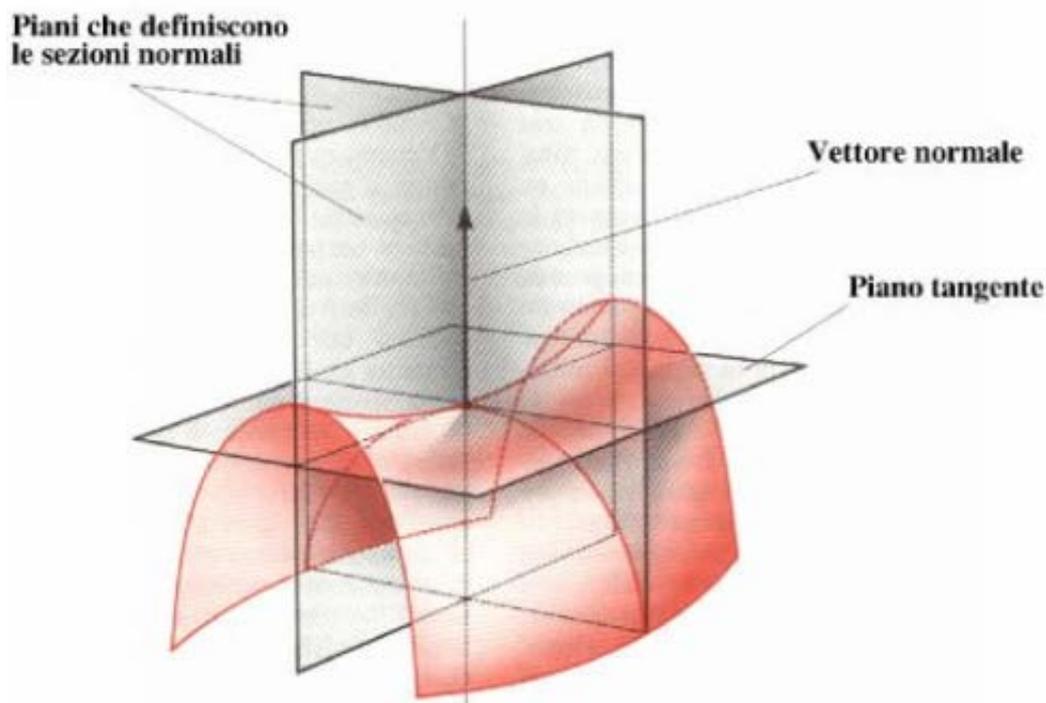


Fig. 4.1: Piano tangente e normale che consente di determinare la curvatura di una superficie. Immagine tratta da https://it.wikipedia.org/wiki/Curvatura_principale

Il prodotto tra le due curvature è definito curvatura di Gauss o Gaussiana; le superfici definite developable surface hanno curvatura di Gauss uguale a 0.

Come espresso dal teorema questa curvatura è intrinseca ad ogni superficie e permette di definire superfici isometriche; in altre parole una superficie con curvatura gaussiana non può essere deformata in una superficie dalla curvatura gaussiana diversa da quella iniziale, se non tramite deformazioni non isometriche.

Un esempio pratico dell'enunciato del teorema è raffrontare una sfera ad un piano: una sfera, dotata dunque di un certo valore di curvatura, non si potrà mai ricondurre ad un piano (curvatura nulla) mediante delle semplici deformazioni.

Ecco allora che il valore della curvatura di Gauss K permette di definire il tipo di superficie (Figura 4.2):

1. se $K > 0$ si ha una sfera infatti le due curvature normali ad un punto hanno entrambe valore positivo e dunque prodotto positivo

2. se $K < 0$ si ha un' iperbole infatti le due curvature normali hanno entrambe valore negativo e dunque prodotto negativo
3. se $k=0$ si è in presenza di una superficie piana od un cilindro infatti una delle due curvature normali è pari a 0 e dunque il prodotto sarà sempre uguale a 0.

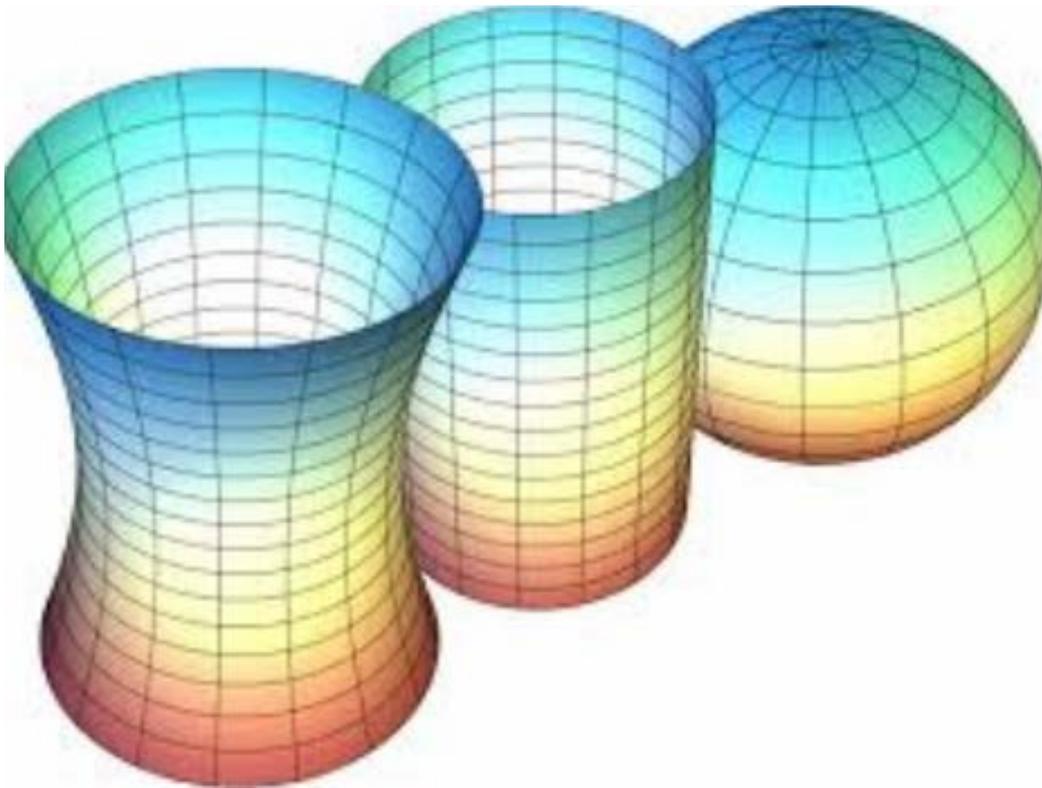


Fig. 4.2: Superfici dalla diversa curvatura di Gauss: iperbole $K < 0$, cilindro $K = 0$, sfera $K > 0$. Immagine tratta da https://it.wikipedia.org/wiki/Curvatura_gaussiana

Superfici che hanno almeno una delle due curvature pari a 0 si definiscono developable surface.

Superfici dalla curvatura gaussiana uguale a 0 sono quindi deformabili in superfici dalla curvatura primaria e secondaria differente.

In altre parole è possibile passare da superfici caratterizzate da curvatura normale pari a 0 a superfici dalla curvatura tangente pari a 0.

Superfici con questa caratteristica sono quindi modificabili perchè si può in qualche modo passare da una configurazione ad un'altra, mentre non è

possibile per superfici dalla curvatura gaussiana diversa da 0; si pensi ad esempio ad una sfera che anche se viene sottoposta a delle deformazioni isometriche non porterà mai ad ottenere una configurazione diversa da quella di partenza; in altre parole una sfera rimarrà sempre una sfera.

Tra le varie geometrie di superfici dotate di curvatura gaussiana e che dunque rientrano nella categoria di developable structure, si è scelto di utilizzare una superficie di porzione cilindrica, simile a quella utilizzata nei tape sping, essa infatti consente una miglior gestione del cambio di curvatura.

La capacità di questa tipologia di superfici è dunque associata al cambio di curvatura che la foglia della Venus Flytrap riesce ad effettuare.

Come detto la foglia sfrutta il gradiente idraulico per ottenere un aumento di energia e successivo snap in grado di cambiare la curvatura; nel nostro caso però non si vuole avere la pressione poichè difficile da gestire e si è scelto di utilizzare attuatori termicamente attivati, gli SMA.

Se la scelta del tipo di attuatore è risultata dunque facile, non altrettanto immediato è il posizionamento per l'utilizzo poichè, nel nostro caso, si ha la necessità di avere il dispiegamento di superfici dalla grande curvatura, che passano cioè da una configurazione dall'angolo sotteso molto elevato ad una configurazione di curvatura nulla. [17][16]

C'è da dire che delle strutture dalla forma analoga che sfruttano l'SMA per variare la curvatura sono spesso utilizzate.

Come si vede dalla Figura 4.3 l'attuatore SMA è applicato al centro della struttura.

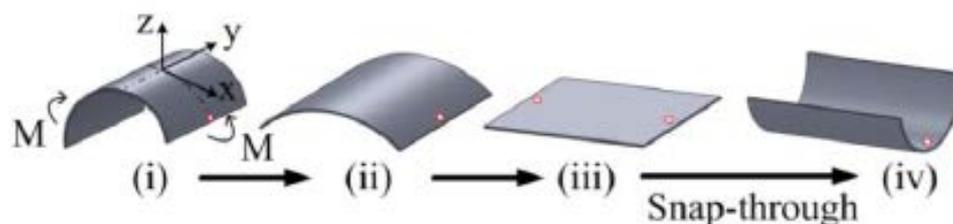


Fig. 4.3: Posizionamento tipico di attuatori SMA per il dispiegamento.[17]

Tale metodologia però non è adeguata al nostro utilizzo poichè questo tipo di attuatore, se utilizzato per grandi angoli, porta a delle instabilità a causa della grande superficie di piegatura che deve essere azzerata; si formano dunque delle pieghe che deformano la superficie in maniera differente da quella voluta.[16]

Tali problemi possono però essere risolti mediante l'aggiunta di diversi attuatori SMA paralleli al primo in modo da definire una corretta curvatura

finale; il metodo però con l'aggiunta di molti SMA rende il sistema complicato. (Figura 4.4)

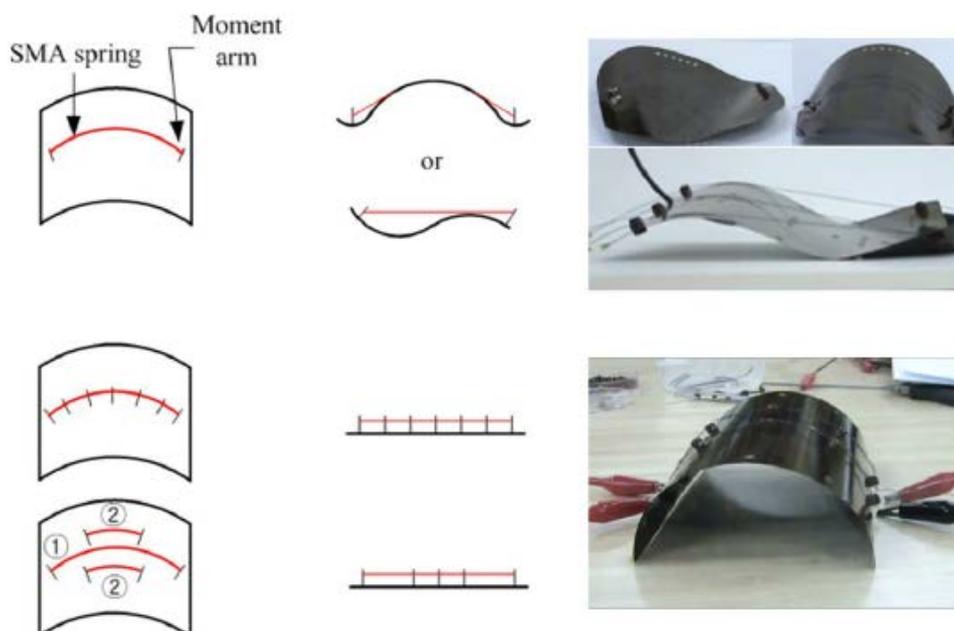


Fig. 4.4: Difetti e instabilità dovute all'utilizzo di BPA.[16]

come si può dunque ottenere il deployment della struttura?

4.2 Posizionamento dell'attuatore

Come si è visto, posizionare l'SMA al centro della superficie porta allo sviluppo di instabilità, dunque si ha la necessità di cambiare la metodologia.

La maniera più semplice per modificare la metodologia è riuscire ad avere lo snap, sempre sfruttando gli SMA ma, a differenza del metodo classico in cui sono posizionati al centro della superficie, questi devono essere posizionati in maniera differente.

Dove si può quindi posizionare l'attuatore in maniera da avere un deployment di una struttura?

La risposta a questa domanda si ritrova in una situazione quotidiana: quando si prende in mano una fetta di pizza viene naturale piegarla all'estremità per prevenire che questa ricada; tale fenomeno che all'apparenza è così semplice si basa tuttavia sul teorema egregio di Gauss, e dunque sul concetto di

developable surface, ed è la risposta alle nostre necessità.

Un tipo di attuazione che sfrutta questa metodologia prende il nome di "bend propagation actuation".

Questa tipologia di attuatore, al contrario della situazione classica che si basa su uno SMA posizionato al centro della superficie, utilizza gli attuatori alle estremità consentendo dunque il fenomeno dello snap tramite una propagazione di momento a partire dalle estremità.

Una volta definita la proprietà della developable surface si è dunque in grado di definire lo scopo ultimo dell' utilizzo del BPA: tale tipologia di deployment infatti sfrutta la capacità di una superficie di variare la propria forma sempre mantenendo la curvatura di Gauss pari a 0.

Utilizzando tale proprietà si ottiene quindi un attuatore capace, partendo da una superficie dotata di curvatura di Gauss pari a 0, definita sul piano longitudinale o trasversale, di ottenere una superficie dotata ancora una volta da una curvatura di Gauss pari a 0; tale nuova superficie avrà però curvatura pari a 0 sul piano opposto a quello iniziale.

In altre parole se si definiscono curvatura primaria e secondaria le due curvature che permettono di definire la curvatura di Gauss, se nella superficie iniziale si ha una curvatura primaria pari a 0, una volta conclusa l'attuazione dell'SMA si ottiene una superficie dotata di curvatura secondaria pari a 0, e dunque il prodotto delle due è sempre pari a 0 e quindi rimangono entrambe developable surface.

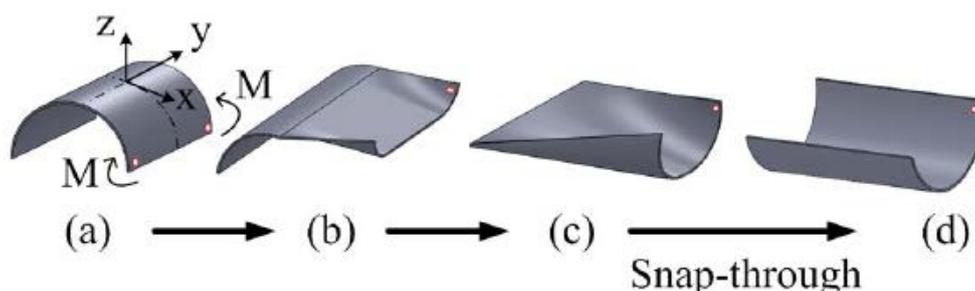


Fig. 4.5: Negli attuatori MPA gli SMA sono posizionati ad una estremità della struttura.[17]

Nella figura Figura 4.5 è illustrato il fenomeno dello snap che si ottiene quando l'SMA è applicato all'estremità della superficie: tramite l'applicazione dell'attuatore all'estremità si viene ad avere un avvicinamento dei due angoli della superficie e quindi si ha l'applicazione di un momento.

Tra il punto (c) e (d) si ha il fenomeno dello snap fino all'ottenimento di una superficie dalla curvatura differente rispetto a quella iniziale.

Vi sono però ancora questioni aperte, ad esempio quali caratteristiche deve avere la superficie per riuscire a soddisfare le condizioni?

Tale tipologia di attuatore non ha alla base delle formule teoriche a causa della complessità del fenomeno ma vi sono solo dei risultati sperimentali.

Perciò in questo studio sono stati definiti diversi modelli agli elementi finiti con lo scopo di simulare tale tipologia di attuatore e di definire le caratteristiche di tale metodologia di deployment.

L'analisi ad elementi finiti è stata effettuata tramite il solutore MSC Nastran Student Edition.

4.3 *Modello agli elementi finiti*

Definita la metodologia che si vuole seguire per ottenere la tipologia di snap si vuole definire il modello capace di simulare tale fenomeno.

Il modello deve essere in grado di simulare l'effetto ottenuto tramite l'applicazione di un SMA con conseguente modifica della geometria.

Prima di definire una dettagliata spiegazione sulla creazione dei modelli e sulle analisi effettuate si fa presente come, dopo l'utilizzo dell'attuatore la curvatura iniziale sia pari a 0 mentre quella secondaria che viene a formarsi è diversa da zero, ma fino ad ora non sono state fornite indicazioni sul segno della curvatura, questo perchè a seconda della posizione dell'attuatore si possono ottenere due configurazioni differenti, entrambe prese in considerazione.

4.3.1 *Geometria*

Il modello che si vuole realizzare parte da delle configurazioni di superfici definite da un valore di curvatura, e dunque di angolo sotteso, ben definite che poi divengono 0 dopo l'applicazione dell'attuatore SMA.

Per utilizzo pratico è definita una curvatura con angolo sotteso di 90° , in modo che realizzi il dispiegamento di due elementi disposti in maniera perpendicolare tra loro.

Sono inoltre stati aggiunti altri due modelli caratterizzati da angoli sottesi pari a 60° e 180° in modo da verificare la bontà del metodo di attuazione e per ottenere ulteriori valori di comparazione.

Per quanto riguarda le dimensioni geometriche è stata scelta una superficie di riferimento di dimensioni pari a 0.1 [m] per ogni lato e dunque di pianta quadrata.

<i>angolo</i> [°]	<i>raggio</i> [m]	<i>curvatura</i> [1/m]
60	0.0954	10.471
90	0.0636	15.70
180	0.0318	31.41

Tab. 4.1: Tabella che definisce i valori di raggio necessari ad ottenere gli angoli sottesi adatti

E' stata scelta una superficie quadrata poichè, come vedremo in seguito, la propagazione del momento dovuta all'applicazione dell'SMA è influenzata dalle lunghezze dei lati.

In un secondo momento sono poi stati implementati modelli dalla diversa forma e dalle differenti dimensioni geometriche per definire in maniera appropriata le differenze di carichi nelle diverse situazioni e verificare la fattibilità in caso di tali variazioni.

Partendo da queste ipotesi sono stati definiti i 3 modelli iniziali che, come detto, si compongono di superfici che sottendono angoli di valori 60°/90° e 180° e di lunghezza pari a 0.1 [m].

Per la creazione della curva si è utilizzato il comando Arcangles con punto centrale definito all' origine [0 0 0]; per utilizzare tale comando è stato però necessario definire un valore di raggio appropriato, in maniera che la curva così ottenuta garantisca un angolo sotteso desiderato ed un valore di lunghezza pari a 0.1 [m].

Tale valore di raggio viene ottenuto mediante una semplice corrispondenza tra l'angolo voluto e la lunghezza finale desiderata mediante una proporzione:

$$2\pi R : 0.1 = 360 : \alpha \quad (4.1)$$

che consente di definire un valore di raggio e di conseguenza di curvatura elencati in Tabella 4.1

In tale maniera si è definita una superficie dai lati di uguale valore e dall'angolo sotteso voluto.

In Figura 4.6,4.7 e 4.8 sono illustrate le curve finali rispettivamente per 60°, 90° e 180 °.

Una volta ottenute queste curve è possibile ricavare la superficie voluta semplicemente estrudendo la curva per un valore di estrusione pari a 0.1 [m], in modo da definire la superficie quadrata.

E' poi stata attribuita la proprietà alla struttura: per questa tipologia di analisi è stata utilizzata la proprietà shell capace di rilevare tutti gli sforzi agenti su di esso, ed è stato definito lo spessore pari a 0.1 [mm].

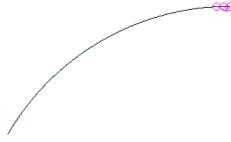


Fig. 4.6: curva ottenuta considerando un angolo sotteso di 60°

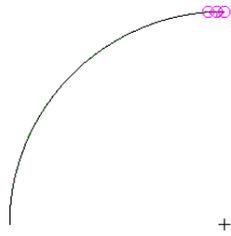


Fig. 4.7: curva ottenuta considerando un angolo sotteso di 90°

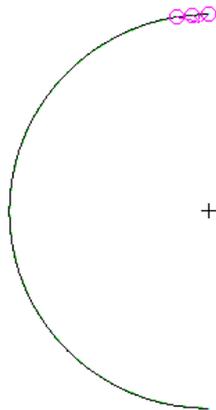


Fig. 4.8: curva ottenuta considerando un angolo sotteso di 180°

4.3.2 *Materiale*

Per il tipo di simulazione è stato scelto un materiale metallico.

Era stato preso in considerazione l'utilizzo di un materiale composito ma per lo studio iniziale si è preferito utilizzare un materiale metallico, in modo da avere meno problematiche per quanto riguarda la rottura.

Per il materiale è stata scelta una lamina di berillio-rame (BeCu)[13].

Per quanto riguarda la fabbricazione del materiale, è possibile ottenere una lamina dalla curvatura desiderata mediante un processo di rullatura e stiratura.

In Figura 4.9 è illustrato il prodotto finito del processo di rullatura.



Fig. 4.9: Lamina di BeCu dotata di una curvatura.[13]

A causa del processo produttivo però le caratteristiche del materiale sono modificate e nel materiale insorge una anisotropia, che deve essere tenuta in considerazione nella scelta delle proprietà durante la simulazione.

In Figura 4.10 sono illustrate le prove di trazione del materiale dopo la lavorazione.

Direzione	$E[GPa]$	$\sigma_s[MPa]$	ν
Orizzontale	128.5	605	0.3
Verticale	116.4	624	0.3
Media	122.45	614.5	0.3

Tab. 4.2: Tabella che definisce le proprietà del materiale.[3]

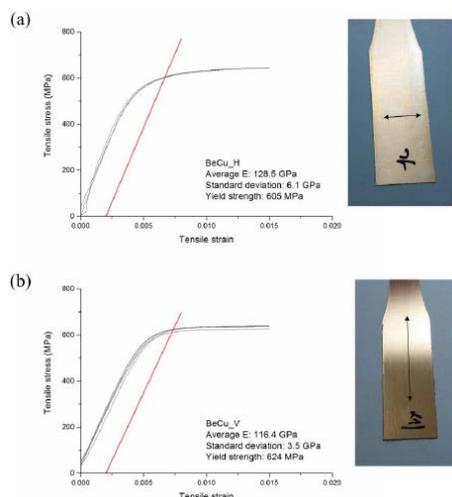


Fig. 4.10: Prova di trazione in direzione A) longitudinale e B) trasversale.[3]

Poichè l'anisotropia è di basso valore, sono stati utilizzati dei valori medi. In Tabella 4.2 sono elencate le proprietà ottenute ed il valore utilizzato.

4.3.3 Mesh

Per la mesh sono stati utilizzati degli elementi quad4, ideali per la superficie di pianta quadrata e per la tipologia di analisi implementata.

E' imposto una mesh seed pari a 20 elementi per lato in modo da avere una mesh abbastanza fitta ed un adeguato tempo di simulazione.

Una volta creata la mesh sono creati due ulteriori nodi in corrispondenza degli ultimi elementi della mesh.

I nodi sono creati utilizzando il comando interpolate così che siano ottenuti esattamente al centro dell'elemento; tale operazione è stata compiuta per i due differenti elementi all'estremità; tali nodi corrispondono alla zona in cui viene poi applicato l'SMA.

In Figura 4.11 è illustrata la posizione di uno dei due nodi aggiunti.

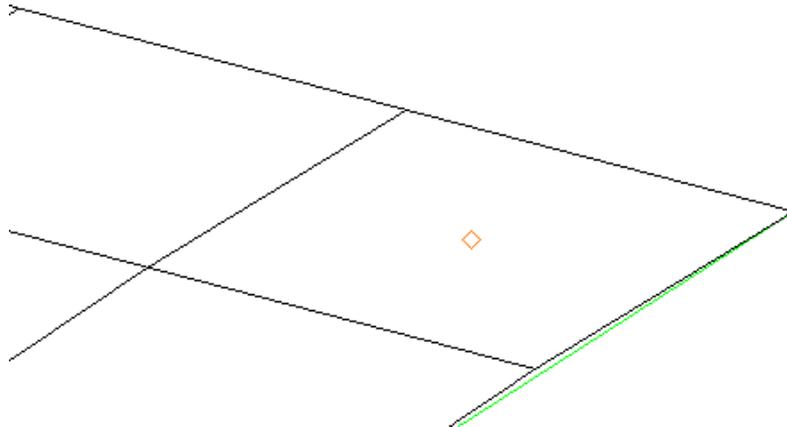


Fig. 4.11: Nodo creato interpolando le coordinate dei nodi dell'elemento posizionato all'angolo della superficie.

I nodi appena creati sono poi stati vincolati tramite MPC ai nodi all'estremità dell'elemento.

Il vincolo è stato imposto utilizzando un MPC di tipologia RBE2 e definendo i nodi all'estremità dipendenti al nodo appena creato. (Figura 4.12)

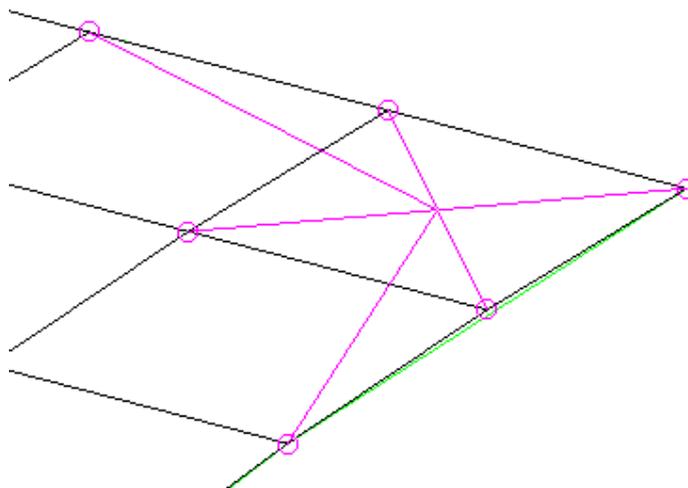


Fig. 4.12: Il nodo creato è collegato con un MPC ai nodi della mesh.

I nodi creati sono poi stati traslati perpendicolarmente all'elemento di un valore di 2 [mm]; ciò è avvenuto per diversi fattori:

1. simulare in maniera migliore l'applicazione dell' SMA
2. Favorire la convergenza della simulazione
3. Meglio definire la forza dell' attuatore

Essi sono comunque traslati sia per valori di traslazione positivi che per valori di traslazione negativi, ottenendo quindi due distinti modelli, caratterizzati da nodi in posizione sovrastante la superficie e nodi sottostanti la superficie. Tale scelta è stata fatta con lo scopo di ottenere due diverse configurazioni:

- per nodi sottostanti la superficie, i valori di curvatura iniziale e quella finale sono di segno concorde (Figura 4.13)
- per nodi sovrastanti la superficie, le due curvature hanno segno discorde.(Figura 4.14)

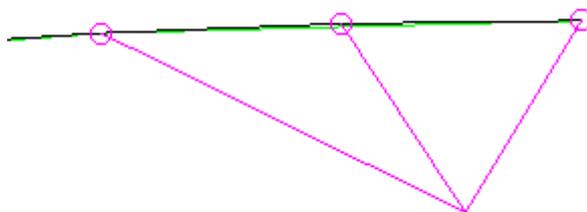


Fig. 4.13: Il nodo creato è traslato di 0.002 [mm] sottostante la superficie. In tale maniera si ottiene una curvatura finale concorde a quella di partenza.

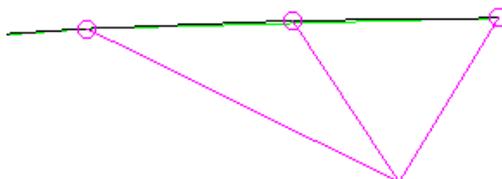


Fig. 4.14: Il nodo creato è traslato di 0.002 [mm] sovrastante la superficie. In tale maniera si ottiene una curvatura finale discorde a quella di partenza.

4.3.4 Loads

La scelta di carico deve corrispondere all'applicazione dell'SMA. Per tale motivo il carico è stato applicato in corrispondenza dei nodi creati in precedenza e che corrispondono ai nodi indipendenti dell'MPC. Più precisamente il carico viene applicato imponendo uno spostamento dei nodi del valore $S1=[,0.03]$ e $S2=[,-0.03]$ che quindi corrisponde ad un valore di deformazione totale pari a 0.06 [m].

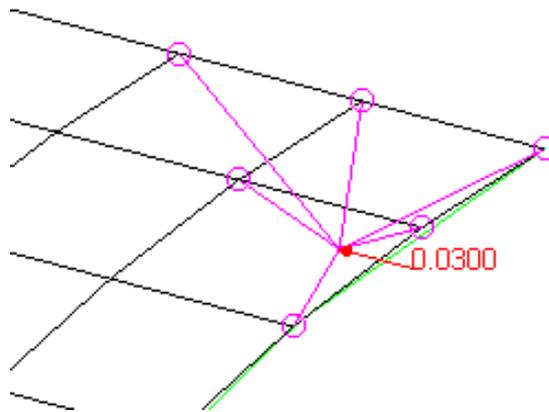


Fig. 4.15: Spostamento imposto a 0.03 [m] applicato al nodo dell'MPC

Tale spostamento consente di ottenere una deformazione della superficie abbastanza ampia da consentire l'ottenimento dello snap e la variazione di curvatura.

Dei nodi centrali sul lato degli MPC sono poi stati incastrati in maniera da bloccare gli spostamenti e consentire la corretta deformazione.

Tali carichi sono utilizzati per ogni modello.

In Figura 4.16, 4.17 e 4.18 sono illustrati i modelli finali rispettivamente caratterizzati da angoli sottesi pari a 60° , 90° e 180° .

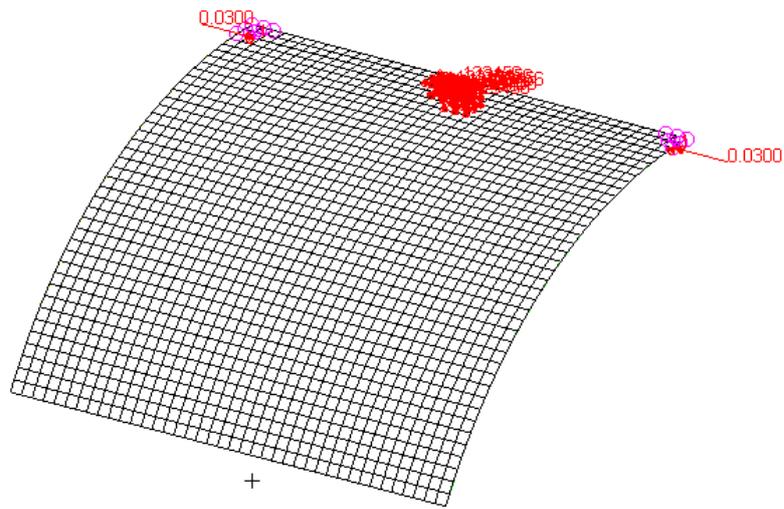


Fig. 4.16: Modello dalla superficie con angolo sotteso pari a 60°

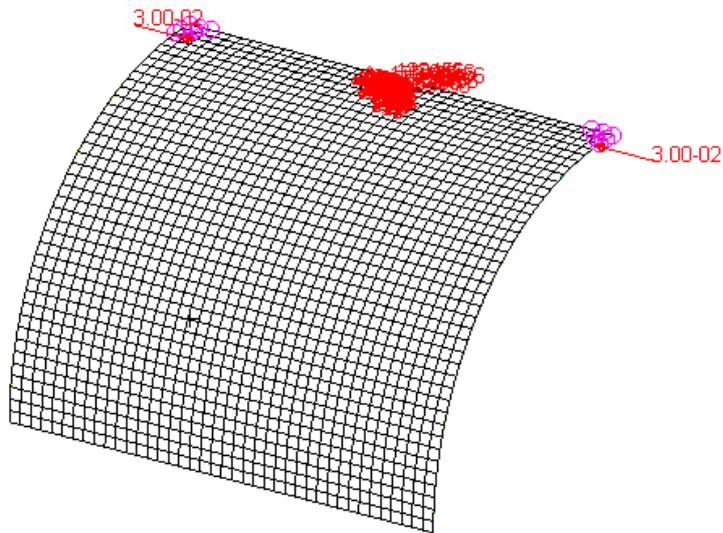


Fig. 4.17: Modello dalla superficie con angolo sotteso pari a 90°

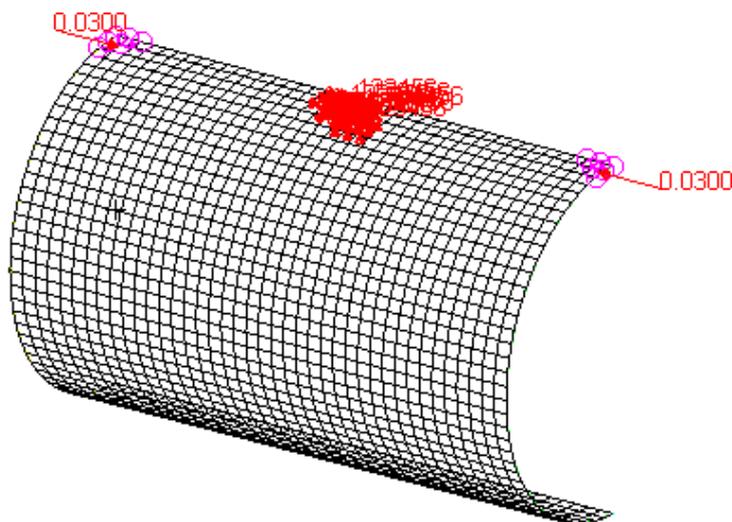


Fig. 4.18: Modello dalla superficie con angolo sotteso pari a 180°

4.3.5 Analisi

Lo spostamento imposto consente di ottenere lo snap della struttura, l'analisi quindi deve consentire di poter definire i carichi applicati all'MPC per l'ottenimento dello snap.

L'analisi iniziale è di tipo statico non-lineare, che consente di ottenere lo spostamento e la forza utilizzate.

Il solutore Patran consente di definire il tipo di analisi desiderata: la tipologia di analisi scelta è la SOL400 per le analisi non lineari definite per grandi spostamenti.

Per quanto riguarda invece la scelta dei parametri per consentire la convergenza della simulazione sono stati definiti incrementi dello spostamento costanti con preferenza ai grandi spostamenti tramite il parametro CTRLDF severely.

Per i risultati richiesti invece sono state selezionate, oltre al valore degli spostamenti ed i valori degli stress, anche le forze agenti agli MPC in modo da determinare il valore della forza necessaria allo spostamento.

5. RISULTATI

Nel file di risultati sono ottenute le forme deformate a partire dallo spostamento di ogni nodo, che consentono di definire la deformata finale e le forze agenti ad ogni MPC che definiscono la forza necessaria per compiere lo spostamento desiderato.

Tali valori di forza e spostamento consentono di definire le caratteristiche geometriche dell' SMA.

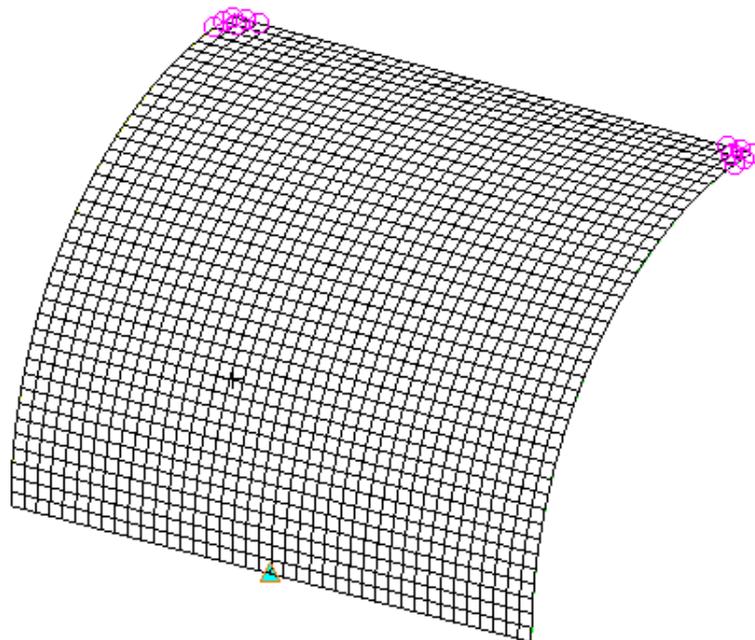


Fig. 5.1: In figura è evidenziato il nodo all'estremità opposta al SMA che viene utilizzato per valutare le deformazioni

Per meglio interpretare i dati ottenuti oltre che analizzare le deformate direttamente all' interno del solutore, i dati relativi a forza e spostamento

sono stati esportati in un file dati.

I file così ottenuti sono poi importati in Matlab e utilizzati per ottenere dei grafici che meglio illustrano il comportamento.

Più precisamente i dati importati riguardano la forza agente e i valori di spostamento del nodo sul quale sono applicati i carichi iniziali e i valori di spostamento per quanto riguarda il nodo centrale all'estremità opposta in modo da definire la configurazione deformata (Figura 5.1).

Dopo aver definito quali risultati sono analizzati e il perchè sono stati scelti quei dati si passa alla vera e propria analisi dei risultati.

Si procede dunque all'analisi dei risultati per quanto riguarda le due diverse configurazioni che portano a definire configurazioni finali dalla curvatura concorde e discorde.

5.1 *Curvatura concorde*

I dati per la curvatura concorde sono ottenuti grazie all'analisi con i nodi collegati all'MPC posti in posizione sottostante la superficie.

5.1.1 *Superficie 90 °*

Il modello studiato inizialmente è caratterizzato da un angolo sotteso alla superficie pari a 90 °.

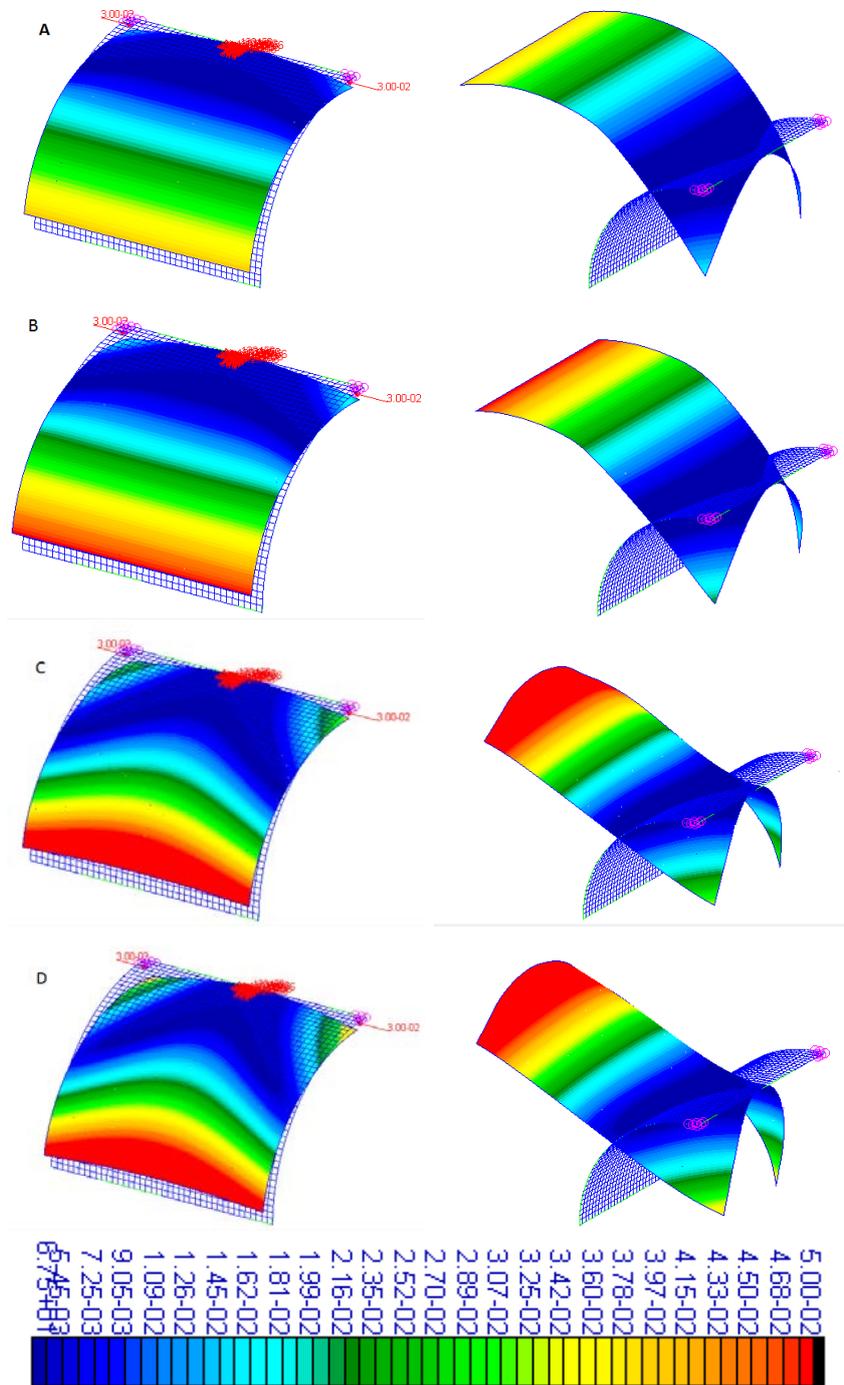


Fig. 5.2: Risultati di spostamenti della superficie di 90°. Le figure A e B mostrano gli spostamenti pre snap, le figure C e D post snap.

Le deformazioni illustrate in Figura 5.2, mostrano come la superficie riesca ad ottenere una forma finale dalla curvatura di segno concorde a quella di partenza, infatti gli angoli iniziale e finale sono entrambi sottesi alla curva. Più nel dettaglio si nota come vi sia una sostanziale differenza tra le due deformazioni pre-snap (A e B) e le due dopo lo snap (C e D): prima dello snap la superficie si deforma in maniera univoca e consequenziale, a snap avvenuto invece la superficie mostra un valore di spostamento elevato solamente nella parte centrale del lato opposto a quello di applicazione dell' SMA; ciò è dovuto alla curvatura finale che viene a formarsi una volta avvenuto lo snap e nella parte finale avvengono gli spostamenti maggiori. Vi è poi l'analisi degli sforzi all' interno della superficie.

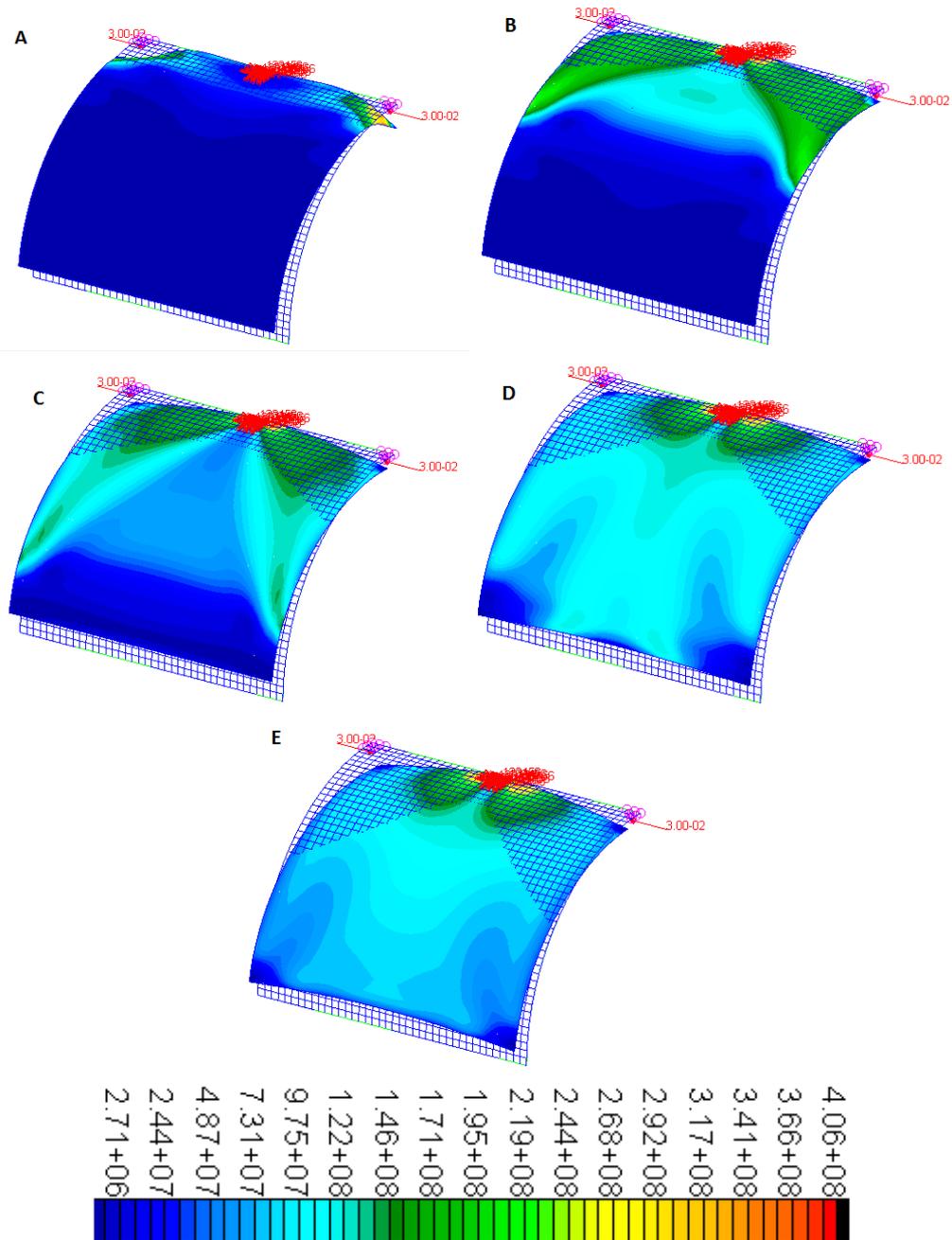


Fig. 5.3: Stress della superficie con angolo sotteso pari a 90° . In A inizio deformazione, in B e C la propagazione fino allo snap, in D ed E le tensioni post snap.

Lo studio degli sforzi mostra come a partire dalla prima fase di deformazione gli stress si propagano verso le estremità della superficie. (Figura 5.3) Più nello specifico in A vi è l'inizio della deformazione, in B e C sono illustrati gli sforzi che si propagano nella superficie verso le due estremità e, nelle figure D ed E, sono mostrati gli stress una volta effettuato lo snap.

Questa tipologia di propagazione a partire dall'angolo della superficie, è proprio quella attesa a seguito dell'utilizzo dei bend propagation actuator.

Gli sforzi in ogni caso sono inferiori al valore di σ_s che era pari a 614.5 [MPa] mentre in questo caso si hanno valori inferiori.

Una volta che si sono meglio comprese le fasi che definiscono la deformata della superficie e il deployment, si riesce ad analizzare i grafici ottenuti in Matlab.

Il grafico di maggior utilità pratica che si riesce ad ottenere tramite l'analisi dei dati è quello che lega i valori di spostamento e di forza applicati al'MPC, in tale maniera si riuscirà poi a definire il design dell'SMA per consentire tale movimento.

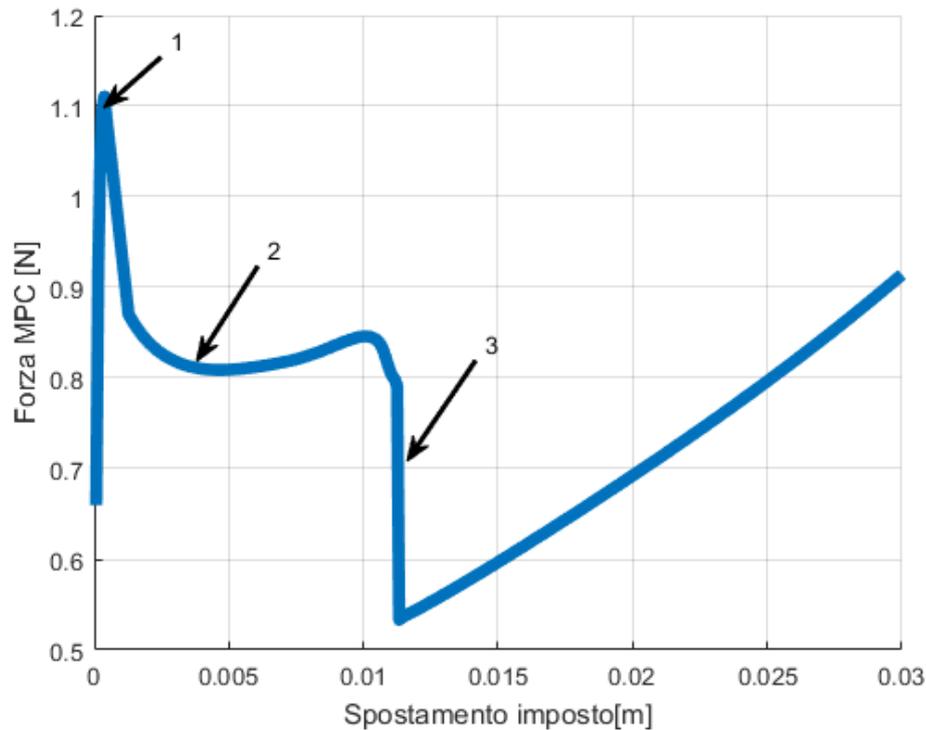


Fig. 5.4: Grafico che mostra la forza agente sul nodo indipendente dell'MPC per riuscire ad ottenere lo spostamento desiderato. Si notano 3 fasi: 1-grande forza iniziale 2-forza costante 3-rapido decremento associato allo snap.

Il grafico in Figura 5.4 mostra come vi siano diverse fasi durante il movimento:

1. una prima parte nella quale vi è un picco di forza.
2. una seconda parte caratterizzata da forza pressochè costante
3. una terza fase in cui vi è un secondo brusco decremento.

Una volta ottenuto il grafico si cerca di ricondurre le fasi appena descritte all'interno delle deformate.

Analizzando in Patran i valori ottenuti dal grafico con le deformazioni dei modelli risulta come la forza iniziale elevata serva per definire una deformazione, che consente poi l'aumento di deformazione mediante una forza costante e dunque così è stato interpretato il primo picco e il successivo decremento, oltre al valore di forza costante.

La zona dalla forza costante è associata alla propagazione delle forze sulla

superficie.

Il secondo e ultimo decremento della forza è ottenuto quando nella configurazione deformata vi è il cambio di curvatura e dunque il decremento della forza è stato attribuito al fenomeno dello snap.

Altro fondamentale grafico da analizzare è quello che lega la forza agente all'MPC all'angolo sotteso alla superficie, tale grafico permette di determinare la forza che si deve applicare per ottenere la variazione di curvatura desiderata.

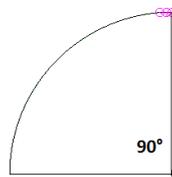


Fig. 5.5: Angolo sotteso dalla superficie

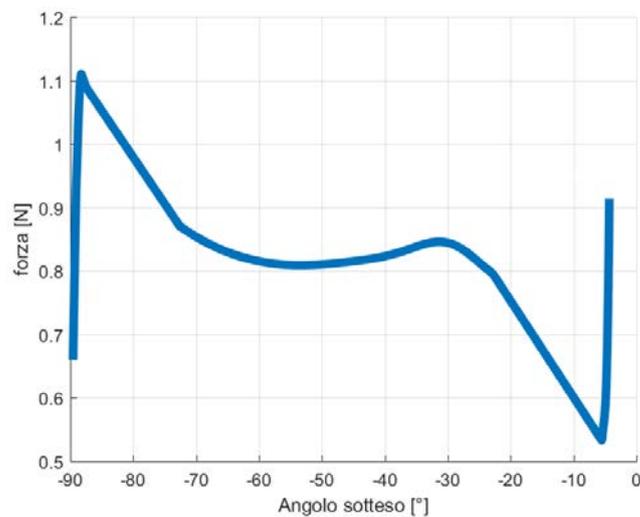


Fig. 5.6: Grafico forza angolo sotteso per una superficie di 90° caratterizzata da un minimo in presenza dello snap. Il valore di angolo sotteso si riferisce al nodo centrale. Si nota come l'angolo diventi pari a 0 dopo lo snap.

Come si vede dalla Figura 5.6 vi è una forza iniziale elevata, come già visto nel grafico precedente, che consente l'inizio della deformazione; successivamente vi è un decremento della forza con conseguente diminuzione di

angolo, fino ad un minimo che coincide come detto con lo snap, oltre il quale per aumento di forza non corrisponde una variazione, ciò perchè dopo lo snap la superficie ha già raggiunto la fase dispiegata.

Altro grafico di grande utilità è quello che definisce il rapporto tra lo spostamento e i due angoli sottesi che definiscono le curvature primarie e secondarie: quella primaria inizialmente pari a 90° e quella secondaria inizialmente pari a 0° .

Il grafico relativo alla curvatura primaria è stato ottenuto considerando la rotazione del punto, più volte già descritto, definito nella mezzeria del lato opposto al lato in cui sono applicati gli MPC; per la definizione di curvatura secondaria invece è stato usato un nodo all'angolo dell'MPC in modo da definire la rotazione di tale punto e quindi la curvatura secondaria della superficie.

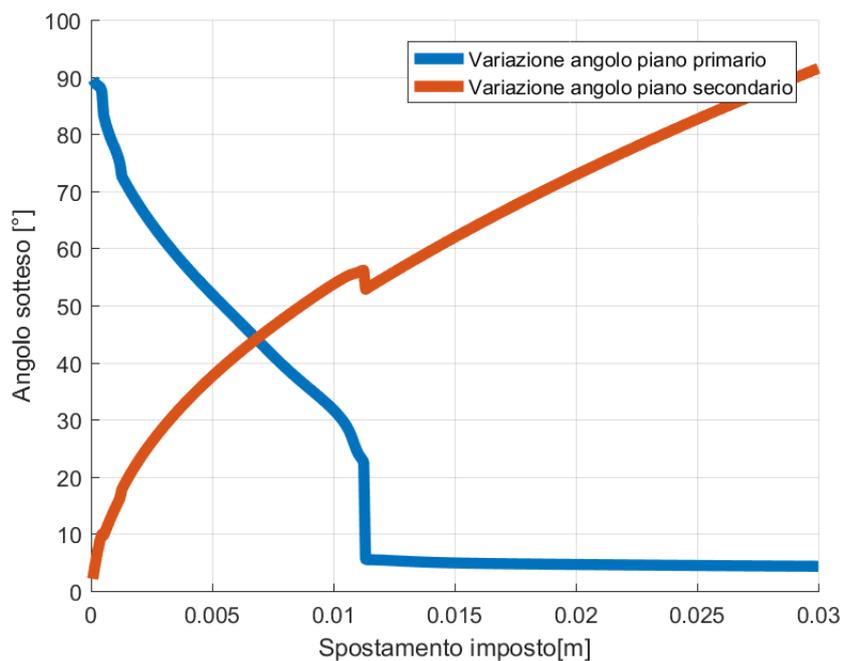


Fig. 5.7: Rotazione primaria e secondaria per superficie di 90° . L'angolo iniziale raggiunge un valore pari a 0, l'angolo secondario invece aumenta con l'aumentare dello spostamento.

La Figura 5.7 mette in evidenza come la superficie dopo lo snap mantenga sostanzialmente la curvatura gaussiana pari a 0 ma, mentre nella superficie iniziale la curvatura secondaria era pari a zero e quella primaria diversa da

zero, ora accade l'opposto, con la curvatura primaria che diventa pari a 0 mentre la curvatura secondaria diversa da 0.

La curvatura primaria come si vede però dal grafico non raggiunge mai il valore limite pari a 0, ciò può essere meglio interpretato se si osserva un altro grafico di interesse (Figura 5.9), ottenuto valutando gli spostamenti X ed Y del nodo opposto all'MPC: tali valori devono coincidere con una rotazione voluta e dunque la coordinata X finale deve risultare pari a 0.1 [m], valore corrispondente alla lunghezza finale delle superficie, mentre la coordinata Y finale deve essere pari a 0, in tale modo la superficie finale è dispiegata.

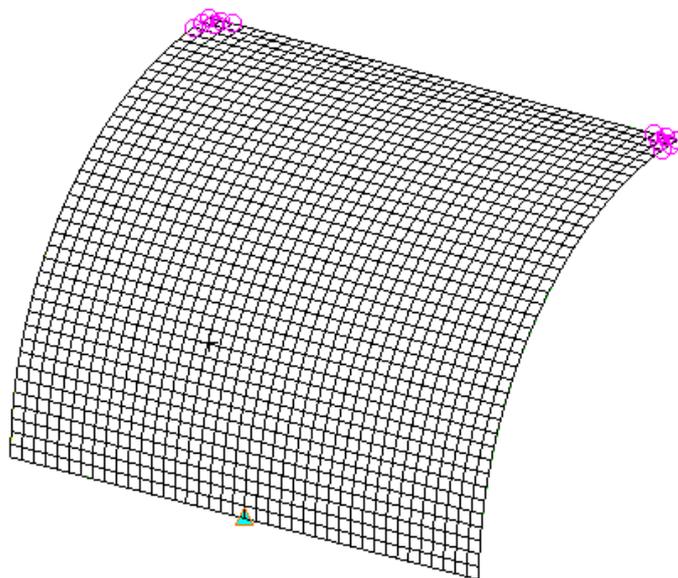


Fig. 5.8: Nodo in cui si valutano gli spostamenti (in verde)

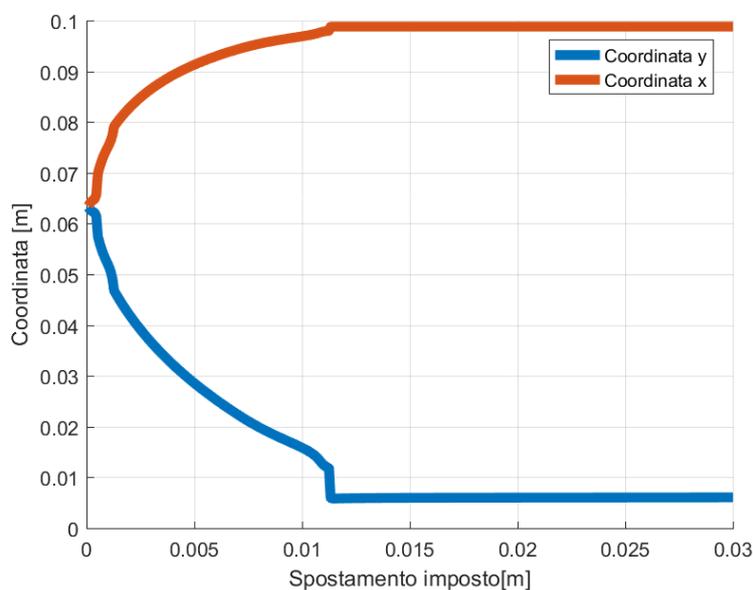


Fig. 5.9: Grafico della coordinata x ed y per superficie di angolo sotteso pari a 90° , si nota come esse non siano pari ai valori limite 0.1 [m] per la coordinata x e 0 [m] per la coordinata y

Si nota tuttavia come ciò non corrisponda al reale comportamento perchè, mentre la coordinata X raggiunge il valore desiderato, la coordinata Y vi si avvicina solamente, ciò spiega lo scostamento finale della curvatura primaria.

5.1.2 Superficie 60° e 180°

Per meglio comprendere il fenomeno e garantire il suo funzionamento oltre il caso appena analizzato, sono state effettuate analisi di superfici dall'angolo sotteso pari a 60° e 180° .

Allo stesso modo sono stati inseriti gli MPC e i rispettivi carichi e vincoli, oltre che l'analisi.

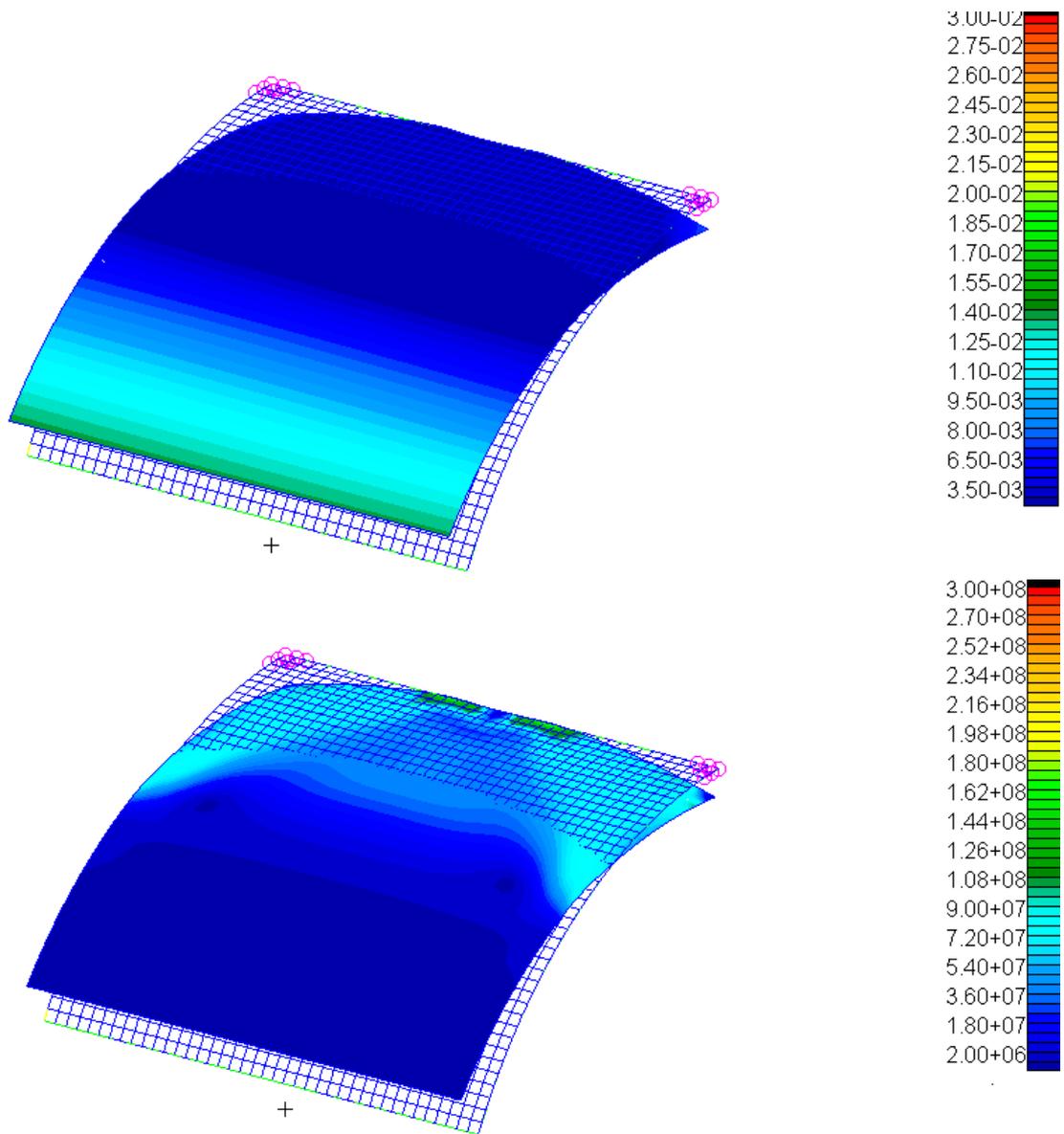


Fig. 5.10: Deformazioni (sopra) e stress (sotto) della superficie di 60° pre snap

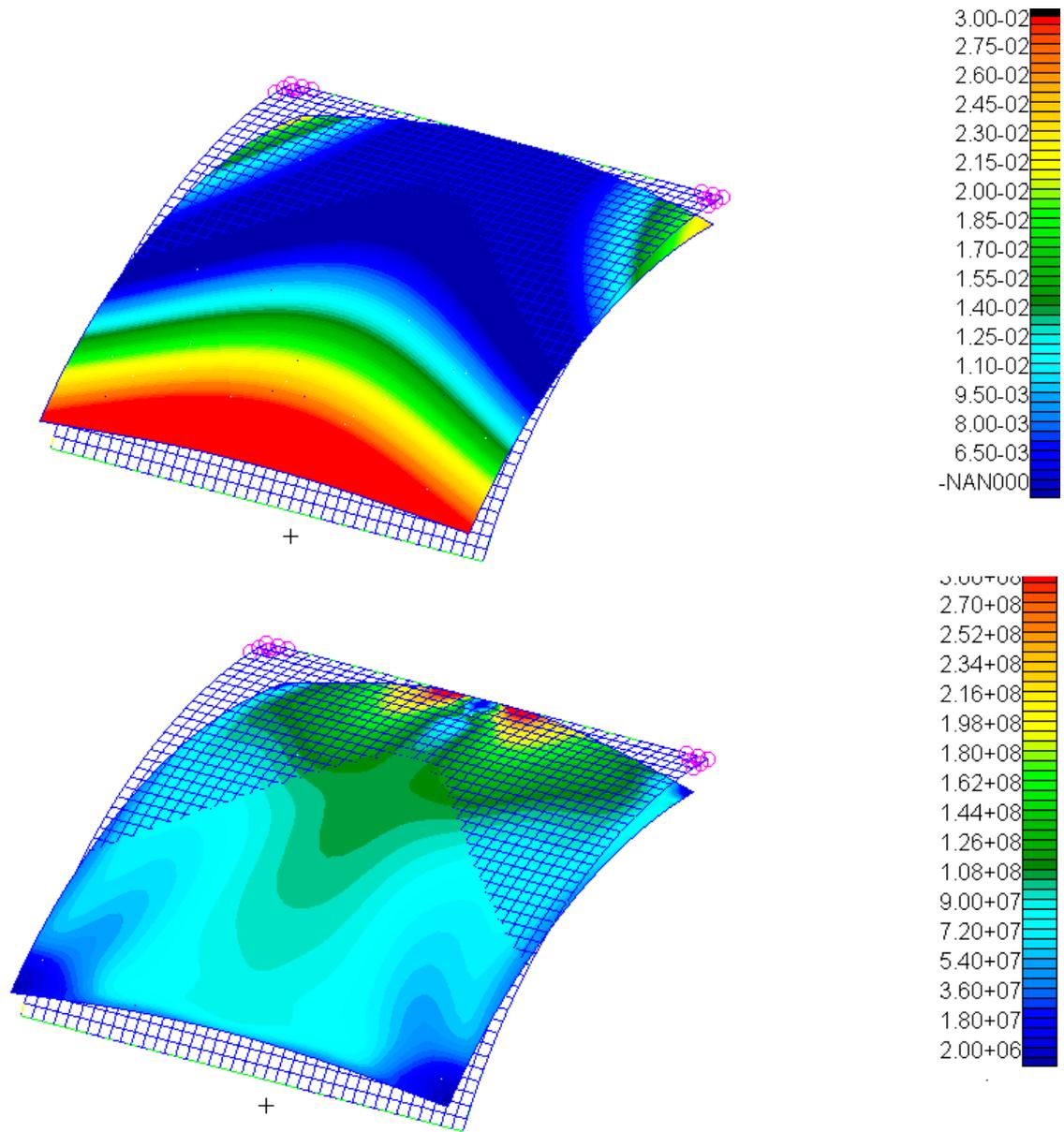


Fig. 5.11: Deformazioni (sopra) e stress (sotto) della superficie di 60° post snap

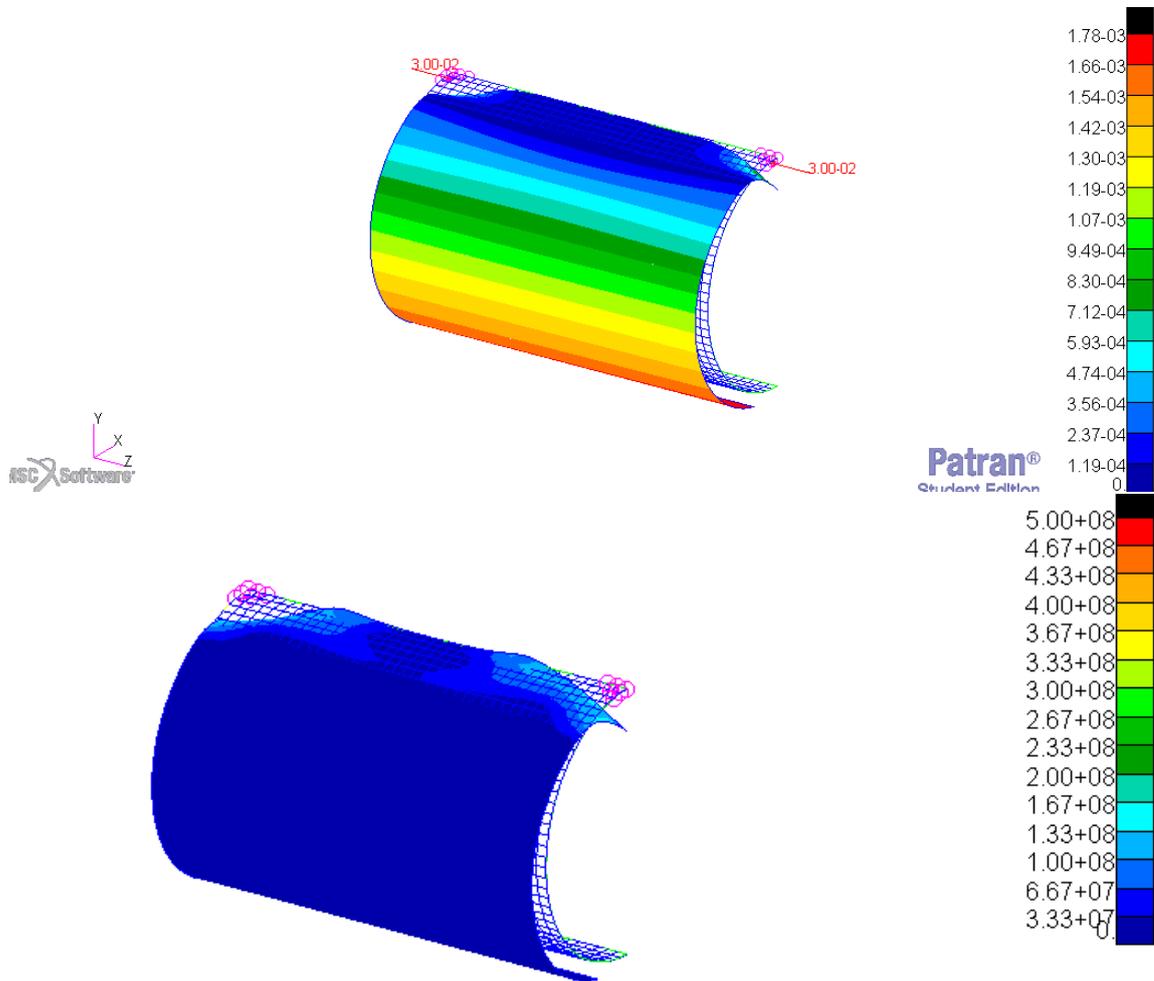


Fig. 5.12: Deformazioni (sopra) e stress (sotto) della superficie di 180° pre snap

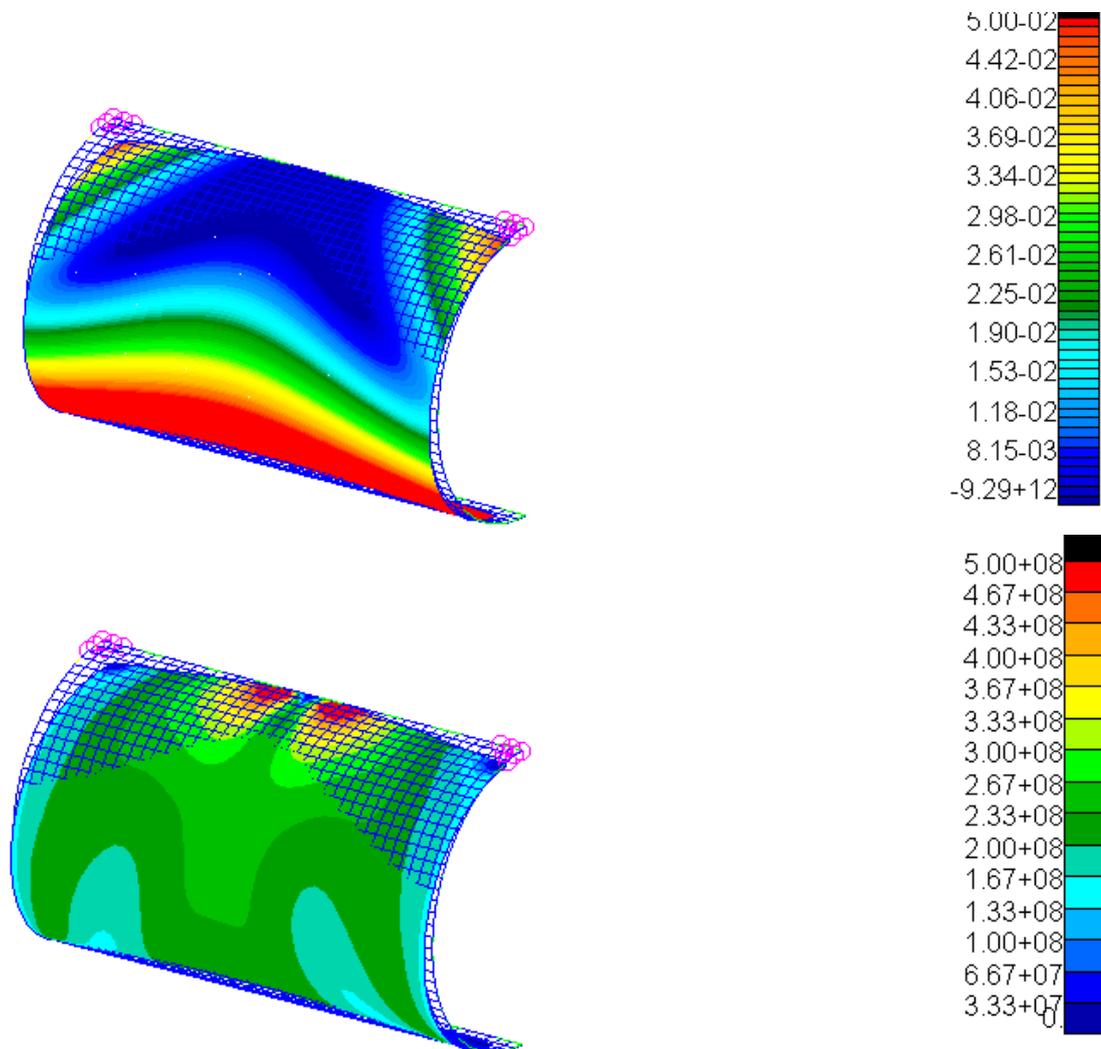


Fig. 5.13: Deformazioni (sopra) e stress (sotto) della superficie di 180° pre snap

Nella Figura 5.10 e Figura 5.11 sono illustrate le deformazioni e gli stress della superficie nel caso di superficie dai 60° , mentre la Figura 5.12 e Figura 5.13 mostrano le deformate e gli stress delle superfici di angolo sotteso pari a 180° .

Le illustrazioni delle deformate e degli stress sono paragonabili a quelle ottenute nel caso precedente, si possono notare come le deformate pre e post snap siano simili a quelle precedenti, mentre gli stress si propagano verso le estremità delle superfici.

Una volta verificato che le deformate sono comparabili si passa poi ad analizzare e comparare i risultati in Matlab.

Per prima cosa si studia il grafico definito dal rapporto tra forza e spostamento delle varie configurazioni.

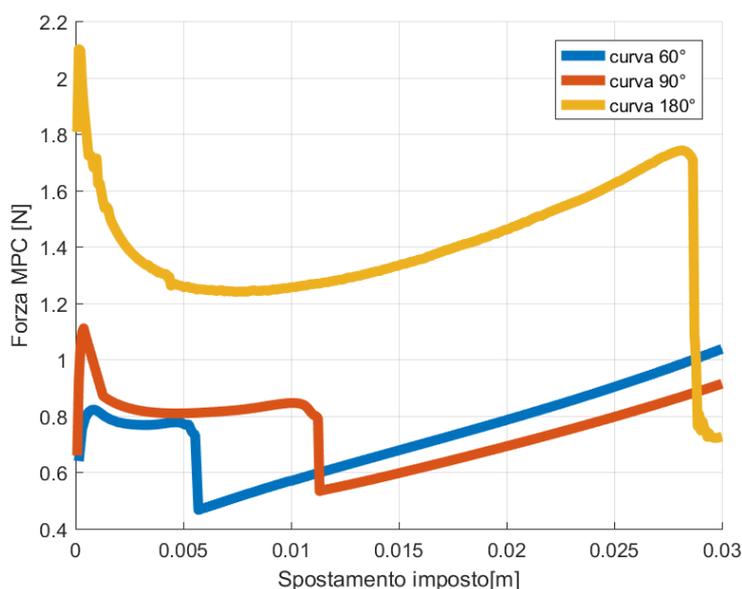


Fig. 5.14: Grafico forza spostamento per le diverse superfici. In tutte e tre si nota un picco iniziale di forza ed un successivo decremento associato allo snap.

Nella Figura 5.14 sono comparati i grafici forza spostamento per le diverse curvatures, si nota come la forza iniziale è sempre maggiore all'aumentare della curvatura, ciò perchè è necessaria una forza maggiore per ottenere uno spostamento iniziale per curvatures via via maggiori.

Lo snap inoltre avviene in tutti e tre i modelli, anche se per valori di spostamento differenti: per curvatures più ampie è necessario uno spostamento maggiore per ottenere lo snap e la configurazione finale.

Dal nodo centrale sul lato opposto al lato in cui sono applicati gli MPC si estraggono poi i valori di spostamento che consentono di determinare se la struttura sia riuscita effettivamente a effettuare il dispiegamento.

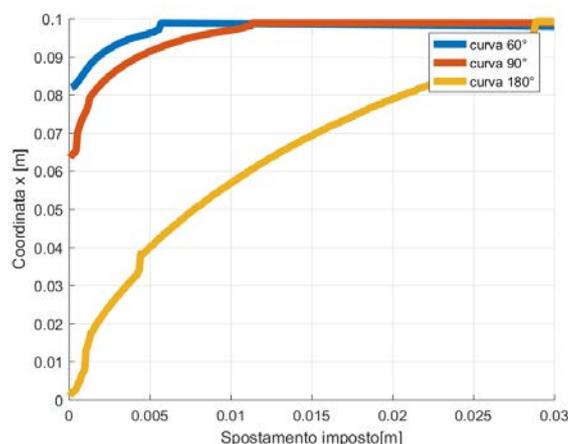


Fig. 5.15: Grafico che mostra la coordinata x all'estremità della superficie e lo spostamento dell'MPC per le diverse curvatures. Tutte e 3 raggiungono il valore limite 0.1 [m]

La Figura 5.15 illustra il rapporto tra curvatura e spostamento mostrando come tutte e tre le configurazioni giungano ad un valore di dispiegamento pari a 0.1 [m], che è pari al valore della lunghezza della superficie; in altre parole il dispiegamento è avvenuto con successo.

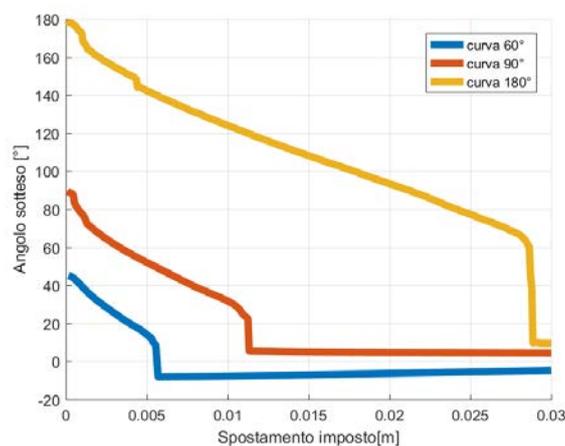


Fig. 5.16: Grafico curvatura spostamento per diverse curvatures. Tutte e 3 non riescono a raggiungere il valore finale pari a 0

Per quanto riguarda la variazione della curvatura primaria, la Figura 5.16 mostra come tutte e 3 le superfici non riescano a raggiungere il valore finale

pari a 0 ma anzi, per un aumento di angolo sotteso aumenta anche l'angolo finale residuo.

5.1.3 Superfici dalla diversa lunghezza

Per indagare ancora meglio il legame tra la geometria della superficie e le caratteristiche dell'attuatore sono state effettuate delle analisi con lunghezze della superficie diversa e per diversi rapporti d'aspetto.

Per prima cosa sono stati studiati i grafici ottenuti da superfici di pianta quadrata caratterizzate da lunghezza pari 0.05 [m] e 0.15 [m] con angoli sottesi pari a 60° e 90°; sono trascurate le analisi di angoli pari a 180° a causa di fenomeni di non convergenza delle soluzioni.

I risultati ottenuti per quanto riguarda le forze e gli spostamenti sono coerenti con i risultati precedentemente ottenuti.

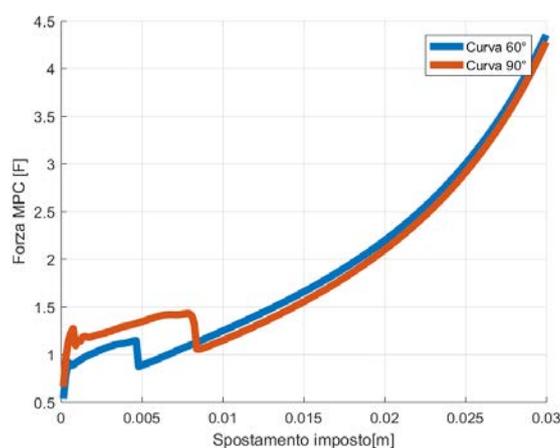


Fig. 5.17: Grafico forza spostamento per superfici di lato 0.05 [m] e angolo di 60° e 90°

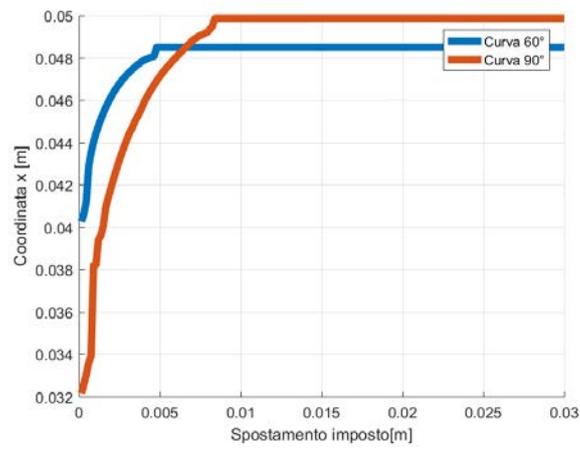


Fig. 5.18: Grafico coordinata x spostamento per superfici di lato 0.05 [m] e angolo di 60° e 90°

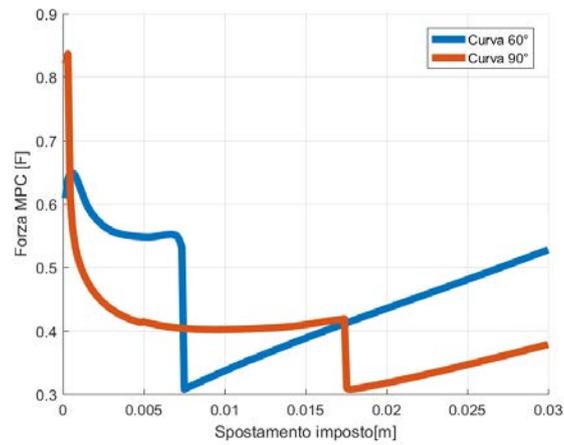


Fig. 5.19: Grafico forza spostamento per superfici di lato 0.15 m e angolo di 60° e 90°

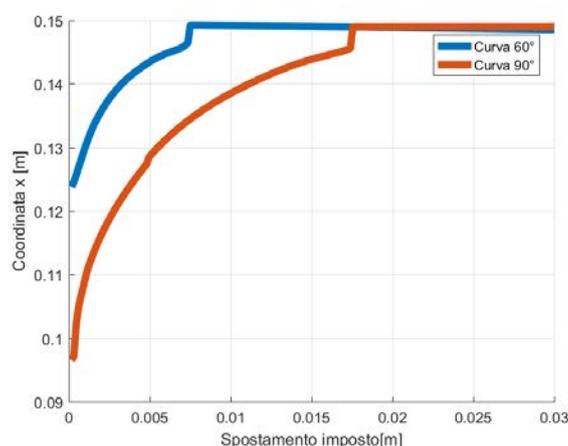


Fig. 5.20: Grafico coordinata x spostamento per superfici di lato 0.15 [m] e angolo di 60° e 90°

I grafici in Figura 5.17 e 5.19 mostrano le forze in funzione dello spostamento rispettivamente per superfici di lato 0.05 [m] e 0.15 [m], evidenziando come anche in questo caso vi sia la presenza dello snap.

I grafici nella Figura 5.18 e 5.20 mostrano invece come in entrambi i casi si riesca ad aggiungere la configurazione di deployment, nel primo caso pari a 0.05 [m], mentre nella seconda pari a 0.15 [m].

Tali grafici mostrano dunque la bontà di questi modelli e quindi possono dunque essere usati per le comparazioni con i risultati iniziali.

Più in particolare è di utilità comparare la forza necessaria per ottenere il fenomeno dello snap da parte delle superfici.

Per questa ragione sono graficati i diagrammi di forza e spostamento per quanto riguarda le superfici dotate di angoli sottomultipli pari a 60° e 90° per le superfici di lato 0.05 [m] e 0.15 [m] oltre che alla superficie del modello iniziale 0.1 [m].

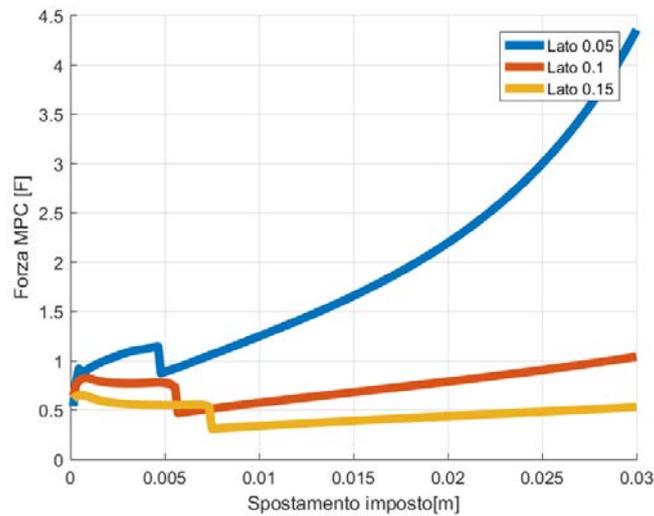


Fig. 5.21: Comparazione di grafici forza spostamento per le diverse lunghezze della superficie per angolo 60° . In tutti i casi vi è il fenomeno dello snap, per superfici di lati minori è necessaria una forza maggiore per avere una deformazione iniziale.

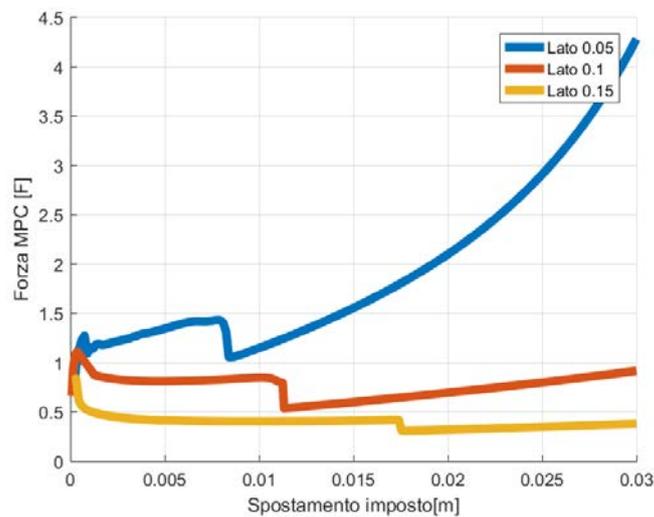


Fig. 5.22: Comparazione di grafici forza spostamento per le diverse lunghezze della superficie per angolo 90° . In tutti i casi vi è il fenomeno dello snap, per superfici di lati minori è necessaria una forza maggiore per avere una deformazione iniziale.

Tali valori di forza mostrano, sia per la Figura 5.21 e 5.22, come lo snap avvenga per valori via via maggiori per l'aumentare della lunghezza del lato, come era logico aspettarsi.

Per quanto riguarda le forze invece, si nota come siano necessarie forze più ampie per ottenere lo snap per superfici dal lato minore; ciò è interpretato con il fatto che forze maggiori sono necessarie per ottenere deformazioni nelle superfici di dimensioni minori.

5.1.4 Superfici dai diversi rapporti dimensionali

Per indagare ancora più a fondo il problema si è presa la configurazione iniziale dall'angolo sotteso pari a 90° e sono state effettuate analisi per diversi rapporti d'aspetto (Aspect Ratio-AR).

Tali analisi sono state effettuate per AR rispettivamente pari a 2 (Figura 5.23), 3 (Figura 5.24) e 4 (Figura 5.25), ottenute in maniera analoga alle superfici ottenute in precedenza.

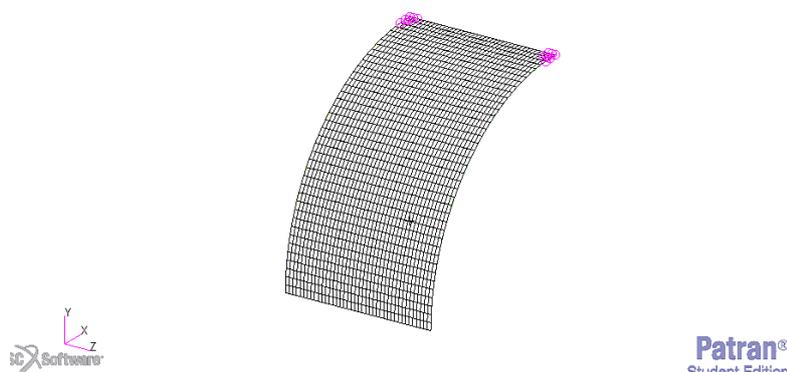


Fig. 5.23: Modello di superficie con AR pari a 2

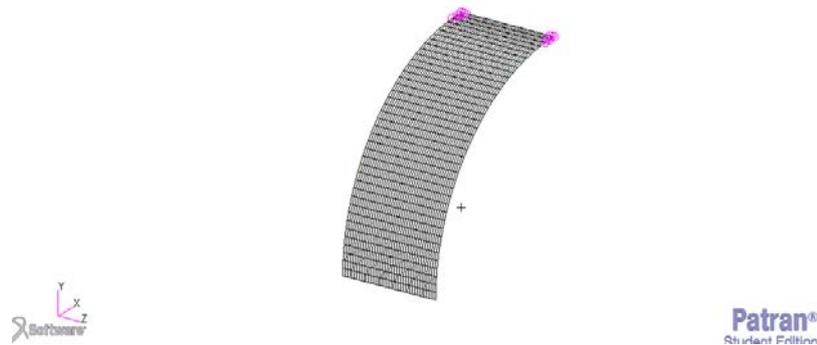


Fig. 5.24: Modello di superficie con AR pari a 3

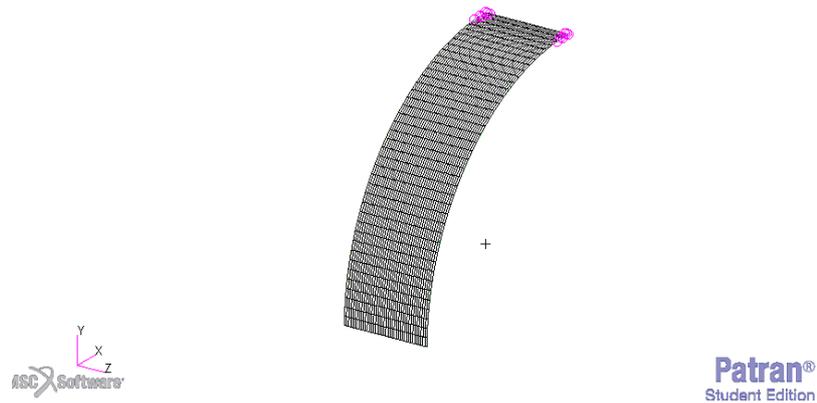


Fig. 5.25: Modello di superficie con AR pari a 4

Le superfici sono ottenute analogamente alla superficie iniziale, utilizzando la proporzione:

$$2\pi R : L = 360 : \alpha \quad (5.1)$$

con L pari a 0.2 0.3 e 0.4 [m] in maniera da garantire i diversi AR. In tali modelli i valori di raggio e dunque di curvatura sono: Tabella 5.1

<i>AR</i>	<i>raggio</i> [m]	<i>curvatura</i> [1/m]
2	0.0954	10.471
3	0.0636	15.70
4	0.0318	31.41

Tab. 5.1: Tabella che definisce i valori di raggio per i diversi AR

Una volta effettuate le analisi i risultati sono importati in Matlab e sono relazionati ai valori iniziali con $AR=1$.

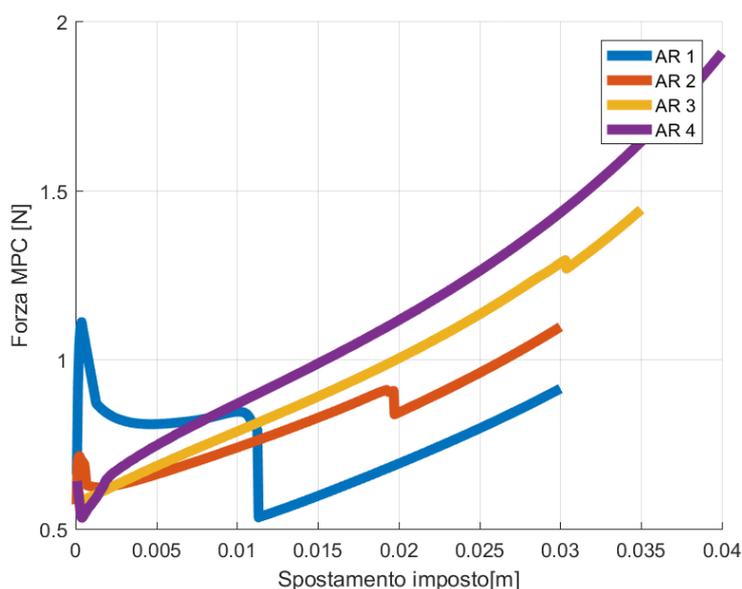


Fig. 5.26: Grafico forza spostamento per diversi AR. La forza iniziale si abbassa mentre si alza la forza pre snap.

La Figura 5.26 mostra come il valore di spostamento per il quale si ha lo snap aumenta all'aumentare dell' AR come era facile aspettarsi; vi è però una sostanziale modifica per quanto riguarda la curva forza-spostamento: per AR diversi da 1 non vi è più il tratto in cui si ha forza costante ma si ha un aumento e dunque la forza iniziale non è più il picco e anzi, il picco di forza si ha in presenza del valore di spostamento per il quale avviene lo snap. Tale snap inoltre per valori via via più alti è sempre meno forte fino a scomparire del tutto per AR pari a 4.

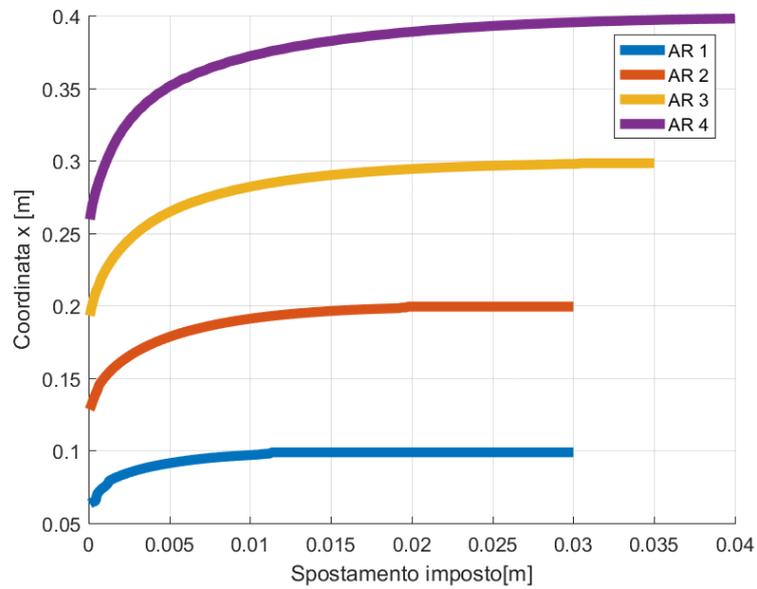


Fig. 5.27: Grafico coordinata x e spostamento per i diversi AR. Per tutti i diversi AR avviene il dispiegamento

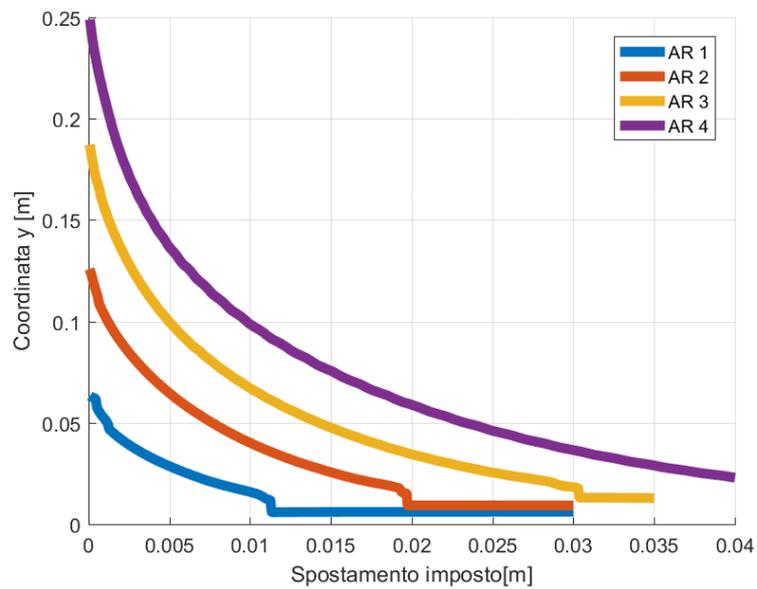


Fig. 5.28: Grafico coordinata y e spostamento per i diversi AR. Per tutti i diversi AR avviene il dispiegamento

La Figura 5.27 e la Figura 5.28 mostrano come la coordinata X finale sia pari alla lunghezza della superficie per i diversi AR, mentre la coordinata y per ogni superficie tende a 0 con l'aumentare dello spostamento, e dunque il deployment è avvenuto anche in queste situazioni.

A causa dell'aumentare della forza pre snap per valori di AR maggiori, e dunque maggiori forze necessarie dell'SMA per riuscire ad effettuare il dispiegamento, superfici dal valore di AR diverso da uno non sono prese in considerazione data l'impossibilità di realizzazione.

5.1.5 *Analisi della fase di ritorno*

Una delle ragioni di utilizzo di questa tipologia di attuatori è la capacità di ritornare alla configurazione iniziale, sempre grazie agli SMA.

Nei prossimi paragrafi viene effettuato il dimensionamento degli SMA, per il momento però l'analisi è limitata ai valori di forza e spostamento necessari per il ritorno alla configurazione iniziale; per simulare il ritorno è stata effettuata una analisi, sempre utilizzando il modello classico con un angolo sotteso pari a 90° , sul quale sono applicati differenti vincoli.

Per garantire l'effetto voluto l'analisi è stata suddivisa in due differenti load case: nel primo la superficie è stata deformata imponendo i carichi classici per ottenere lo snap e successivamente, a partire dalla configurazione deformata, è stato imposto uno spostamento di segno opposto per simulare l'effetto di ritorno.

Nella 5.29 sono mostrate le deformazioni durante la fase di ritorno: nella prima immagine si nota come la configurazione post snap sia ancora presente e dunque vi è ancora la curvatura finale; nella seconda immagine invece si nota come non vi sia più la deformata classica dello snap e dunque la superficie è libera di tornare alla configurazione indeformata.

Si fa presente come non sia stato possibile completare l'analisi nella sua interezza a causa di fenomeni di divergenza.

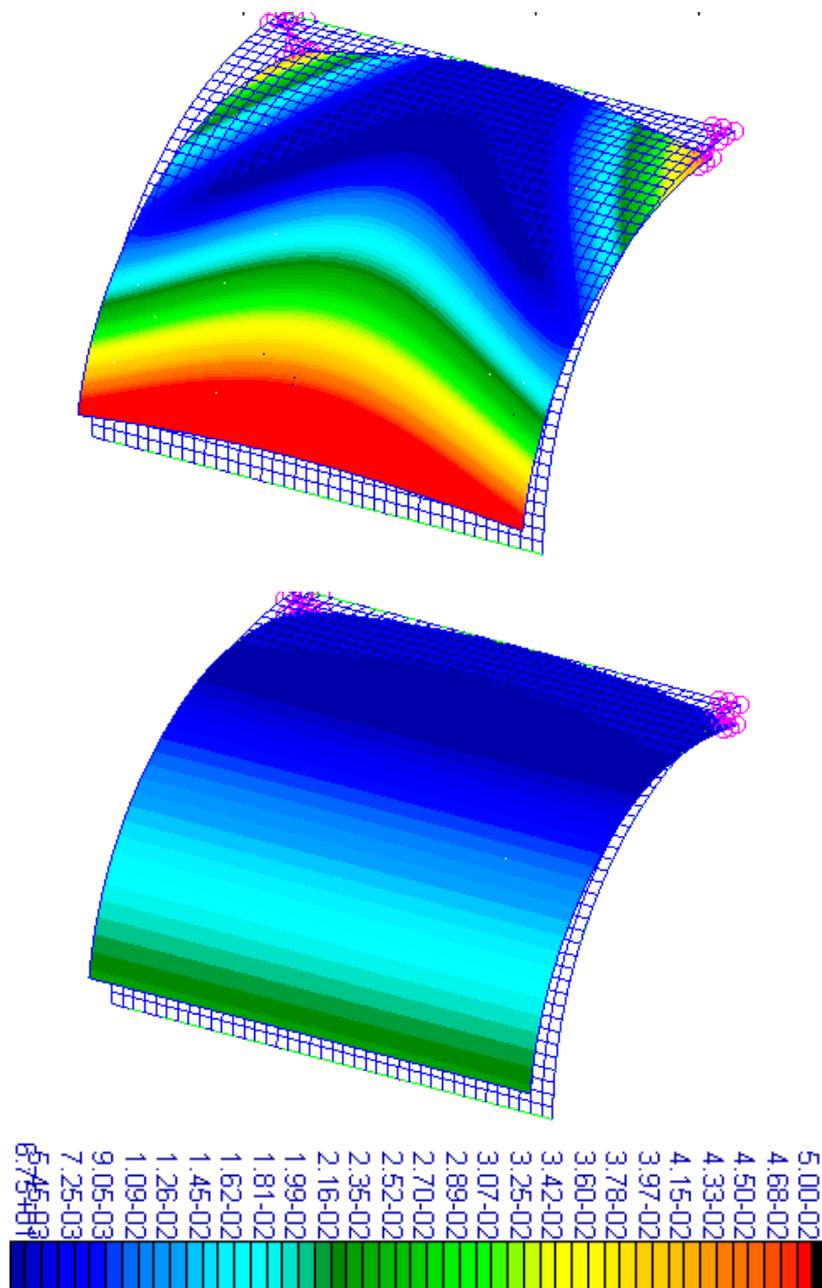


Fig. 5.29: Deformazione di ritorno alla configurazione iniziale. Si nota come in una prima fase vi sia ancora la presenza dello snap. In una seconda fase però non vi è più traccia dello snap, la superficie può dunque tornare alla configurazione iniziale.

Nella Figura 5.30 è invece illustrato il grafico relativo alla forza necessaria per ottenere il ritorno; si nota come la forza abbia un andamento decrescente e sia in valore assoluto minore rispetto a quella del caso di dispiegamento; l'SMA è stato dunque dimensionato per la fase di dispiegamento.

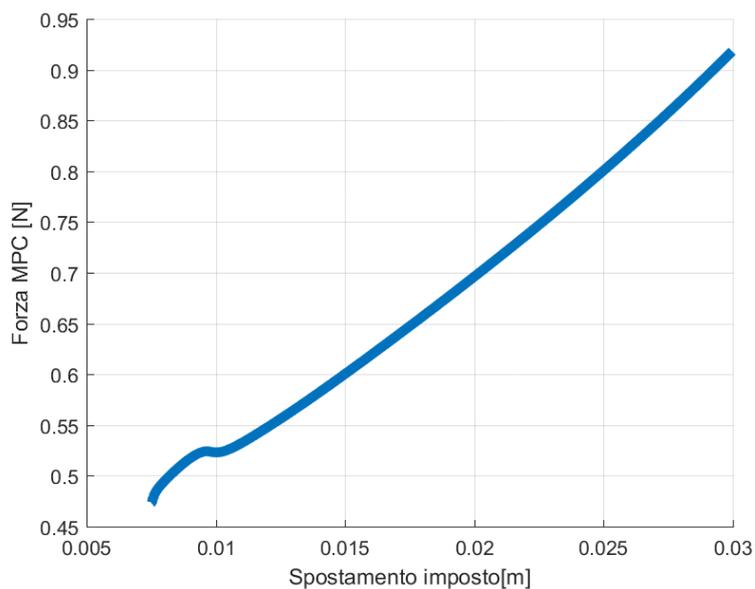


Fig. 5.30: Grafico forza deformazione per il ritorno. Si nota come la forza abbia un andamento decrescente per il ritorno alla configurazione iniziale.

5.2 Curvatura discorde

Si passa poi alle simulazioni caratterizzate dai nodi posti al di sopra della superficie (Figura 5.31); questa configurazione, come detto, consente di ottenere una curvatura finale di segno discorde da quella iniziale.

Come per le simulazioni svolte in precedenza è applicato uno spostamento di 0.03 [m] applicato al nodo dell'MPC.

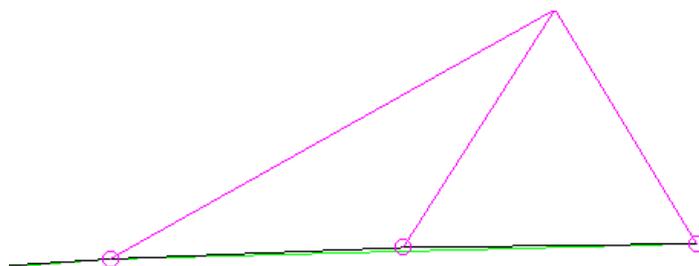


Fig. 5.31: Modello con nodo dell'MPC posto al di sopra della superficie

Le simulazioni si limitano solamente al caso di angolo sotteso pari a 60° e 90° , l'analisi con angolo sotteso pari a 180° non è stata presa in considerazione poichè presenta fenomeni di non convergenza.

Tali grafici mostrano come la curva sia di andamento pressochè analogo al caso precedente e dunque capace di ottenere il valore desiderato di dispiegamento.

Ancora una volta il primo modello esaminato è quello di curvatura che corrisponde ad angolo sotteso pari a 90° .

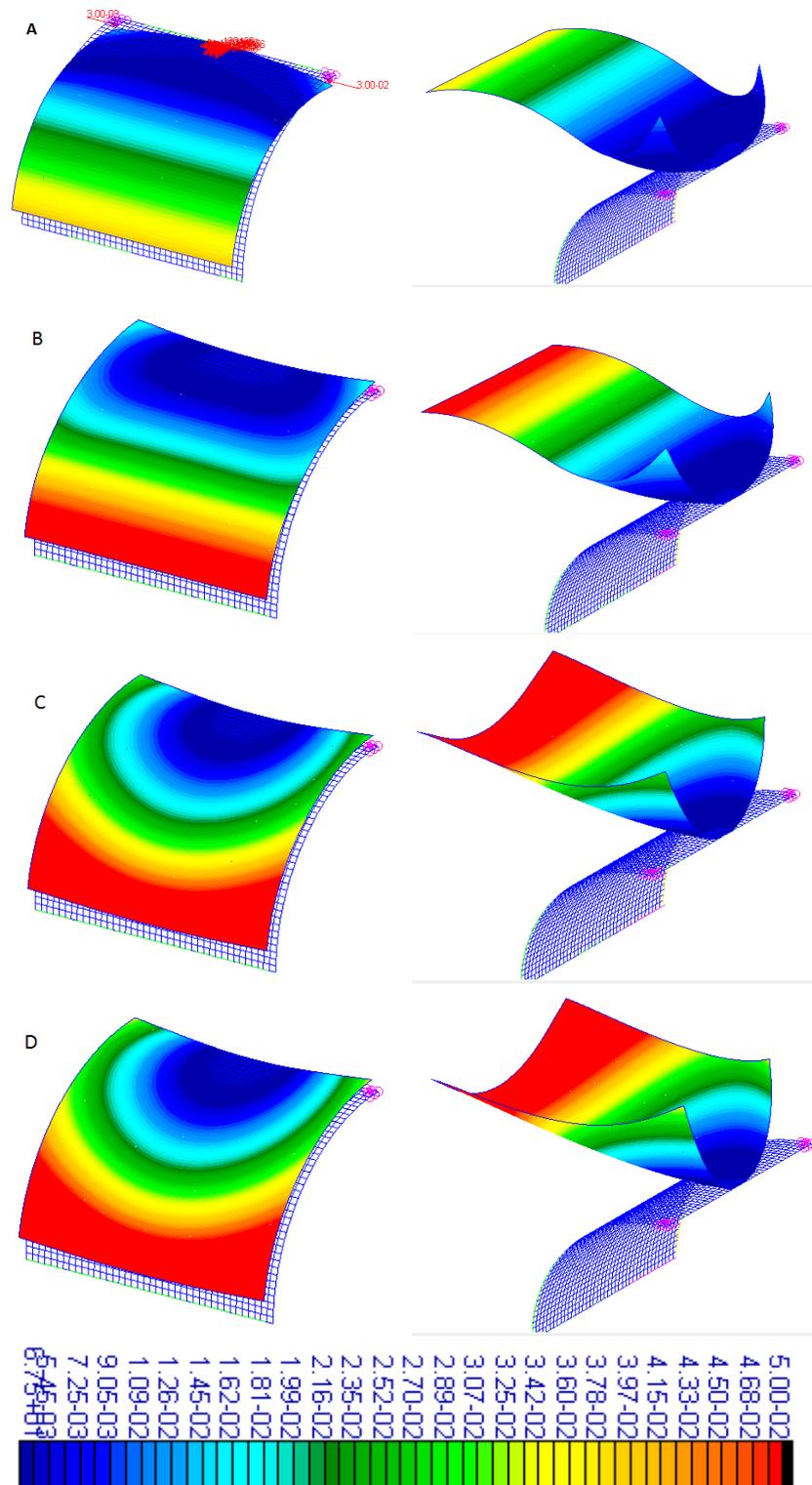


Fig. 5.32: Risultati di spostamenti della superficie di 90° per curvatura finale discorde. Le figure A e B mostrano gli spostamenti pre snap, le figure C e D post snap.

Nella Figura 5.32 sono illustrati gli spostamenti. Nelle fasi A e B sono illustrati gli spostamenti pre snap, mentre nelle figure C e D sono illustrate le deformazioni una volta avvenuto lo snap. Anche in questo caso si nota come le deformazioni della superficie antecedenti allo snap siano consequenziali mentre, una volta avvenuto lo snap, le deformate variano nella mezzeria del lato opposto all'applicazione dei carichi, ciò perchè si è formata la curvatura di segno opposto. Per quanto riguarda gli stress agenti sulla superficie si ottengono:

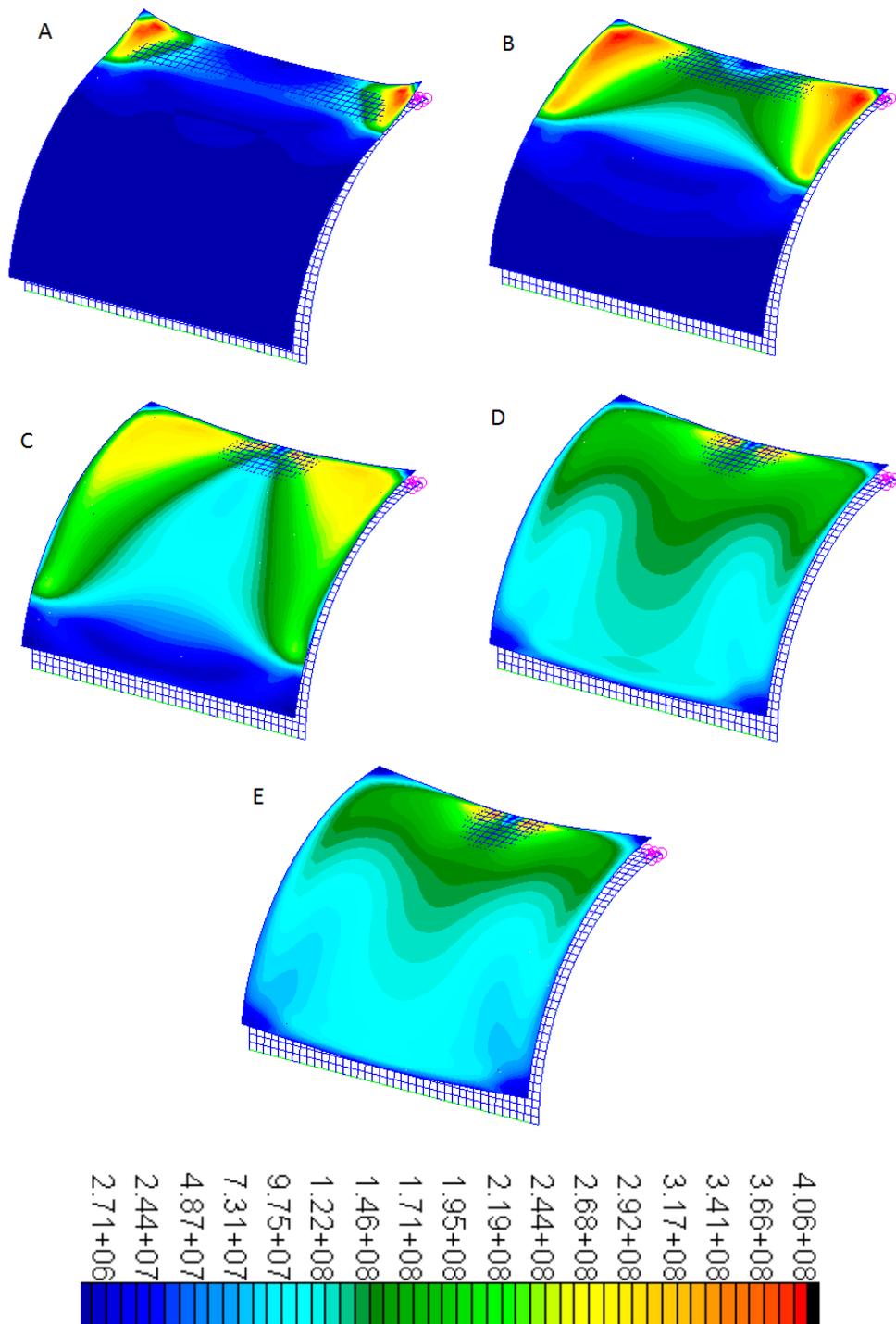


Fig. 5.33: Stress della superficie con angolo sotteso pari a 90° per curvatures finali discordi. In A inizio deformazione, in B e C la propagazione fino allo snap, in D ed E le tensioni post snap.

Anche in questo caso si può notare come nella Figura 5.33, A mostra l'inizio della deformazione, in B e C vi è una formazione ed una successiva propagazione degli stress a seguito di una deformazione, come è già spiegato dovuta all' utilizzo dei BPA.

Una volta avvenuto lo snap in D ed E si nota come gli stress siano uniformati su tutta la superficie anche per spostamenti superiori a quelli che consentono lo snap; ciò appunto a causa della variazione di curvatura che si viene ad avere.

Si passa dunque ad esportare ed analizzare i dati in Matlab.

Per prima cosa si evidenzia la relazione tra forza e spostamento dell'MPC in modo da valutare le caratteristiche che deve poi avere l'SMA.

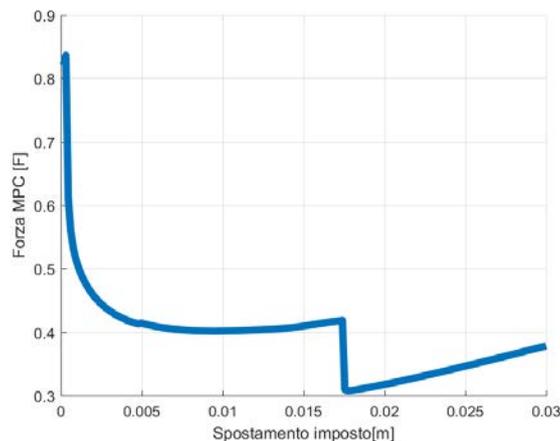


Fig. 5.34: Grafico che mostra la forza agente sul nodo indipendente dell'MPC per riuscire ad ottenere lo spostamento desiderato. Si notano 3 fasi: 1-picco di forza iniziale 2-forza costante 3-rapido decremento

Allo stesso modo della curvatura concorde, anche in questo caso (Figura 5.34) il grafico è caratterizzato da un picco di forza iniziale, poi un rapido decremento e infine un secondo decremento che coincide con il fenomeno dello snap.

Si passa poi ad analizzare la variazione delle curvature durante lo spostamento.

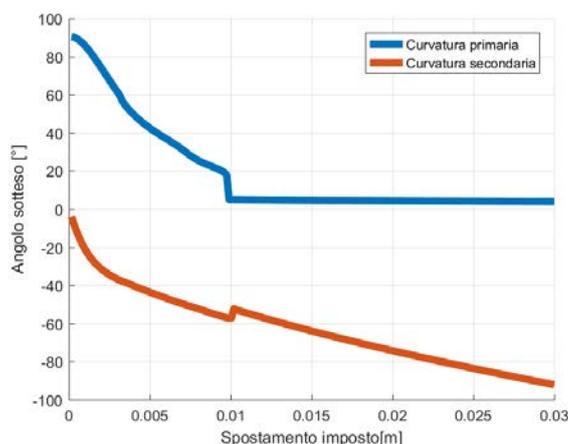


Fig. 5.35: Grafico angolo sotteso spostamento per le due curvatures. La curvatura finale diviene pari a 0 mentre la curvatura secondaria passa da essere nulla nella fase iniziale ad un valore negativo, opposta a quella iniziale.

Il grafico relativo alla curvatura (Figura 5.35) evidenzia come mentre la curvatura primaria diviene pari a 0, la curvatura secondaria aumenta in valore assoluto e in segno opposto alla curvatura iniziale.

Anche in questo caso, come nel caso della curvatura concorde, l'angolo sotteso non arriva mai perfettamente a definire la curvatura finale primaria pari a 0.

Si nota inoltre come la curvatura secondaria aumenti in valore assoluto con l'aumentare dello spostamento, ma, come determinato nelle ipotesi, di segno opposto a quella primaria iniziale.

Una volta verificata la bontà di questo modello si passa ancora una volta a confrontare i risultati appena ottenuti con quelli ottenuti per una superficie di angolo sotteso pari a 60° .

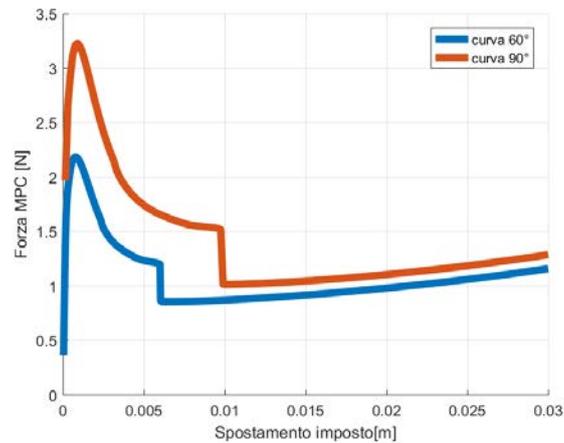


Fig. 5.36: Grafici forza spostamento per due diversi angoli sottesi: 60° e 90° . La forza aumenta con l'aumentare dell'angolo sotteso iniziale.

La Figura 5.36 mostra come in entrambi i modelli siano presenti le quattro fasi che caratterizzano il deployment.

La figura mostra inoltre come sia necessaria una forza maggiore per superfici dall'angolo sotteso maggiori.

E' inoltre di utilità notare come tali valori di forza siano maggiori rispetto a quelli riscontrati nel caso di curvatura concorde; ciò è giustificato dal fatto che è necessaria più forza per ottenere un capovolgimento di superficie.

5.3 Metodo di utilizzo

In questo paragrafo sono studiate possibili configurazioni e metodologie di utilizzo dei dispositivi analizzati in precedenza.

5.3.1 Configurazione accoppiata

Si tenta inizialmente di vedere le interazioni che possono nascere utilizzando più di una superficie in modo da studiare gli effetti di accoppiamento di più di una superficie deformata tramite questo tipo di attuatori.

Per studiare l'effetto di due superfici una accanto all'altra sono utilizzate due superfici di uguali dimensioni pari a 0.1 [m] caratterizzate entrambe da angolo sotteso pari a 90° .

Per simulare il comportamento congiunto sono utilizzati due elementi SMA, uno per ogni superficie, ma il punto centrale del lato libero di ogni superficie è stato collegato tramite un MPC per garantire che entrambe le superfici si deformassero in contemporaneità.

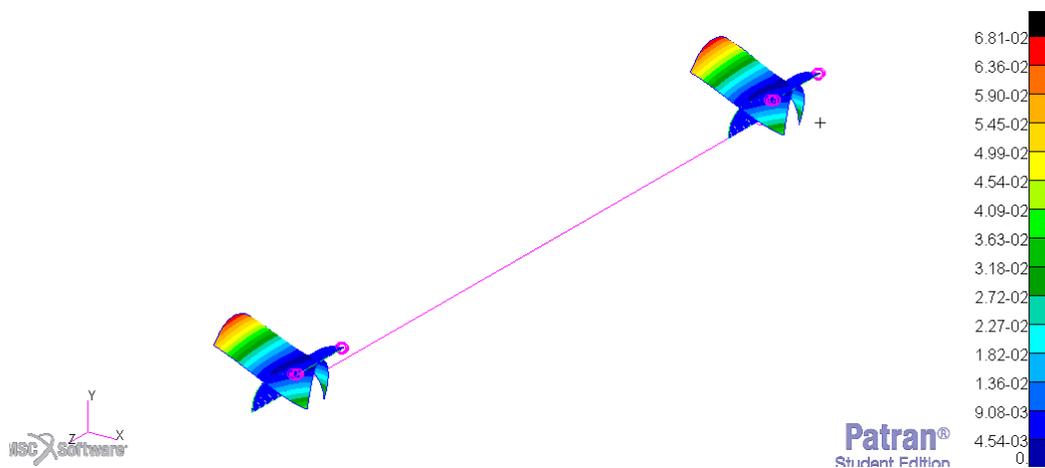


Fig. 5.37: Superfici parallele con curvatura finale concorde. Entrambe le superfici ottengono la curvatura finale desiderata.

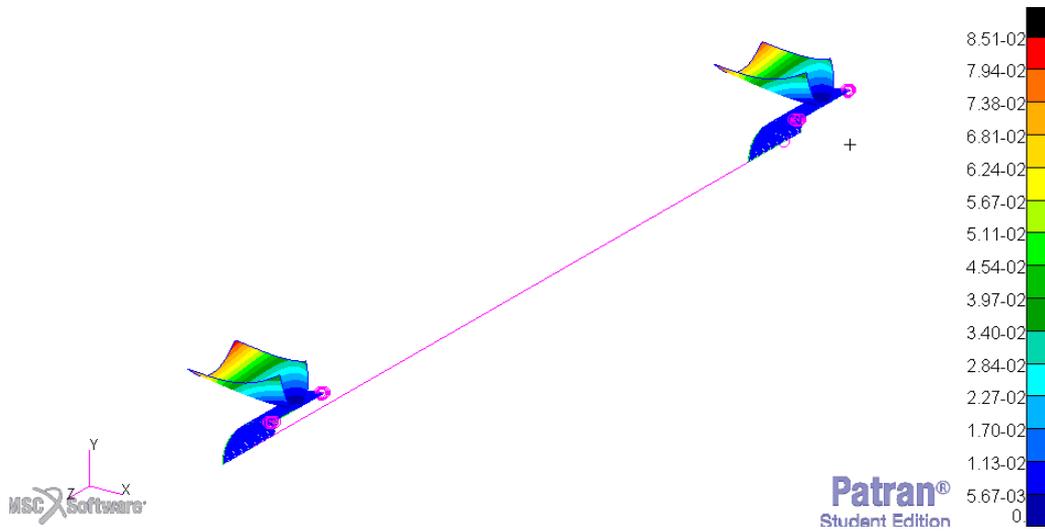


Fig. 5.38: Superfici parallele con curvatura finale discordi. Entrambe le superfici ottengono la curvatura finale desiderata.

Tale tipologia di analisi è stata eseguita sia in caso di configurazione finale dalla curvatura concorde (Figura 5.37) sia nel caso di configurazione finale dalla curvatura discorde (Figura 5.38).

Tale analisi consente inoltre di comparare i grafici delle forze tra il caso singolo e accoppiato.

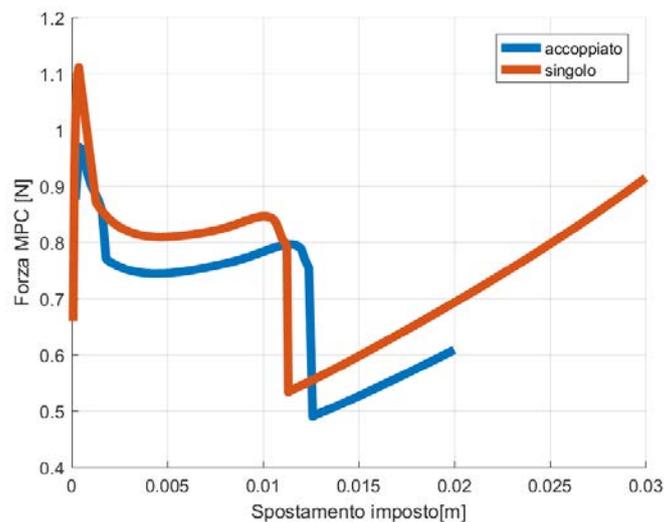


Fig. 5.39: Grafici forza spostamento per modello singolo e accoppiato concorde. Il modello accoppiato necessita di minor forza.

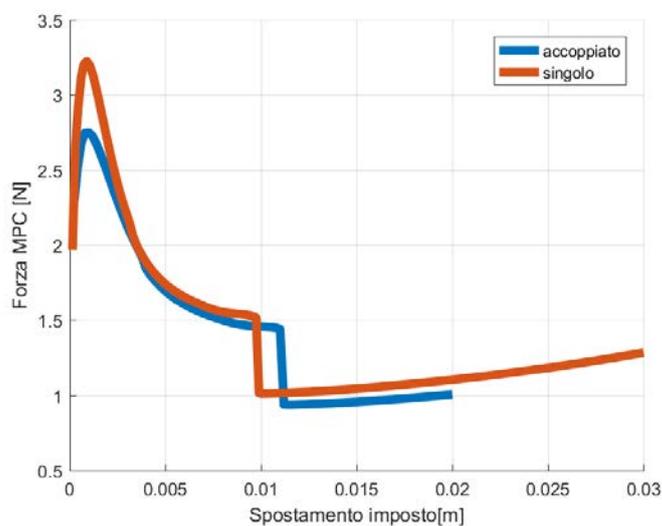


Fig. 5.40: Grafici forza spostamento per modello singolo e accoppiato discorde. Il modello accoppiato necessita di minor forza.

I grafici in Figura 5.39 e 5.40 mostrano come la forza necessaria per lo spostamento nel caso di accoppiamento sia minore rispetto al caso di spostamento singolo; ciò a causa della presenza di due diversi SMA. Nel complesso infatti sarà necessaria più forza per ottenere il movimento di diverse superfici, ma la forza per la singola superficie è minore.

Allo stesso modo sono state analizzate due piastre identiche, poste una sopra l'altra, collegate tramite dei vincoli applicati alle due estremità; ciò consente ad entrambe le curve di deformarsi mediante singolo SMA. Figura 5.3.1

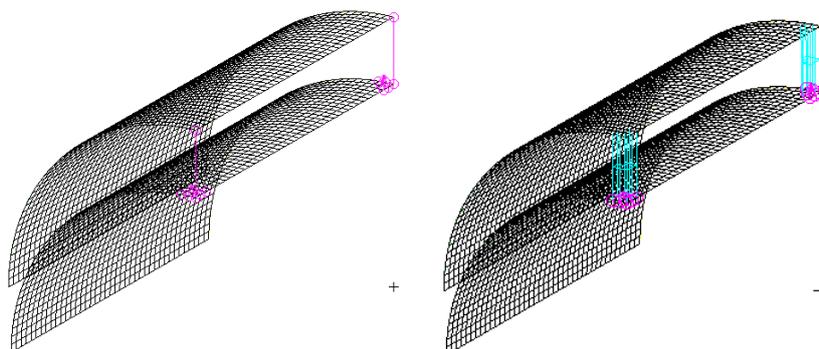


Fig. 5.41: Modello di superfici sovrapposte; a sinistra le superfici collegate tramite MPC, a destra le superfici dalla mesh in comune.

I risultati in Figura 5.3.1 hanno però mostrato come tramite tale configurazione non si riesca ad ottenere un risultato soddisfacente in quanto gli sforzi risultanti sulla superficie non direttamente collegata all' SMA siano più alti del carico limite sopportabile pari a 645 [MPa].

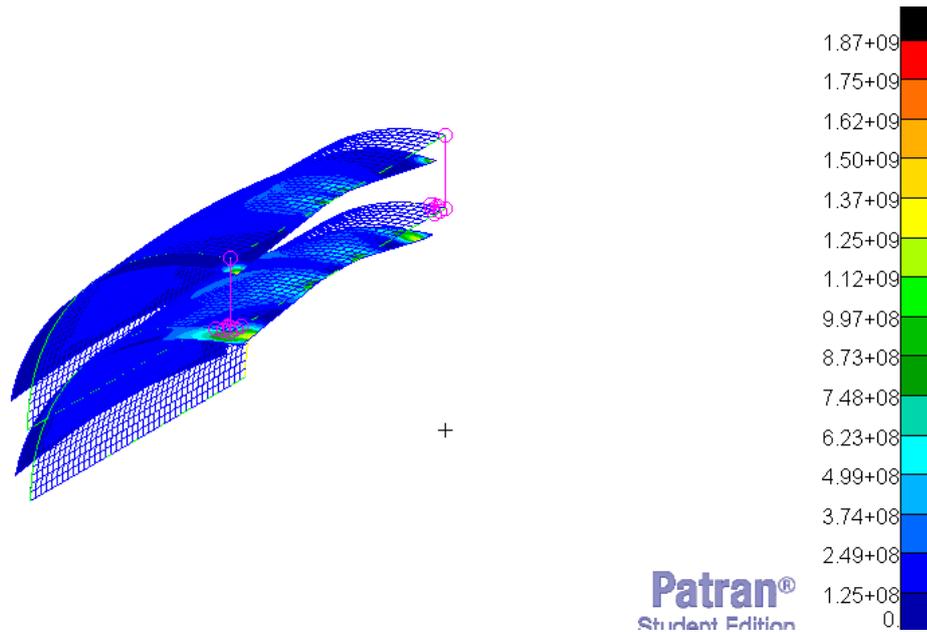


Fig. 5.42: Stress di superfici sovrapposte, gli stress sono maggiori di quelli sopportabili dalla struttura.

Il carico limite della superficie è pari a 1.87 [GPa], dunque lo stress subito dalla struttura è superiore al carico critico di snervamento e quindi non sopportabile dalla stessa.

Tal configurazione non è dunque attuabile.

5.3.2 Peso

Come ultimo controllo è stato creato un modello costituito da un peso attaccato all'estremità della superficie in modo da valutare il dispiegamento. Il peso è stato inserito tramite massa concentrata applicata al nodo illustrato nella Figura 5.43

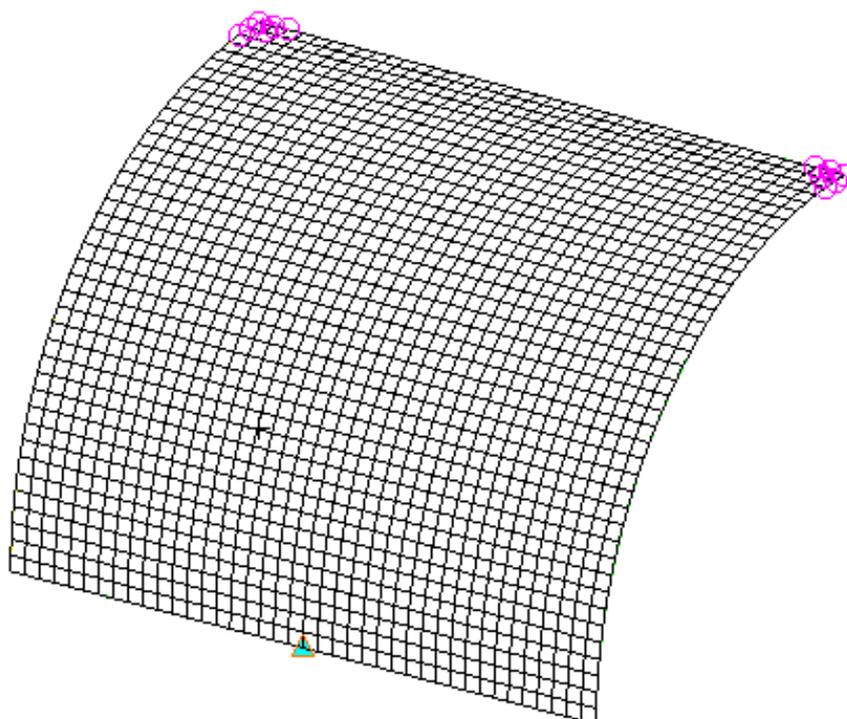


Fig. 5.43: Modello con peso all'estremità (in verde)

Le analisi in un primo momento sono state effettuate senza la considerazione della gravità ed è stato ottenuto lo stesso risultato delle analisi delle superfici normali, ciò viene spiegato dal fatto che il peso del corpo posizionato centrale non modifica la deformazione della superficie che avviene all'estremità.

Diverso è invece il discorso se si tiene in considerazione la forza peso; per implementare questa tipologia di modello è stato inserito un inertial load in direzione y del valore pari a $-9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right]$.

Una volta eseguita l'analisi si è confrontata con quella della superficie senza massa aggiuntiva.

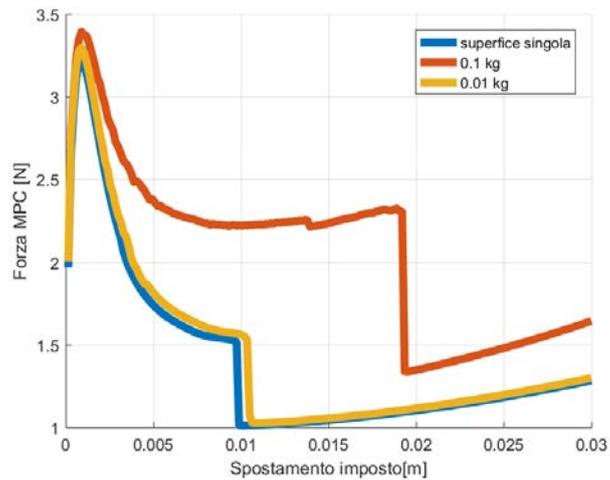


Fig. 5.44: Grafico forza-spostamento tenendo conto della gravità: si nota come pesi dalle piccole dimensioni non influiscano mentre con l'aumentare del peso la forza aumenta

In Figura 5.44 è mostrato il grafico forza-spostamento per quanto riguarda la superficie semplice e due superfici con massa aggiuntiva pari rispettivamente a 0.01 [kg] e 0.1 [kg].

Per valori maggiori di peso si nota come la forza necessaria per ottenere la deformazione richiesta aumenti.

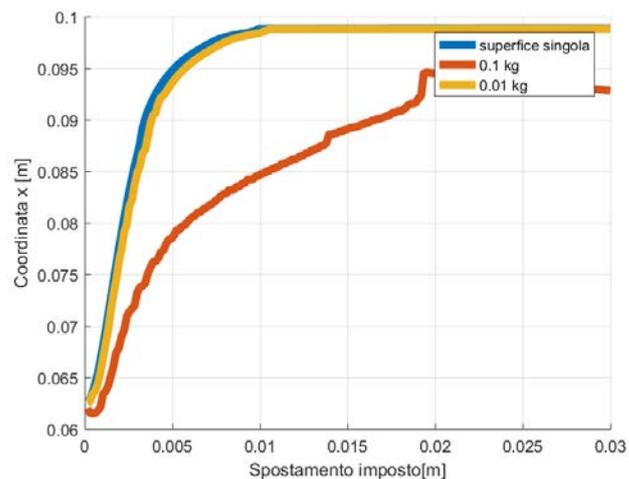


Fig. 5.45: Grafico coordinata x-spostamento per diversi pesi: si nota come pesi dalle piccole dimensioni non influiscano mentre con l'aumentare del peso non si raggiunge perfettamente la distensione completa

Nel Figura 5.45 è invece illustrato il dispiegamento della superficie sempre grazie ai dati del nodo sul lato opposto all'SMA.

Tale grafico ha evidenziato come per valori più alti di peso vi sia un cambiamento per quanto riguarda il dispiegamento; ciò deve essere tenuto in considerazione in sede di dimensionamento.

5.4 Dimensionamento di attuatore shape memory alloy

I grafici che legano forza e spostamento permettono, come già anticipato, di definire le caratteristiche geometriche che deve possedere l'SMA per garantire il corretto spostamento e la forza necessaria.

Prima di determinare la geometria dell'SMA, si ha la necessità di definire la forza che deve possedere per effettuare tale spostamento; per ottenere tali valori si osserva semplicemente il grafico che lega le forze agli spostamenti per una data superficie e si definisce una curva che sia posizionata sempre al di sopra di quella ottenuta dal modello.

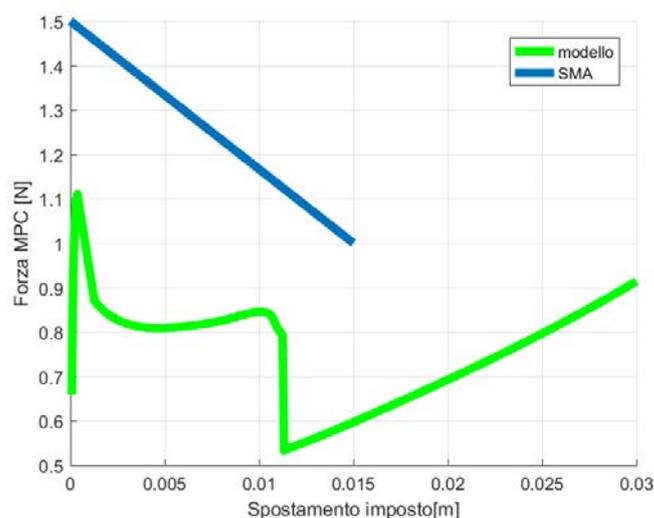


Fig. 5.46: Esempio di forza applicata dall'SMA per la superficie di 90° . La forza dell'SMA deve essere maggiore di quella del modello.

Nella figura è illustrato un esempio del valore di forza e deformazione che deve possedere l'SMA per operare correttamente.

Definiti questi valori si passa al dimensionamento dell'SMA.

Per il materiale dell'SMA si è scelto di utilizzare un SMA al nitinol dalle

seguenti caratteristiche:

Proprietà	valore
Densità ρ	6450[kg/m ³]
Calore specifico C_p	837.36[J/kgK]
Calore latente X	24190.4[J/kg]
Coefficiente convezione h	15[W/m ²]
A_s	70°C
A_f	90°C
M_s	65°C
M_f	45°C
E_m	28[GPa]
E_A	83[GPa]
ν	0.3
Inizio detwinning martensite	$\tau_s^{cr} = 114[MPa]$
Fine detwinning martensite	$\tau_f^{cr} = 72.4[MPa]$
γ_L	0.05

Tab. 5.2: Tabella che definisce le proprietà dell'SMA al nitinol [32]

A partire dalle proprietà del nitinol e conoscendo i valori di forza e spostamento desiderati, si vogliono ricavare i 3 parametri geometrici:

1. d =diametro del filo
2. D =diametro molla
3. n =numero di avvolgimenti.

Per prima cosa dunque è stato creato un file Matlab che consenta di definire questi tre parametri utilizzando le formule descritte ed ottenute nel capitolo 3.

Per semplificare la definizione dei parametri sono stati utilizzati dei valori convenzionali per quanto riguarda d ed n , infatti solitamente gli SMA hanno un diametro del filo dell'ordine delle centinaia di micrometri, mentre il numero di avvolgimenti solitamente è pari ad una ventina; per la nostra analisi sono stati scelti questi valori:

1. $d=0.318[mm]$
2. $N=20$.

che sono poi inseriti all'interno della formula per ottenere il valore di diametro della molla.

Per ottenere il terzo valore, D , sono utilizzate le espressioni ottenute in precedenza: quella classica ovvero modello elastico e quella ottenuta dal modello a due stadi.

Per quanto riguarda il modello elastico è stata utilizzata la formula classica:

$$\delta = \frac{8FD^3N}{d^4}(1/G_M - 1/G_A) = F \frac{8D^3N(G_A - G_M)}{d^4G_MG_A} \quad (5.2)$$

mentre per quanto riguarda il modello a due vie sono state utilizzate le due formule:

$$F = \frac{G_A d^4 \cos^3 \alpha_i}{8D^3N(\cos^2 \alpha_f(\cos^2 \alpha_f + \sin^2 \alpha_f/(1 + \nu)))} \delta_A \quad (5.3)$$

$$F = \frac{G_M d^4 \cos^3 \alpha_i}{8D^3N(\cos^2 \alpha_f(\cos^2 \alpha_f + \sin^2 \alpha_f/(1 + \nu)))} \delta_M - \frac{\pi d^3}{8D} G_M \gamma_L \xi_S \quad (5.4)$$

L'utilizzo delle formule necessita però la conoscenza delle forze massime che vanno applicate per garantire il deployment.

Le forze massime inserite nel file Matlab corrispondono a quelle trovate in precedenza ottenute dal grafico delle forze.

Poichè gli spostamenti desiderati equivalgono solamente ad un nodo per la realizzazione pratica si ha la necessità di utilizzare due SMA per ottenere lo spostamento finale, uno collegato ad ogni angolo della superficie e in mezzeria.

Curvatura concorde	N	$d[\mu m]$	$D_{\text{elastico}}[mm]$	$D_{\text{due vie}}[mm]$
60°	20	318	3,404	3,146
90°	20	318	2,957	2,748
180°	20	318	1,899	1,982
Curvatura discorde	N	$d[\mu m]$	$D_{\text{elastico}}[mm]$	$D_{\text{due vie}}[mm]$
60°	20	318	2,209	2,318
90°	20	318	1,886	2,072

Tab. 5.3: Tabella che definisce i parametri geometrici dell'SMA per diverse superfici.

Nella Tabella 5.3 vengono riassunti i dati ottenuti dal file matlab sia per quanto riguarda il dimensionamento del modello con curvatura finale concorde, sia per quello dalla curvatura finale discorde.

Una volta definite le caratteristiche fisiche del modello si passa poi alla parte di modellazione termica che consente di ottenere il tempo di dispiegamento di tale superficie.

Per quanto riguarda le formule si utilizzano quelle ottenute nel capitolo 3:

$$\Delta t = \frac{-\rho V C_{MA}}{hA} \ln \frac{T_2 - \left(\frac{I^2 R}{hA} + T_{\text{amb}}\right)}{T_1 - \left(\frac{I^2 R}{hA} + T_{\text{amb}}\right)} \quad (5.5)$$

per il passaggio da martensite ad austenite e quindi per passaggio dalla superficie iniziale a quella finale.

$$\Delta t_{AM} = \frac{-\rho V C_{AM}}{hA} \ln \frac{M_f - T_{\text{amb}}}{M_s - T_{\text{amb}}} \quad (5.6)$$

per il ritorno alla configurazione iniziale.

Le costanti termiche utilizzate sono quelle riassunte in Tabella 5.2.

L'area e il volume del SMA sono ottenute semplicemente tramite i parametri precedentemente calcolati considerando come il filo sia formato esclusivamente dalla molla senza materiale in esubero.

Per quanto riguarda la corrente sono state prese in esame diverse intensità di corrente, pari a 1,1.5 e 2 [A] in modo da verificare il modello e osservare come si modificano i tempi di dispiegamento.

I risultati sono elencati nella Tabella 5.4.

Come era lecito aspettarsi con intensità di corrente maggiori il tempo di dispiegamento diminuisce.

E' poi interessante notare come molle dal diametro maggiore abbiano tempi di dispiegamento minori a causa del valore maggiore di resistenza; ciò ovviamente considerando il sistema ideale senza perdite.

Tempo di dispiegamento [s]			
Curvatura concorde	$I = 1[A]$	$I = 1.5[A]$	$I = 2[A]$
60°	8.62	3.17	1.68
90°	8.55	3.15	1.67
180°	7.32	2.77	1.48
Curvatura discorde	$I = 1[A]$	$I = 1.5[A]$	$I = 2[A]$
60°	7.27	2.75	1.47
90°	6.84	2.61	1.40

Tab. 5.4: Tabella che definisce i tempi di dispiegamento e ritorno per diverse superfici e diversi valori di corrente

Per quanto riguarda i tempi di ritorno elastico sempre con i valori geometrici sopra riportati sono calcolati i valori per quanto riguarda il raffreddamento dell'SMA, che sono illustrati in Tabella 5.5.

I risultati come si può vedere sono identici poichè, date le dimensioni ridotte dello strumento, il tempo per il raffreddamento non ha grosse variazioni.

Tempo di ritorno[s]			
Curvatura concorde	$I = 1[A]$	$I = 1.5[A]$	$I = 2[A]$
60°	41.12	41.12	41.12
90°	41.12	41.12	41.12
180°	41.12	41.12	41.12
Curvatura discorde	$I = 1[A]$	$I = 1.5[A]$	$I = 2[A]$
60°	435	435	435
90°	435	435	435

Tab. 5.5: Tabella che definisce i tempi di dispiegamento e ritorno per diverse superfici e diversi valori di corrente

Una volta dimensionato l'SMA si è quindi riusciti ad ottenere il sistema desiderato.

6. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questa tesi sono state studiate ed analizzate le principali caratteristiche che consentono il movimento ad una pianta, e si è ricercata una metodologia che consentisse l'ideazione di un attuatore plant inspired per nuove strategie di deployment.

Dopo un attento studio è stato individuato il sistema ideale nella chiusura della pianta carnivora Venus Flytrap e da tale metodologia si è partiti per definire e studiare l'attuatore.

Poichè la chiusura avviene tramite snap con conseguente cambio di curvatura si è ricercato un sistema analogo per ottenere un movimento analogo; il risultato della ricerca è stato lo studio di una struttura semicilindrica dotata di curvatura primaria che, per mezzo di attuatori di tipo SMA, riesce a modificare le sue caratteristiche ottenendo una curvatura primaria pari a 0 ed una curvatura secondaria diversa da 0; lo studio si è concentrato su strutture capaci di realizzare curvature secondarie sia di segno concorde sia di segno discorde rispetto a quella iniziale.

Per garantire il corretto funzionamento degli SMA è stato utilizzato un bend propagation actuator posizionato ad una estremità della superficie, in modo da garantire la corretta variazione di curvatura.

Per definire il valore di forza e di spostamento necessario sono state eseguite delle simulazioni non lineari agli elementi finiti e i valori ottenuti sono stati utilizzati per dimensionare correttamente gli SMA, sia dal punto di vista meccanico che da quello termico.

Nello studio effettuato, al fine di mantenere la configurazione dispiegata, risulta necessario controllare la temperatura degli SMA; studi futuri prenderanno in esame la possibilità di impiegare degli SMA bistabili o lo sviluppo di sistemi meccanici di bloccaggio che si azionano una volta che il dispiegamento si sia realizzato.

Infine, richiederà ulteriori analisi lo studio della dinamica del deployment al fine di individuare delle strategie per garantire un moto di apertura (e chiusura) caratterizzato da velocità ed accelerazioni contenute.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sung-Min An, Junghyun Ryu, Maenghyo Cho, and Kyu-Jin Cho. Engineering design framework for a shape memory alloy coil spring actuator using a static two-state model. *Smart Materials and Structures*, 21(5):055009, 2012.
- [2] Esempi di biomimetica. <https://www.greenme.it/informarsi/natura-a-biodiversita/8227-biomimetica>.
- [3] Kyu-Jin Cho. *Bend Propagating Actuation Utilizing a Characteristic of Developable Surface of Bistable Structure*. PhD thesis, Seoul National University, 2016.
- [4] Diego Colombo. Teoria ed applicazioni delle leghe a memoria di forma. *Università di Trento*, 1999.
- [5] Informazioni sul crystal palace di londra. <https://www.livingdmore.com/crystal-palace-architettura-biomimetica>.
- [6] Charles Darwin and Francis Darwin. *Insectivorous plants*. J. Murray, 1888.
- [7] Florence Dewalque. *Nonlinear analysis of compliant deployable structures: modelling, simulation and experimental validation*. PhD thesis, Università Liegi, 2017.
- [8] Jacques Dumais and Yoël Forterre. “vegetable dynamicks”: the role of water in plant movements. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 44:453–478, 2012.
- [9] M Follador, M Cianchetti, A Arienti, and C Laschi. A general method for the design and fabrication of shape memory alloy active spring actuators. *Smart Materials and Structures*, 21(11):115029, 2012.
- [10] Yoël Forterre, Jan M Skotheim, Jacques Dumais, and Lakshminarayanan Mahadevan. How the venus flytrap snaps. *Nature*, 433(7024):421, 2005.

-
- [11] Peter J Franks, Thomas N Buckley, Joseph C Shope, and Keith A Mott. Guard cell volume and pressure measured concurrently by confocal microscopy and the cell pressure probe. *Plant Physiology*, 125(4):1577–1584, 2001.
- [12] Kazuhisa Kameyama, Yoshiro Kishi, Masanori Yoshimura, Nobuyuki Kanzawa, Masazumi Sameshima, and Takahide Tsuchiya. Tyrosine phosphorylation in plant bending. *Nature*, 407(6800):37, 2000.
- [13] E Kedadze, SD Guest, and S Pellegrino. Bistable prestressed shell structures. *International Journal of Solids and Structures*, 41(11-12):2801–2820, 2004.
- [14] Ritesh A Khire, Steven Van Dessel, Achille Messac, and Anoop A Mullur. Study of a honeycomb-type rigidified inflatable structure for housing. *Journal of Structural Engineering*, 132(10):1664–1672, 2006.
- [15] Sangbae Kim, Elliot Hawkes, Kyujin Choy, Matthew Joldaz, Joe Foley, and Robert Wood. Micro artificial muscle fiber using niti spring for soft robotics. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2228–2234. IEEE, 2009.
- [16] Seung-Won Kim, Je-Sung Koh, Maeng-Hyo Cho, and Kyu-Jin Cho. Soft morphing motion of flytrap robot using bending propagating actuation. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 18(3):168–174, 2012.
- [17] Seung-Won Kim, Je-Sung Koh, Jong-Gu Lee, Junghyun Ryu, Maenghyo Cho, and Kyu-Jin Cho. Flytrap-inspired robot using structurally integrated actuation based on bistability and a developable surface. *Bioinspiration & biomimetics*, 9(3):036004, 2014.
- [18] Suyi Li and KW Wang. Plant-inspired adaptive structures and materials for morphing and actuation: a review. *Bioinspiration & biomimetics*, 12(1):011001, 2016.
- [19] Jianzuo Ma, Haolei Huang, and Jin Huang. Characteristics analysis and testing of sma spring actuator. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 2013.
- [20] Vladislav S Markin, Alexander G Volkov, and Emil Jovanov. Active movements in plants: mechanism of trap closure by *dionaea muscipula* ellis. *Plant signaling & behavior*, 3(10):778–783, 2008.

-
- [21] Park S Nobel et al. *Physicochemical & environmental plant physiology*. Academic press, 1999.
- [22] Birgit Nordbring-Hertz, Hans-Börje Jansson, and Anders Tunlid. Nematophagous fungi. *Encyclopedia of life sciences*, 10, 2006.
- [23] M Pagitz, E Lamacchia, and JMAM Hol. Pressure-actuated cellular structures. *Bioinspiration & biomimetics*, 7(1):016007, 2012.
- [24] Alberto Paiva and Marcelo Amorim Savi. An overview of constitutive models for shape memory alloys. *Mathematical problems in engineering*, 2006, 2006.
- [25] Etienne Patoor, Dimitris C Lagoudas, Pavlin B Entchev, L Catherine Brinson, and Xiujie Gao. Shape memory alloys, part i: General properties and modeling of single crystals. *Mechanics of materials*, 38(5-6):391–429, 2006.
- [26] KA Seffen and S Pellegrino. Deployment dynamics of tape springs. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, volume 455, pages 1003–1048. The Royal Society, 1999.
- [27] Jan M Skotheim and Lakshminarayanan Mahadevan. Physical limits and design principles for plant and fungal movements. *Science*, 308(5726):1308–1310, 2005.
- [28] Bohumír Strnadel, S Ohashi, H Ohtsuka, S Miyazaki, and T Ishihara. Effect of mechanical cycling on the pseudoelasticity characteristics of ti ni and ti ni cu alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 203(1-2):187–196, 1995.
- [29] Storia del velcro. <http://www.swissinfo.ch/eng/how-a-swiss-invention-hooked-the-world/5653568>.
- [30] Roelof Vos and Ron Barrett. Mechanics of pressure-adaptive honeycomb and its application to wing morphing. *Smart Materials and Structures*, 20(9):094010, 2011.
- [31] Shane Yates. *Structural and Smart Materials Analysis in Responsive Architectural and Textile Mechanical Applications*. PhD thesis, 2012.
- [32] Shane J Yates and Alexander L Kalamkarov. Experimental study of helical shape memory alloy actuators: effects of design and operating

-
- parameters on thermal transients and stroke. *Metals*, 3(1):123–149, 2013.
- [33] Mingqian Zhang, Shile Feng, Lei Wang, and Yongmei Zheng. Lotus effect in wetting and self-cleaning. *Biotribology*, 5:31–43, 2016.
- [34] Guo Li Zhu and John S Boyer. Enlargement in chara studied with a turgor clamp: growth rate is not determined by turgor. *Plant Physiology*, 100(4):2071–2080, 1992.

