

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Spaziale



**PROGETTAZIONE DI ATTUATORI SMA IN CONFIGURAZIONE
ANTAGONISTA: SVILUPPO DI UN DIMOSTRATORE
TECNOLOGICO PER USO SPAZIALE**

Relatore: Prof. Giuseppe SALA

Co-relatori: Ing. Paolo BETTINI
Dott.ssa Elena VILLA

Tesi di Laurea di:

Manuele MOSCHETTI Matr. 734256

Anno Accademico 2011 - 2012

*A Francesca,
il mio unico grande amore
A mia mamma e a Michele,
per il loro infinito sostegno*

Sommario

In questa tesi si è sviluppata la modalità di attuazione per la movimentazione di un dimostratore tecnologico esapode per uso spaziale, focalizzandosi sulla possibile sostituzione dei classici motori elettrici con fili in lega a memoria di forma, materiale noto per le elevate prestazioni tecnologiche in termini di rapporto potenza/peso.

In particolare, si sono analizzate le performance ottenibili con questo tipo di attuatori, caratterizzandoli sia per mezzo di tecniche classiche (analisi DSC e DMA), sia attraverso metodologie non convenzionali, ovvero ponendo i fili in configurazione antagonista.

Il contributo innovativo di questo lavoro risiede infatti nello studio approfondito della caratterizzazione dell'antagonismo, argomento ad oggi ancora poco sviluppato, ma che sta riscuotendo un notevole interesse (soprattutto quando si ha a che fare con la mancanza di forzanti esterne in grado di riportare il sistema nella posizione originale).

I risultati dei test sperimentali sono stati dunque elaborati ed utilizzati per la progettazione della zampa robotica (presupponendo condizioni ambientali di assenza di gravità) per verificare la fattibilità e proporre eventuali sviluppi futuri del rover, o al contempo essere un punto di partenza per nuove applicazioni.

Parole chiave: attuatori, Nitinol, leghe a memoria di forma, SMA antagonisti, robotica.

Abstract

In the following thesis, the actuation method for the movimentation of a hexapod technology demonstrator for space utilization has been implemented. The work focuses on the replacement of the classic electric motors with shape memory alloy wires, a material known for its excellent benefits in terms of its technological power to weight ratio.

In particular, the performance obtainable with this type of actuators has been analyzed, characterizing them through both classical techniques (DSC and DMA analysis) and unconventional methods, ie by placing the wires in antagonistic configuration.

In fact, the innovative contribution of this work lies in the in-depth study of the antagonism characterization, a subject that still until today has not been developed, but that is gaining a considerable interest (especially when it has to deal with the lack of external forces that can restore the system into the original position).

The results of experimental tests has been processed and used for the design of a robotic leg (assuming environmental conditions of weightlessness) in order to verify the feasibility and to propose further developments of the rover, or at the same time be a starting point for new applications.

Keywords: actuators, Nitinol, shape memory alloys, antagonistic SMAs, robotics.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare sentitamente il professor Giuseppe Sala, con il quale ho avuto il piacere di sostenere la bellezza di due esami e due tesi: credo che pochi studenti possano vantarsi di aver raggiunto questo traguardo.

Doverosi ringraziamenti sono rivolti ai miei co-relatori, l'Ing. Paolo Bettini e la Dott.ssa Elena Villa, per avermi supportato e sopportato dall'inizio alla fine, ricevendo consigli preziosi, oltre che per la stesura di questa trattazione, anche per la vita fuori dal contesto universitario: l'interesse per la materia è tramutato in entusiasmo soprattutto per merito loro.

Un grazie anche al professor Luca Di Landro e a tutto il personale del laboratorio di Tecnologie del Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, ed in particolare all'Ing. Silvio Ferragina e all'Ing. Paolo Rubini per aver messo a mia disposizione praticamente un intero capannone (anche se le prove a fatica hanno logorato psiche e udito), oltre che a Sandro Mottironi per il suo fondamentale contributo - insieme a Luca ed Erika - nelle fasi finali.

Non possono mancare gli omaggi ai validi tecnici dell'officina, Antonio Ravenna e Roberto Bertè, per aver soddisfatto ogni mia esigenza, e soprattutto perché con loro ho passato i momenti migliori del periodo di tesi, sdrammatizzando ogni qual volta mi fossi sentito un po' giù di morale.

Ed eccoci ai compagni di merende... Paolo, Ricky e Dimpo, senza dimenticare Michel, Stephane, Mike e tutti gli altri: con voi sono cresciuto anche come uomo, mi avete costantemente aiutato e sostenuto in circostanze difficili, perciò rimarranno indelebili le giornate trascorse dentro queste quattro mura. Vi auguro di cuore il miglior futuro e la più florida carriera.

Infine, un abbraccio alle persone più importanti: a mia mamma e a mio fratello per aver sempre creduto in me, a tutti i parenti e agli amici, a Lorenzo, Patrizia e alla loro splendida figlia Francy (non ho più parole per descrivere il mio amore per lei, dato che da quel giorno del 24 aprile 2002 siamo sempre rimasti uniti ed indissolubili. Ti amo).

Indice

Introduzione	1
1 Il progetto N.E.Me.Sys	5
1.1 Stato dell'arte	5
1.2 N.E.Me.Sys e le leghe a memoria di forma	9
2 Leghe a memoria di forma	11
2.1 Caratteristiche e peculiarità	11
2.2 L'utilizzo delle SMA: il Nitinol	15
2.3 Attuatori antagonisti con leghe SMA	16
2.4 Ciclo preparatorio per attuatori antagonisti	18
3 Prove di caratterizzazione	23
3.1 Analisi DSC	23
3.2 Analisi DMA	27
3.2.1 Strain Recovery vs T: misura della deformazione a carico fisso e al variare della temperatura	28
3.2.2 Stress vs strain: misure di deformazioni e stress relativi in isoterma	32
3.3 Caratterizzazione dell'antagonismo	35
3.3.1 Allestimento del banco di prova	35
3.3.2 Installazione dei fili	41
3.3.3 Alimentazione	42
3.3.4 Acquisizione dati	48
3.3.5 Risultati dei test	51
4 Progettazione della zampa	63
4.1 Scelta della soluzione di progetto	63

4.2	Studio del posizionamento dei fili SMA	67
4.2.1	Tibia	67
4.2.2	Femore	71
4.2.3	Anca	73
4.3	Modellazione dei componenti	76
4.4	Realizzazione della zampa	81
4.5	Questioni aperte	83
4.5.1	Rotazione dell'anca	83
4.5.2	Autosostentamento	84
5	Validazione sperimentale	89
5.1	Set-up preliminare	89
5.1.1	Preparazione dei fili	89
5.1.2	Sistema per la misurazione della rotazione	90
5.1.3	Circuito di alimentazione	91
5.2	Esecuzione delle prove	93
5.2.1	Obiettivi	93
5.2.2	Risultati: Tibia	95
5.2.3	Risultati: Femore	97
5.2.4	Risultati: Anca	100
5.2.5	Risultati: Alzata combinata	102
6	Conclusioni e sviluppi futuri	105
	Appendice	109
	Bibliografia	119

Elenco delle figure

1.1	Primo modello di Nemesys (MK I)	6
1.2	Ultimo modello di Nemesys (MK III)	6
1.3	Primo modello della zampa e convenzione degli angoli di rotazione	7
1.4	Modello della zampa installata (MK III)	7
1.5	Suddivisione percentuale delle masse di Nemesys	8
1.6	Modello della zampa per prima attuazione SMA (da [19]) . . .	10
2.1	Fasi della lega SMA al variare delle sollecitazioni esterne . . .	12
2.2	Fasi della lega SMA in funzione dello sforzo applicato e della temperatura	13
2.3	Grafico sforzo/deformazione/temperatura	14
2.4	Caratteristiche fisiche e meccaniche delle SMA maggiormente utilizzate	15
2.5	Comparazione tra le SMA e gli attuatori convenzionali: rap- porto potenza/peso	16
2.6	Possibili configurazioni del comportamento antagonista	17
2.7	Cella unitaria antagonista a flessione (AFC)	18
2.8	Attuazione di una superficie mobile tramite fili SMA antagonisti	18
2.9	Ciclo preparatorio per due fili SMA antagonisti	19
2.10	Ciclo preparatorio: situazione nel grafico $\sigma - \epsilon$	20
3.1	DSC: TA instruments Q100	24
3.2	Analisi DSC: temperature di trasformazione	25
3.3	Analisi DSC: verifica stabilità	26
3.4	DMA: TA instruments Q800	27
3.5	Analisi DMA: grafico deformazione/temperatura a sforzo fissato	29
3.6	Clausius-Clapeyron: A_f	31
3.7	Clausius-Clapeyron: M_s	31

3.8	Analisi DMA: grafico sforzo/deformazione a temperatura fissata	33
3.9	Andamento del modulo elastico al variare della temperatura	34
3.10	Schema della strumentazione utilizzata per il test di caratterizzazione	35
3.11	Specifiche della guida lineare: Misumi mod. BSGM	36
3.12	Laser: Trask Instrumentation mod. 8010v	37
3.13	Diagramma sforzo/deformazione a $T = 25^{\circ}\text{C}$	37
3.14	Diagramma forza/deformazione ottenibile a $T = 25^{\circ}\text{C}$	38
3.15	Pre-deformazione ottenibile considerando il ritorno elastico	38
3.16	Celle di carico per la misurazione della trazione	39
3.17	Modello CATIA dell'assieme del banco di prova	40
3.18	Banco di prova per i test di caratterizzazione	41
3.19	Valore minimo di corrente necessaria per l'attivazione del filo	45
3.20	Tempo necessario per l'attivazione del filo	45
3.21	Tempo necessario per il raffreddamento del filo	46
3.22	Tempo necessario per l'attivazione del filo: ambiente spaziale	47
3.23	Tempo necessario per il raffreddamento del filo: ambiente spaziale	48
3.24	Software di acquisizione dati	49
3.25	Corrente ideale VS. corrente erogata	50
3.26	Corrente ideale VS. corrente erogata: particolare	50
3.27	Performance a fatica per i fili scelti	52
3.28	Caso 1: pre-deformazione filo 1 al 3%	53
3.29	Caso 1: pre-deformazione filo 1 al 4%	53
3.30	Caso 1: pre-deformazione filo 1 al 5%	54
3.31	Caso 2: pre-deformazione entrambi i fili al 3%	55
3.32	Caso 2: pre-deformazione entrambi i fili al 4%	56
3.33	Caso 2: pre-deformazione entrambi i fili al 5%	56
3.34	Caso 3: pre-deformazione filo 1 al 3.5%	57
3.35	Caso 3: pre-deformazione filo 1 al 4%	58
3.36	Caso 3: pre-deformazione filo 1 al 5%	58
3.37	Legenda per i punti notevoli	59
3.38	Risultati globali della prova 'standard'	60
3.39	Valori medi dei punti notevoli	61
4.1	Piastre esterne e fili SMA	64
4.2	Modello 'filo passante'	65
4.3	Filo e molla di richiamo	65
4.4	Sistema interno di pulegge	66
4.5	Convenzioni e angoli per la tibia	67
4.6	Supporto isolante per l'uscita del filo	69
4.7	Punti di ancoraggio per la tibia VS. angolo ottenuto	70

4.8	Convenzioni e angoli per il femore	71
4.9	Punti di ancoraggio per il femore VS. angolo ottenuto	73
4.10	Convenzioni e angoli per l'anca	74
4.11	Punti di ancoraggio per l'anca VS. angolo ottenuto	75
4.12	Modello della zampa (seconda revisione) e del payload	76
4.13	Primo modello della zampa attuata mediante SMA (da [19])	77
4.14	Struttura primaria della zampa: tubolari	78
4.15	Elementi di collegamento per i tratti di zampa	78
4.16	Cerniere: perni, pulegge e distanziali	79
4.17	Particolare della cerniera	79
4.18	Modello solido della zampa completa	80
4.19	Rotazioni teoriche desiderate per l'alzata e l'avanzata	80
4.20	Visione globale della zampa (1)	81
4.21	Visione globale della zampa (2)	82
4.22	Soluzione per l'arcata completa	83
4.23	Sistema ad aste ipotizzato per il calcolo	85
5.1	Amplificatore operazionale in configurazione non invertente	91
5.2	Circuito elettrico progettato per l'alimentazione di due coppie di fili	92
5.3	Sequenza di rotazione della tibia	95
5.4	Storia temporale dell'angolo di rotazione della tibia	96
5.5	Sequenza di rotazione del femore	97
5.6	Storia temporale dell'angolo di rotazione del femore	98
5.7	Storia temporale dell'angolo di rotazione del femore (2)	99
5.8	Sequenza di rotazione dell'anca	100
5.9	Storia temporale dell'angolo di rotazione dell'anca	101
5.10	Sequenza di rotazione dell'alzata combinata	102

Elenco delle tabelle

1.1	Variazione della massa di Nemesys nel corso delle revisioni . . .	8
1.2	Caratteristiche dei motori elettrici	9
3.1	Temperature di trasformazione: NiTi SmartFlex 0.20 mm . . .	25
3.2	Valori di recupero di deformazione al variare del livello di sforzo	29
3.3	Temperature di trasformazione di fase al variare del livello di sforzo	30
3.4	Condizioni di pre-montaggio scelte per i test di caratterizzazione dell'antagonismo	51
3.5	Risultati globali della prova 'standard'	59
3.6	Punti notevoli mediati per la prova 'standard' al 4%	61
4.1	Tabella comparativa per le soluzioni di progetto	65
4.2	Dimensionamento fili per la tibia	70
4.3	Dimensionamento fili per il femore	72
4.4	Dimensionamento fili per l'anca	75
4.5	Autosostentamento: filo singolo in condizioni martensitiche . .	86
4.6	Autosostentamento: filo singolo in condizioni austenitiche . . .	87
4.7	Autosostentamento: filo doppio in condizioni martensitiche . .	87

Introduzione

Motivazioni ed obiettivi

Oggi, sono svariati i dispositivi aventi come obiettivo primario un classico movimento di andata e ritorno alla posizione originaria: si pensi per esempio ai bracci robotici delle aziende per la grande produzione in serie, piuttosto che ai meccanismi che portano alla rotazione di alcune superfici mobili dei velivoli, o in generale ad una qualsiasi struttura contenente giunti rotativi. Generalmente lo scopo può essere raggiunto inserendo un attuatore bidirezionale o, in maniera equivalente, adoperandone due che lavorano in contrapposizione, compiendo cioè movimenti in versi opposti.

Un'alternativa a questo espediente è quello di utilizzare una cosiddetta coppia di attuatori *antagonisti*, specialmente quando si ha a che fare con la mancanza di forzanti in grado di riportare il sistema allo stato iniziale, o nel momento in cui si desidera utilizzare un sistema ibrido attivo/passivo: prendendo spunto da uno degli esempi fatti in precedenza, si potrebbe scegliere di utilizzare un motore elettrico per ruotare il braccio robotico di un angolo prestabilito e - per riportarlo alla condizione di partenza - sfruttare la forza elastica di richiamo esercitata da una molla collegata appositamente.

Entrando nel mondo delle nuove tecnologie, la categoria di attuatori più prestanti in termini di rapporto potenza/peso è senza alcun dubbio quella rappresentata dalle leghe a memoria di forma (in sigla SMA), una classe di *'smart materials'* che sta ampliando via via il ventaglio dei campi di applicazione grazie ai notevoli vantaggi intrinseci e alle differenti modalità d'utilizzo in cui possono essere sperimentati. Una delle problematiche associate alle leghe SMA però (oltre al fatto che devono essere necessariamente caratterizzate in modo approfondito per identificarne i parametri funzionali) è l'esigenza di dover deformare il materiale, *armandolo*, per poterlo successivamente attivare e sviluppare forze o movimenti desiderati.

In assenza di forze esterne (come ad esempio la forza peso, tipicamente associata all'uso di questi attuatori) tale obiettivo è difficilmente raggiungibile: anche in questo caso una soluzione potrebbe essere quella di porre una

molla o un analogo componente in serie alla SMA, facendoli perciò lavorare ciclicamente in antagonismo.

Spingendosi ancor oltre, si potrebbe pensare di collegare due attuatori SMA identici in modo da simulare un antagonismo *puro* e ottenere così un sistema autoconsistente: le motivazioni che stanno alla base dello sviluppo di questa tesi quindi risiedono innanzitutto nel migliorare la conoscenza del comportamento delle leghe a memoria di forma, ed in particolare dei fili in Nitinol, se utilizzati in questa configurazione non convenzionale.

Di non secondaria importanza è poi la messa in pratica di questi studi teorici per sviluppare una possibile applicazione, come ad esempio la movimentazione di una zampa robotica in condizioni di assenza di gravità.

E' in questa circostanza infatti che si è pensato di tracciare le basi per l'eventuale sostituzione dei motori elettrici di *Nemesys* - un dimostratore esapode per esplorazione planetaria sviluppato al Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Milano - con questo tipo di attuatori, migliorandone così il rapporto potenza/peso.

Partendo dai risultati ottenuti dalle tesi precedenti (in particolar modo si veda [19]), con questo lavoro ci si pone una serie di possibili obiettivi da raggiungere, ovvero si cercherà di:

1. Verificare ulteriormente la fattibilità dell'attuazione mediante fili in lega a memoria di forma;
2. Eseguire una serie di prove di caratterizzazione del materiale (sia standard che di tipo non convenzionale) per capire appieno il funzionamento, le prestazioni, gli aspetti positivi e negativi che l'uso delle leghe a memoria di forma comporta;
3. Progettare il dimostratore in modo tale che sia indipendente dalle forzanti esterne (studio in assenza di gravità) come primo spunto per successive modifiche una volta definito l'ambiente operativo;
4. Considerare tutti e 3 i gradi di libertà della zampa (2 giunti rotativi per l'alzata e 1 per l'avanzata) in maniera indipendente;
5. Ottimizzare l'attuatore, calcolando la minima lunghezza necessaria per il raggiungimento della rotazione imposta;
6. Migliorare il cinematismo, ponendo l'attenzione sulle modalità di riduzione degli attriti;
7. Diminuire la potenza necessaria, valutando preliminarmente il bilancio termico agente sul filo in lega a memoria di forma e l'evoluzione della temperatura nel tempo;

8. Studiare possibili soluzioni per i problemi termici associati all'utilizzo delle leghe a memoria di forma in campo spaziale (riscaldamento, raffreddamento, tempi di attuazione).

Strutturazione della tesi

- Nel capitolo 1, dedicato allo stato dell'arte, si mostrerà l'avanzamento dei lavori eseguiti sul rover Nemesys, focalizzandosi principalmente sulla movimentazione della zampa e su come essa sia stata modificata nel corso delle diverse revisioni.
- Nel capitolo 2 si descriveranno le caratteristiche e le peculiarità fondamentali delle leghe a memoria di forma, ed in particolare quelle riguardanti il Nitinol, materiale scelto per lo sviluppo del lavoro. Successivamente si mostrerà l'evoluzione dell'utilizzo delle SMA in configurazione antagonista, illustrando il ciclo preparatorio necessario che sta alla base delle prove di caratterizzazione.
- Nel capitolo 3 invece si analizzeranno nel dettaglio le diverse prove di caratterizzazione a cui i fili sono stati sottoposti, sia quelle 'classiche' come la DSC (utile ad evidenziare le temperature di trasformazione di fase del materiale) e la DMA (per studiare le proprietà meccaniche sotto sforzo e a differenti temperature d'utilizzo), che quelle più innovative (analisi dell'antagonismo). Le informazioni ottenute da questi test, che evidenzieranno le performance, le criticità ed il differente comportamento riscontrato al variare di diversi parametri, saranno elaborate ed utilizzate per la successiva progettazione dell'attuatore.
- Nel capitolo 4 si metteranno quindi in pratica i risultati delle prove di caratterizzazione dell'antagonismo per progettare l'attuatore adatto a soddisfare i requisiti di movimentazione della zampa robotica. Partendo da uno studio preliminare teorico di posizionamento, si passerà alla modellazione solida dei componenti per la conseguente realizzazione fisica del prototipo.
- Nel capitolo 5 si verificherà il raggiungimento degli obiettivi ipotizzati realizzando le prove di validazione sperimentali sul dimostratore ed esaminando le prestazioni ottenute.
- Infine, nel capitolo conclusivo si illustreranno le possibili migliorie, gli sviluppi futuri e i prossimi obiettivi da raggiungere.

Il progetto N.E.Me.Sys

1.1 Stato dell'arte

N.E.Me.Sys (o più semplicemente *Nemesys*), acronimo di Neural Ento-Mechanic System, è un progetto nato nel 2004 presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Milano [11], avente lo scopo di realizzare un dimostratore tecnologico esapode per uso spaziale in grado di camminare autonomamente su svariate tipologie di terreno.

Per raggiungere questo obiettivo, è stato studiato un sistema di controllo non convenzionale basato sulle reti neurali dinamiche, ispirato ai comportamenti istintivo-riflessivi tipici degli insetti: in altre parole, si è cercato di progettare un robot autosufficiente, che potesse interagire con l'ambiente esterno e superare ostacoli o imprevisti grazie alla stabilità intrinseca del sistema di controllo ideato.

Nel corso del tempo, il progetto è stato revisionato più volte, in quanto oggetto di studio per diversi lavori di tesi ([2], [12], [14]): ad esempio, sono state realizzate le schede elettroniche di interfaccia per il calcolatore, testando e migliorando ulteriormente il sistema di controllo preliminarmente implementato. Inoltre, anche la struttura esterna del rover è stata modificata (guadagnando via via in termini di massa, stabilità e compattezza), ed in particolar modo l'elemento che più ha variato - e sta tuttora variando - la sua morfologia è la zampa.

La prima versione di *Nemesys* (figura 1.1) era costituita da un corpo centrale formato da due piastre parallele d'alluminio, il cui obiettivo era quello di contenere l'elettronica per il funzionamento. Le sei zampe, identiche, sono state disposte in due file longitudinali lungo la dimensione maggiore delle piastre, identificando così la direzione d'avanzamento. Ognuna di esse, sia nell'ultima versione così come nella prima, è composta da tre segmenti

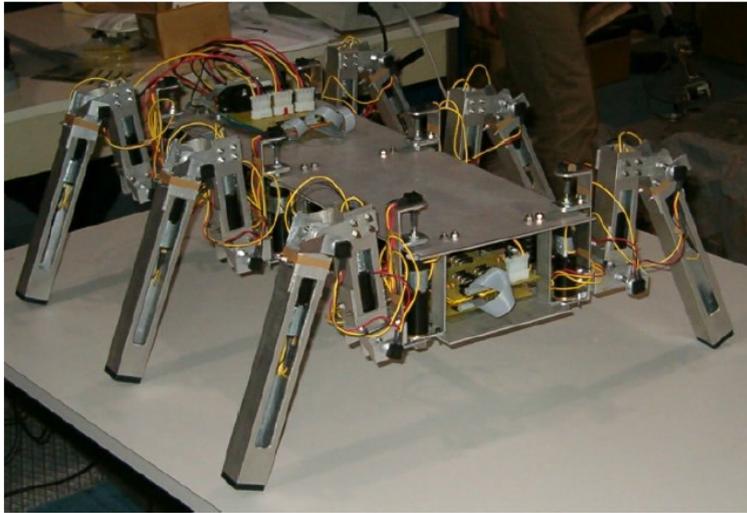


Figura 1.1: Primo modello di Nemesys (MK I)

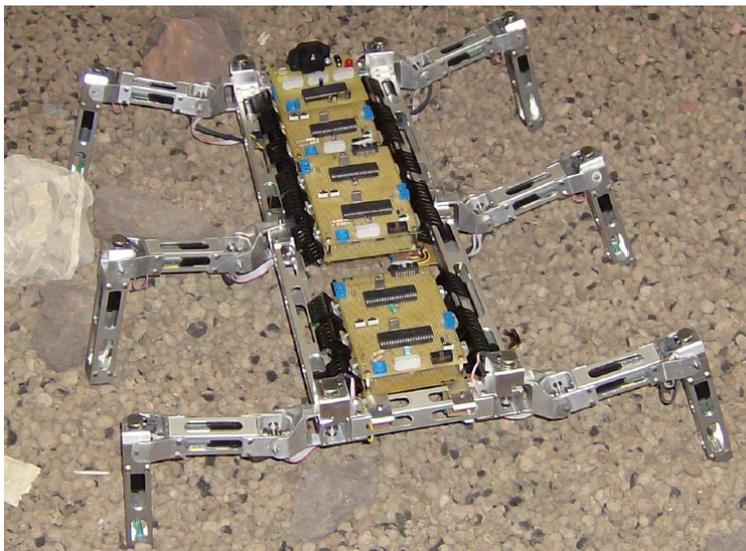


Figura 1.2: Ultimo modello di Nemesys (MK III)

chiamati nominalmente 'anca', 'femore' e 'tibia' (in analogia con il corpo umano) ed è movimentata attraverso motori elettrici a spazzole che permettono la rotazione delle articolazioni, facendo così in modo da ottenere 3 gradi di libertà indipendenti e globalmente quindi 18. Entrando nello specifico, il primo tratto di zampa consente l'avanzamento del rover (angolo γ nella figura 1.3) mentre l'alzata viene comandata dal femore e dalla tibia: in particolare, per ottenere una camminata semplice è sufficiente la rotazione del femore

(angolo β), e quand'anche vi siano degli ostacoli si potrà ruotare di un angolo α il tratto corrispondente della tibia.

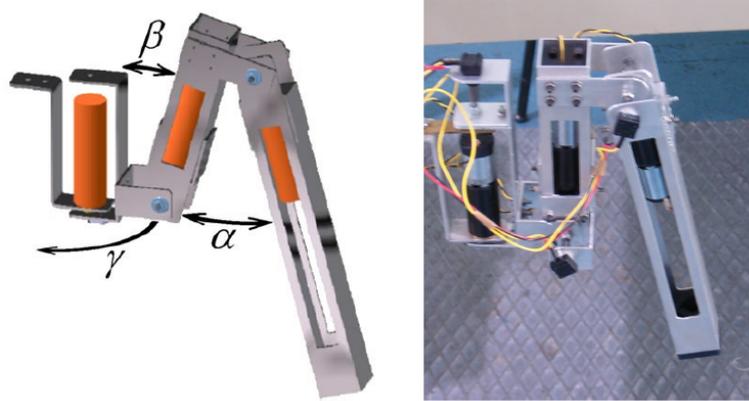


Figura 1.3: Primo modello della zampa e convenzione degli angoli di rotazione

Come detto, la struttura della zampa di Nemesys ha subito diverse revisioni strutturali: nel primo modello (figura 1.3) l'attenzione si è posta sull'ingombro massimo, e quindi si è optata una configurazione a zampe retratte. Successivamente invece si è privilegiata la maggior agilità del rover, cambiandone dunque la postura (come si nota nelle figure 1.2 e 1.4).



Figura 1.4: Modello della zampa installata (MK III)

Tabella 1.1: Variazione della massa di Nemesys nel corso delle revisioni

Modello	Anno	Massa [g]
MK I	2005	7500
MK II	2008	8300
MK III	2010	6150

Ciò che accomuna le tre versioni è il tipo di attuatore per la movimentazione, il quale non è mai variato: i motori elettrici, decisamente affidabili, prestanti e collaudati, sono tuttavia pesanti se rapportati alla massa totale del rover. Per dare un ordine di grandezza, valutando i dati dell'ultimo modello (MK III), basti pensare che essi rappresentano il 41% della massa totale, senza considerare un ulteriore 7% dovuto ai riduttori e agli ingranaggi conici necessari alla trasmissione della coppia (figura 1.5).

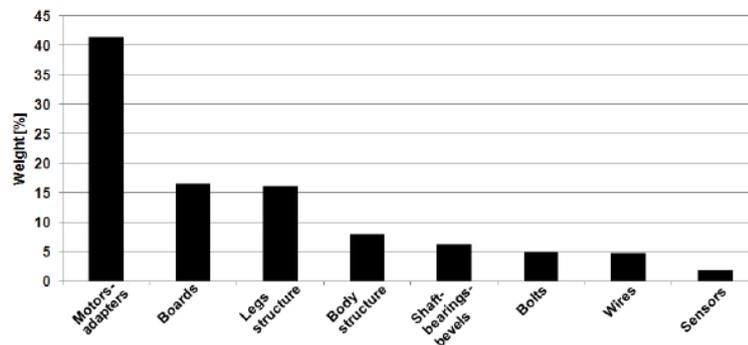


Figura 1.5: Suddivisione percentuale delle masse di Nemesys

Inoltre, un aspetto critico che si muove parallelamente con questo problema è senza dubbio la potenza richiesta: ogni motore attivo può consumare fino a 6 W, portando di fatto ad un valore di potenza massima di 108 W. Ovviamente però, durante il classico ciclo operativo di camminata non verranno mai attivati i motori al massimo della coppia erogabile e soprattutto non saranno mai accesi tutti contemporaneamente: si stima infatti che occorranza circa 19 W per una falcata a media velocità, o 24 W se si desidera aumentare il ritmo.

E' da sottolineare che per l'autosostentamento del rover (e quindi vincere la forza peso dello stesso) i motori devono rimanere costantemente accesi, consumando ovviamente energia (seppur limitatamente). In questa situazione

l'obiettivo viene per così dire agevolato anche grazie all'elevato attrito causato dagli ingranaggi conici, ma il problema rimane tuttora irrisolto.

Tabella 1.2: Caratteristiche dei motori elettrici

Produttore:	Maxon
Modello:	A-max 22
Voltaggio:	12 V
Potenza max.:	6 W
Coppia max. continua:	7.425 mNm
Coppia di stallo:	22 mNm
Velocità max. rotazione:	10500 RPM
Costante di coppia:	10.9 mNm/A
Costante di velocità:	875 RPM/V
Massa:	140 g

1.2 N.E.Me.Sys e le leghe a memoria di forma

Sottolineando il fatto che Nemesys, ora come ora, funziona perfettamente e ha dimostrato la bontà del sistema di controllo neurale, uno dei traguardi successivi potrebbe essere quello di diminuire ulteriormente la massa e la potenza richiesta, il che si traduce in campo spaziale in minori costi di lancio e di gestione.

Recentemente quindi il dimostratore tecnologico è stato ri-progettato inserendo per la prima volta attuatori in lega a memoria di forma al posto dei motori, studiandone la fattibilità [19]. Il risultato è che si è riusciti ad attuare la zampa migliorando le prestazioni, sia in termini di alzata massima raggiungibile (superamento di ostacoli maggiori) che per la riduzione significativa della massa totale (i fili hanno una massa praticamente trascurabile).

Tuttavia i problemi riscontrati sono stati diversi, ed in particolare il sistema ideato per la trasmissione della rotazione non è risultato molto efficiente: per esempio, si è inserita una doppia puleggia con rimandi all'interno del femore per aumentare la lunghezza dell'attuatore (sotto forma di filo) e di conseguenza la variazione di angolo ottenibile. Nonostante l'incremento dell'elevazione della zampa fosse considerevole e soddisfacente, l'errore commesso sulle prestazioni teoriche ipotizzate è risultato piuttosto elevato.

Inoltre, dato che si trattava di un primo step di sviluppo, si è studiata la sola alzata dell'arto (tralasciando dunque l'avanzata), ed i gradi di libertà del

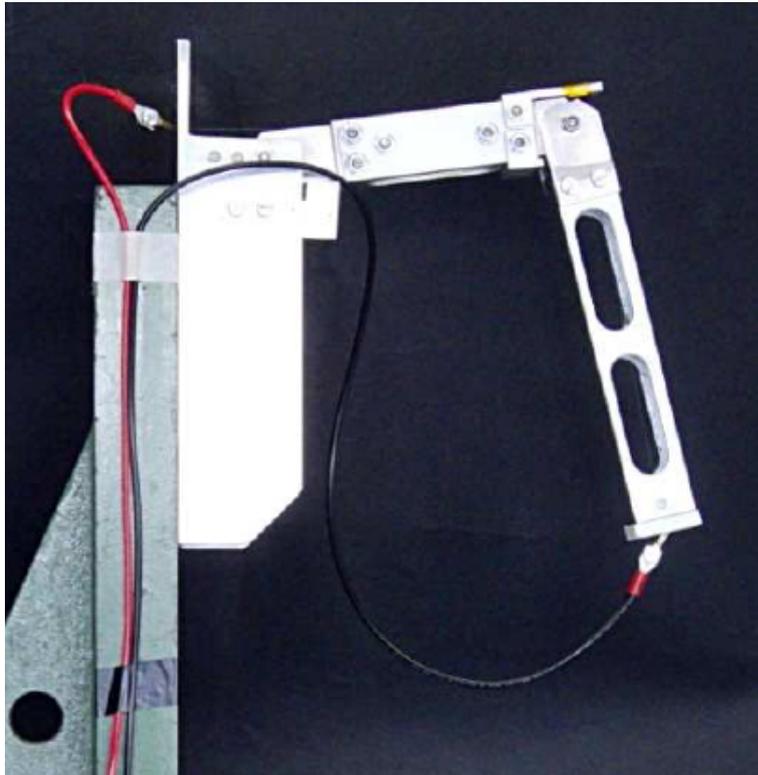


Figura 1.6: Modello della zampa per prima attuazione SMA (da [19])

femore e della tibia non sono stati considerati indipendenti, compiendo perciò un unico movimento. Il ritorno alla posizione iniziale avveniva sfruttando la gravità, ovvero la forza peso della zampa stessa: in altre parole si è utilizzato l'attuatore in lega a memoria di forma nella classica configurazione in contrapposizione ad una forzante esterna.

Il risultato più deludente però riguarda la potenza richiesta dal filo: scegliendo quel particolare cinematismo si sono resi necessari ben 18 W, valore paragonabile a quello richiesto dai motori, o addirittura superiore se si considera che non si è studiata la parte relativa all'avanzata.

Ecco dunque che le possibili migliorie sono numerose, e spaziano dalla riduzione della potenza, dall'aumento dei gradi di libertà (da 1 a 3 per ogni zampa), dallo studio preliminare dei problemi termici associati all'utilizzo delle leghe a memoria di forma, dalla migliona del cinematismo, fino ad arrivare all'indipendenza delle forzanti esterne (quale la gravità) per il ritorno alla posizione iniziale.

Capitolo 2

Leghe a memoria di forma

In questa sezione vengono descritte in via teorica le caratteristiche generali delle leghe a memoria di forma, specificatamente per il Nitinol, materiale scelto per lo sviluppo del lavoro; in seguito viene inquadrato il principio di funzionamento di tali leghe se utilizzate sfruttando l'effetto antagonista, il cui concetto sta alla base della successiva progettazione dell'attuatore.

2.1 Caratteristiche e peculiarità

Le leghe a memoria di forma (Shape Memory Alloys, o in sigla 'SMA') sono particolari materiali appartenenti alla classe dei cosiddetti Smart Materials¹: essi infatti, se sottoposti a sollecitazioni esterne quale ad esempio l'applicazione di un carico, sono in grado di recuperare la loro forma originale semplicemente riscaldandoli al di sopra di una certa temperatura caratteristica, che verrà specificata nel seguito². Questa interessante proprietà è dovuta essenzialmente ad una transizione di fase della microstruttura interna: il materiale infatti presenta due fasi principali, denominate fase martensitica e fase austenitica.

In generale si può dire che la fase martensitica sia stabile a basse temperature, mentre quella austenitica lo è ad alte temperature: nel caso in cui si fosse all'interno di questo range termico possono coesistere entrambe le fasi, e/o svilupparsene una intermedia corrispondente ad una particolare situazione microstrutturale, nota come fase-R (romboedrica). Entrando nello specifico, la martensite è caratterizzata da una struttura atomica monoclinica B19' del reticolo cristallino alla quale corrisponde un modulo elastico relativamente

¹Per maggiori approfondimenti si rimanda a [3] e [15]

²Se il recupero di forma non avviene in maniera totale a causa di possibili vincoli si generano sforzi notevoli, chiamati sforzi di recupero, sui vincoli stessi.

Capitolo 2

basso. Dal momento che la struttura cristallina della martensite presenta una minor simmetria, e utilizza per la nucleazione e crescita nella fase austenitica un accomodamento per twins, possono in tale fase coesistere diverse orientazioni chiamate varianti: se non vi sono applicati sforzi si è nella condizione di martensite *twinned*, mentre man mano che si applica uno sforzo crescente si ha un riorientamento della struttura cristallina arrivando alla fase detta martensite *detwinned*.

Sia partendo dalla fase martensite *twinned* che *detwinned*, aumentando la temperatura si attua la trasformazione di fase portando il materiale nella fase austenitica, la quale presenta un modulo di elasticità decisamente più elevato essendo costituita da una struttura cristallina cubica di tipo B2 a corpo centrato.

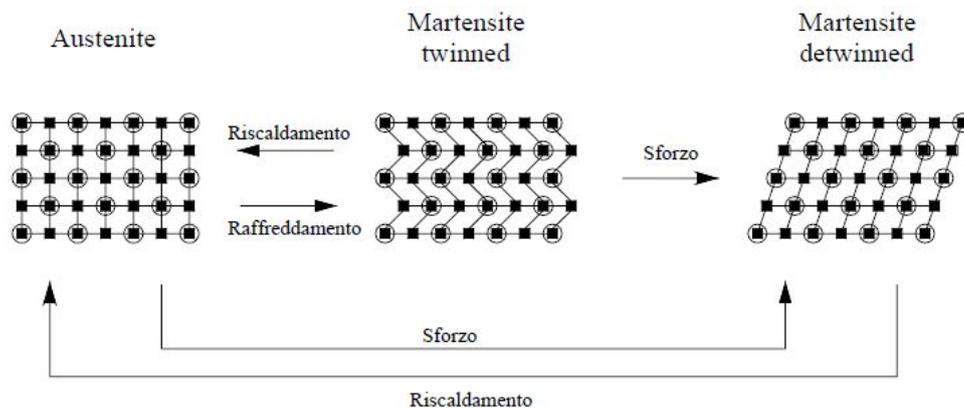


Figura 2.1: Fasi della lega SMA al variare delle sollecitazioni esterne

Il passaggio di fase da austenite a martensite è noto in letteratura come trasformazione in avanti (forward transformation), mentre il passaggio inverso (da martensite ad austenite) è chiamato trasformazione all'indietro (reverse transformation). Questi passaggi sono identificati da temperature caratteristiche di trasformazione chiamate di:

- inizio martensite (M_s): temperatura al di sotto della quale il materiale inizia a trasformarsi nella fase martensitica;
- fine martensite (M_f): temperatura al di sotto della quale il materiale è completamente in fase martensitica;
- inizio austenite (A_s): temperatura al di sopra della quale il materiale inizia a trasformarsi nella fase austenitica;

- fine austenite (A_f): temperatura al di sopra della quale il materiale è completamente in fase austenitica;

Inoltre, come accennato, può esistere la fase-R intermedia: in questo caso è possibile determinare anche le temperature di trasformazione R_s e R_f di inizio e fine fase romboedrica³.

Uno degli svantaggi nell'utilizzo di queste leghe è il fatto che non esistano parametri descrittivi generali, ma a seconda dell'applicazione e della modulazione della microstruttura instaurata nel materiale si hanno diverse proprietà funzionali che devono essere confermate da test sperimentali e non possono essere previste a priori. Le variabili principali sono la temperatura, lo sforzo, la deformazione e la frazione martensitica: il problema principale è che queste variabili non sono affatto indipendenti tra di loro, perciò lo studio risulta piuttosto complesso. Un diagramma generale che racchiude lo stato della lega nota la temperatura e lo sforzo applicato è rappresentato nella figura 2.2.

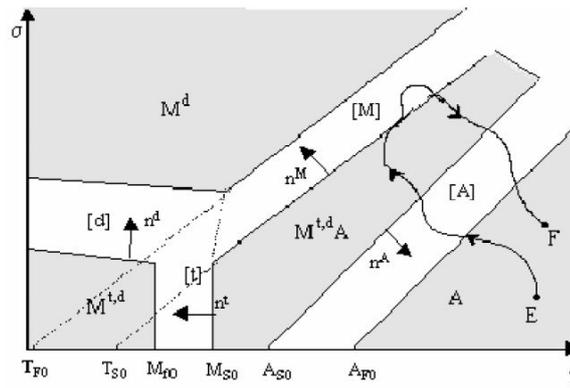


Figura 2.2: Fasi della lega SMA in funzione dello sforzo applicato e della temperatura

Nel diagramma è possibile notare due regioni bianche e quattro grigie: nelle prime la trasformazione può avvenire, esclusivamente seguendo i versi indicati dalle frecce n^A , n^M , n^t e n^d . In ogni quadrante è indicata con una sigla facilmente intuibile (gli apici t e d stanno a significare rispettivamente twinned e detwinned) la fase della lega in quella particolare condizione di sforzo/temperatura. Nelle regioni grigie invece, dette zone morte, non è possibile far avvenire la trasformazione di fase (né mediante variazione di temperatura né mediante applicazione di uno sforzo).

Una campagna di caratterizzazione completa prevede pertanto oltre alla misura delle temperature caratteristiche di trasformazione anche studi di

³analizzando la trasformazione in avanti, da austenite a martensite

Capitolo 2

proprietà meccaniche, sia in isoterma (a carico variabile) che con variazione di temperatura (a carico fisso). Riguardo infine le fenomenologie esprimibili da questo tipo di materiale, è possibile riassumere in 3 macro categorie il comportamento delle SMA [15]:

- Effetto a memoria di forma ad una via: variando la temperatura, il materiale è in grado di recuperare una sola forma predeterminata dopo la deformazione imposta in fase martensitica;
- Effetto a memoria di forma a due vie: il materiale è in grado di cambiare forma non solo durante la fase di riscaldamento, ma anche durante la fase di raffreddamento;
- Effetto superelastico: si verifica quando il materiale a memoria di forma viene sollecitato, a temperatura superiore ad A_f , con uno sforzo critico che può indurre la trasformazione martensitica. Quest'ultima produce una grande deformazione nel materiale che può essere interamente recuperata con lo scarico quando il materiale si mantiene sopra la temperatura A_f .

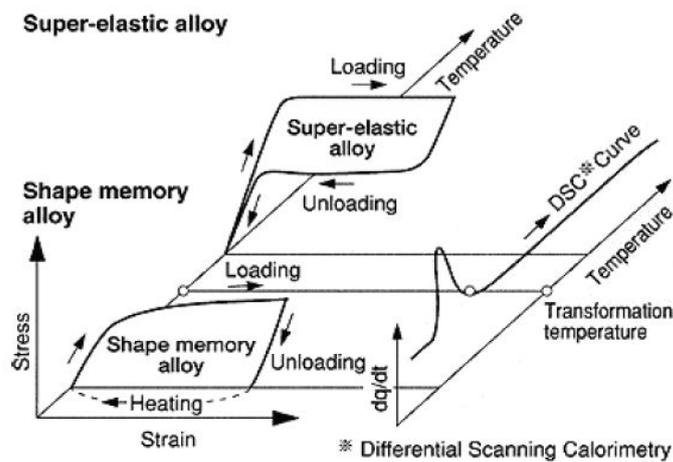


Figura 2.3: Grafico sforzo/deformazione/temperatura: effetto a memoria di forma VS. superelasticità

L'effetto che verrà sfruttato è il primo, ovvero l'effetto a memoria di forma ad una via: questo essenzialmente perché è l'effetto utilizzato nel campo degli attuatori, dove al recupero di forma viene associato un lavoro.

2.2 L'utilizzo delle SMA: il Nitinol

La lega a memoria di forma maggiormente utilizzata nel campo ingegneristico è senza dubbio il Nitinol: essa è una lega formata da Nickel e Titanio, le cui percentuali in peso possono variare, ma generalmente la si sfrutta nella forma equiatomica o quasi. I motivi alla base dell'utilizzo di questa particolare lega sono diversi, e spaziano dall'elevata deformazione di recupero ottenibile (che può addirittura arrivare fino all'8%), dalle forze trasmettibili associate, e dalle buone caratteristiche di resistenza alla corrosione e alla fatica. Per questi motivi attualmente la lega NiTi è la più nota e diffusa commercialmente e quindi la più adatta a scopi applicativi; naturalmente esistono altre tipologie di leghe SMA (come ad esempio la CuZnAl e la CuAlNi) utili per scopi differenti dall'oggetto in esame. Qui di seguito vengono mostrate le caratteristiche fisiche e meccaniche di confronto (figura 2.4), tratte da [7].

	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Specific heat (J/Kg°C)	450–620	390–400	373–574
Thermal conductivity (20°C) (W/mK)	8.6–18	84–120	30–75
Density (Kg/m ³)	6400–6500	7540–8000	7100–7200
Latent heat (J/Kg)	19000–32000	7000–9000	7000–9000
Electrical resistivity (10 ⁶ Ωm)	0.5–1.1	0.07–0.12	0.1–0.14
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ /K)	6.6–11	17	17
Maximum recovery stress (Mpa)	500–900	400–700	300–600
Normal working stress (Mpa)	100–130	40	70
Fatigue strength (N = 10 ⁷) (Mpa)	350	270	350
Maximum transformation strain (%)	$N = 1$ $N < 10^2$ $N < 10^5$ $N < 10^7$	6–8 6–8 2–4 (3) 0.5	4–6 4 4
Normal number of thermal cycles	$> 10^5$	$> 10^4$	$> 5 \times 10^3$
Young's Modulus (Gpa)	28–83	70–100	80–100
Shape memory transformation temperature (°C)	–200–200	–200–150	–200–200
Hysteresis (°C)	2–50	5–20	20–40
Maximum overheating temperature (°C)	400	150	300
Damping capacity (SDC%)	15–20	30–85	10–20
Grain size (μm)	1–100	50–150	25–100
Melting, casting and composition control	Difficult	Fair	Fair
Forming (rolling, extrusion)	Difficult	Easy	Difficult
Cold-working	Fair	Restricted	Very difficult
Machinability	Difficult	Very good	Good
Cost ratio	10–100	1–10	1.5–20

Figura 2.4: Caratteristiche fisiche e meccaniche delle SMA maggiormente utilizzate

La peculiarità fondamentale delle SMA, che ha fatto in modo che fossero oggetto d'attenzione in campo scientifico, rimane comunque l'elevato rapporto potenza/peso che il materiale è in grado di fornire, vedi figura 2.5, in riferimento a quanto descritto in [13]. Riguardo quest ultimo aspetto, è naturale dunque che le leghe a memoria di forma siano in fase ascendente di sviluppo, specialmente per ciò che riguarda l'utilizzo a scopo di attuazione:

oltre appunto alla riduzione della massa a parità di potenza sviluppata, si pensi anche che l'affidabilità è totale (non possono esistere malfunzionamenti o usura⁴, in quanto il 'movimento' è una conseguenza della trasformazione di fase della lega).

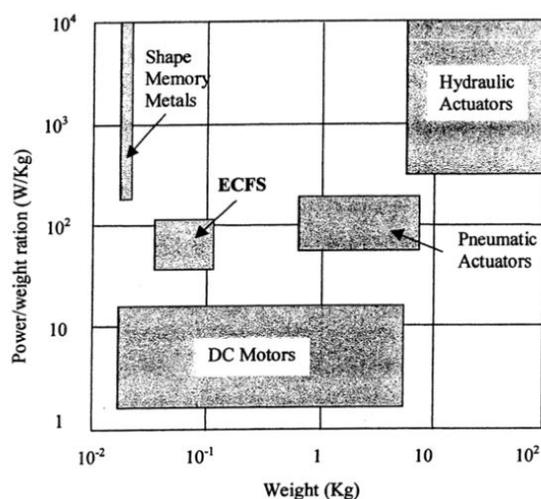


Figura 2.5: Comparazione tra le SMA e gli attuatori convenzionali: rapporto potenza/peso

Infine, rispetto agli attuatori convenzionali quali motori elettrici, idraulici o pneumatici, ulteriori vantaggi sono la minor complessità intrinseca, la diminuzione del rumore e degli attriti e, ultimo ma non per questo meno importante, la riduzione degli ingombri.

2.3 Attuatori antagonisti con leghe SMA

Attraverso gli attuatori in lega SMA - ed in particolare sfruttando l'effetto a memoria di forma - si possono esercitare forze di recupero, momenti o spostamenti di masse ad esse vincolate semplicemente deformandoli (in modo da poterli 'armare') e successivamente riscaldandoli al di sopra della temperatura di trasformazione di fase. Sono svariate ormai le applicazioni sviluppate con questo tipo di materiali, in diversi settori industriali (dal biomedicale al manifatturiero avanzato), permettendo la diffusione di competenze specifiche, di ideazione di nuove soluzioni e di miglorie nelle fasi di progettazione.

⁴ovviamente se non si supera il livello di sforzo di snervamento o di rottura in fase austenitica

Un approccio innovativo ed interessante, che sta prendendo piede soprattutto in questi ultimi anni, consiste nell'assemblaggio di due elementi SMA che lavorano l'uno in contrapposizione all'altro, il che si traduce nello sviluppo di un cosiddetto attuatore antagonista: il pensiero che sta alla base dell'approfondimento di queste ricerche è giustificato dal fatto che in assenza di forzanti esterne (quali ad esempio pressioni, forze, momenti, inerzia dovuta alla gravità, ecc.), o quando queste forzanti non sono sufficienti al ritorno dell'oggetto nella posizione iniziale, oppure ancora quando si vogliono due differenti posizioni di equilibrio utilizzando però sempre SMA ad una via, occorre cercare di trarre vantaggio dalle caratteristiche intrinseche di questi materiali in maniera differente e combinata.

I due elementi antagonisti possono essere entrambi fili SMA, oppure un filo e una molla SMA, oppure ancora gli analoghi utilizzando molle o nastri SMA al posto dei fili [13].

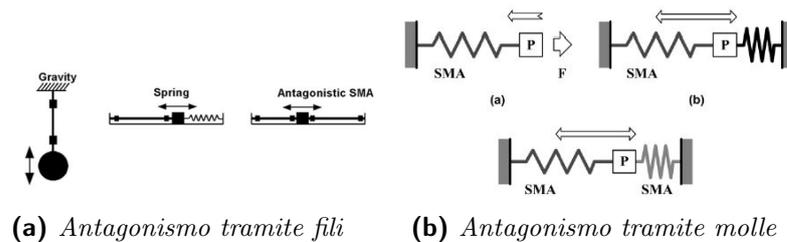


Figura 2.6: Possibili configurazioni del comportamento antagonista

Ciò che accade è che, se i due elementi sono identici, dopo un ciclo preparatorio raggiungono una posizione d'equilibrio sviluppando perciò le medesime deformazioni: diversi autori hanno sfruttato questo interessante effetto, ad esempio Sofla et al. [18] hanno creato un dimostratore intelligente, chiamato *AFC* (cella unitaria antagonista a flessione), il quale permette la rotazione di una trave costituita da blocchi reticolari ed incastrata ad un estremo (figura 2.7).

Altri importanti lavori, come per esempio quelli eseguiti da Burcu e Bülent [1] o da Singh et al. [17], furono le progettazioni ed il controllo dell'attuazione di alcune superfici mobili di un velivolo (figura 2.8): in questo caso si comandava la cerniera corrispondente mediante due fili SMA in posizione speculare.

In definitiva, in tutte queste applicazioni si cerca di sfruttare due movimenti utilizzando però sempre una lega a memoria di forma ad una via, che come noto sviluppa recuperi di deformazione nettamente superiori rispetto agli analoghi materiali a due vie (7-8% contro il 2%).

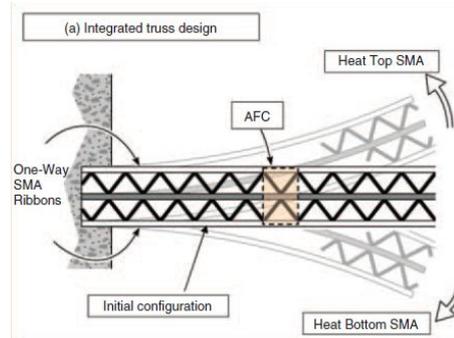


Figura 2.7: Cella unitaria antagonista a flessione (AFC)

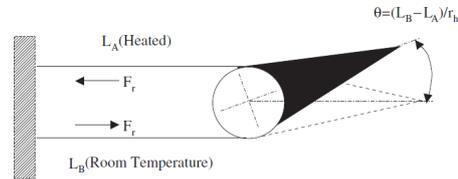


Figura 2.8: Attuazione di una superficie mobile tramite fili SMA antagonisti

Ecco allora che il principio dell'antagonismo si addice perfettamente all'oggetto dello studio: a causa dei requisiti dovuti ai fattori ambientali in cui dovrà operare il dimostratore infatti, primo fra tutti la mancanza di gravità, si ha la necessità di sviluppare rotazioni in due versi opposti - per l'alzata della zampa e per il ritorno nella posizione iniziale, o analogamente per compiere un passo in avanti o all'indietro - che devono essere indipendenti dalle condizioni esterne e sfruttare perciò questo fenomeno.

2.4 Ciclo preparatorio per attuatori antagonisti

Senza ledere di generalità, considerando due fili SMA identici, il ciclo preparatorio accennato in precedenza consiste nel pre-deformare uno dei due fili e lasciare inalterato l'altro⁵. Naturalmente prima dell'assemblaggio e della pre-deformazione è opportuno sottoporre i fili ad un ciclo termico a sforzo nullo di riscaldamento (sopra la temperatura A_f) e di raffreddamento (sotto la temperatura M_f) per eliminare qualsiasi stato di sforzo o deformazione interni residui; detto ciò, la pre-deformazione scelta per il primo filo (chiamata

⁵Con un certo abuso di notazione, d'ora in avanti si intenderanno equivalenti i termini 'pre-deformazione' e 'pre-allungamento', dato che il primo è la causa del secondo.

nel seguito ϵ_1^s) risulterà essere fondamentale per le prestazioni ottenibili. In genere, la pre-deformazione deve essere compresa nell'intervallo tra il 2.5 e il 6.5%: al di fuori di questi valori non si riesce a raggiungere lo scopo desiderato, in quanto al di sotto del 2.5% il filo - una volta attivato - non sviluppa sufficiente forza di recupero e pertanto non è in grado di armare (*detwinnare*) l'antagonista, mentre al di sopra del valore massimo indicato si hanno problemi di affidabilità dal punto di vista meccanico (si è vicini o superiori allo sforzo di snervamento del materiale).

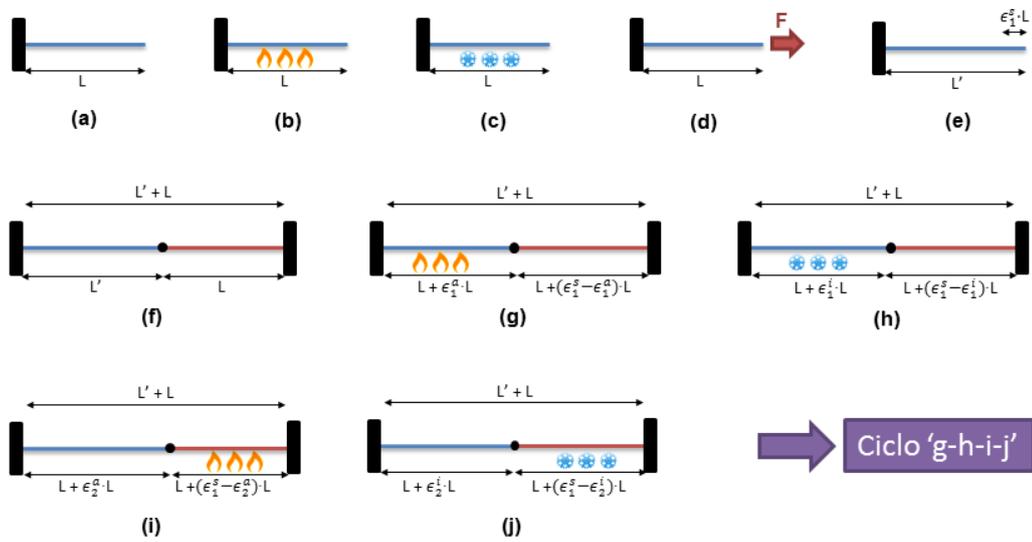


Figura 2.9: Ciclo preparatorio per due fili SMA antagonisti

Si faccia ora riferimento allo schema di operazioni illustrato nella figura 2.9: una volta ottenuta la pre-deformazione, facendo passare la lunghezza del primo da quella iniziale (L) ad una lunghezza pari a $L' = L + \epsilon_1^s \cdot L$, si vincolano i due fili con l'accortezza di infraporre un isolante termoelettrico. A questo punto, riscaldando il primo filo ad una temperatura maggiore di A_f , si fa avvenire l'effetto a memoria di forma: il filo infatti cercherà di recuperare la lunghezza iniziale esercitando lo sforzo di deformazione dell'antagonista.

In questo modo però, non essendo un recupero libero, lo strain recuperato non sarà esattamente pari a quello imposto prima del montaggio ma assumerà un valore inferiore (rimarrà una deformazione residua pari a ϵ_1^a). Il filo antagonista, essendo in fase martensitica a temperatura ambiente, contemporaneamente si deforma (allungandosi di $(\epsilon_1^s - \epsilon_1^a) \cdot L$) in quanto una volta superato il primo sforzo critico percorre il classico tratto di 'plateau' nel diagramma sforzo-deformazione, noto come detwinning.

Capitolo 2

Raffreddando il primo filo, facendolo ritornare in fase martensitica e diminuendo così il modulo elastico indotto dal riscaldamento (o meglio dal cambiamento di fase), si ottiene una lunghezza intermedia differente ($L'' = L + \epsilon_1^i \cdot L$, con ϵ_1^i non noto, ma sicuramente maggiore di ϵ_1^a).

Dalla situazione in cui entrambi i fili sono alla stessa temperatura e in fase martensitica, e scaldando ora il secondo filo di Nitinol sopra la temperatura A_f , ci si aspetta che esso si contragga di un ϵ_2^a (ovviamente anch'esso non noto a priori, ma di certo minore di ϵ_1^s) in analogia rispetto alla situazione precedente, dove però è il primo filo ad opporre resistenza e ad essere quindi deformato.

Anche in questo caso, raffreddandolo, la lunghezza finale risulta differente ($\epsilon_2^i > \epsilon_2^a$), giungendo però finalmente alla condizione di equilibrio cercata che consente ad entrambi i fili di deformarsi della medesima lunghezza nei cicli successivi, attivandoli in sequenza e facendoli lavorare perciò in maniera antagonista.

Risulta molto interessante analizzare il ciclo completo di attivazione osservando l'andamento della situazione nel grafico sforzo/deformazione dei due fili SMA (figura 2.10), parallelamente alla più intuitiva figura precedente: come si può notare, la fase di pre-deformazione del primo filo si conclude con l'operazione indicata dalla lettera 'f' (il secondo filo, fino a questo punto, non è ancora entrato in gioco). In particolare, per ottenere la deformazione ϵ_1^s occorre fornire una forza tale da produrre uno sforzo σ^s (punto 'd').

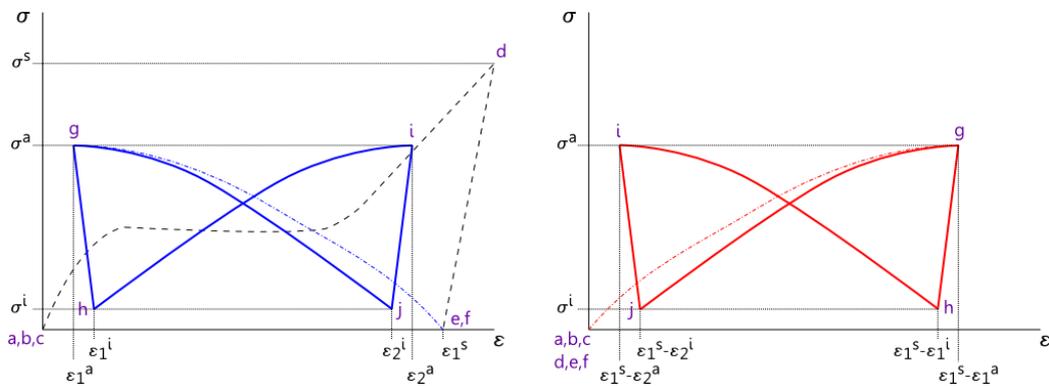


Figura 2.10: Ciclo preparatorio: situazione nel grafico $\sigma - \epsilon$ (in blu il filo 1, in rosso il filo 2)

Quando si riscalda il primo filo si giunge nella situazione 'g', caratterizzato dalla contrazione $(\epsilon_1^s - \epsilon_1^a) \cdot L$ e da una tensione interna pari a σ^a , mentre il secondo si deforma della medesima lunghezza e raggiunge lo stesso livello di sforzo. Una volta raffreddato il primo filo, si è nel punto 'h', e lo sforzo nel sistema scende a σ^i . La stessa situazione, ma al contrario, si verifica nei punti

' i ' e ' j ', dove l'attivazione e la disattivazione riguardano il secondo filo. Ciò che si ottiene una volta completato questo passaggio è che il percorso 'interno' ' $g - h - i - j$ ' viene mantenuto nei cicli successivi descrivendo un percorso chiuso noto come *effetto farfalla*, data la similarità della curva descritta nel grafico sforzo/deformazione.

Come si può intuire, il fenomeno è altamente non lineare e difficilmente prevedibile se non con accurati modelli numerici, i quali risulterebbero tuttavia validi solo per il tipo di filo di Nitinol che si sta analizzando. Di conseguenza, tutte queste informazioni di natura qualitativa (in particolare i punti notevoli descritti in precedenza) devono essere determinate quantitativamente attraverso appositi test di caratterizzazione sperimentale, con l'obiettivo quindi di conoscere le deformazioni utili per un dimensionamento ad-hoc della struttura in esame.

Capitolo 3

Prove di caratterizzazione

Questo capitolo è dedicato alle prove di caratterizzazione cui sono stati sottoposti gli attuatori SMA: i fili di Nitinol scelti (Smartflex SAES Getters, [5]) hanno un diametro 0.2 mm e sono pressoché equiatomici Ni-Ti (49-51%).

Le analisi DSC e DMA sono state effettuate presso l'istituto IENI del Consiglio Nazionale delle Ricerche (sede di Lecco) e sono servite per determinare le temperature di trasformazione di fase, oltre che al tracciamento dei diagrammi isotermi sforzo-deformazione e i duali di temperatura-deformazione associati al livello di sforzo applicato; i test di caratterizzazione del comportamento antagonista invece sono stati eseguiti presso il laboratorio tecnologico del Politecnico di Milano e sono stati necessari per ricavare le deformazioni che i fili subiscono se attivati in sequenza. Queste informazioni sono essenziali per conoscere il funzionamento del filo in lega a memoria di forma e poter quindi progettare successivamente l'attuatore.

3.1 Analisi DSC

L'analisi DSC (differential scanning calorimetry) è utile per individuare le caratteristiche chimico-fisiche, nonché le temperature di trasformazione di fase del materiale in lega a memoria di forma scelto. E' un'analisi libera, ovvero senza l'applicazione di uno sforzo, che consiste nella misura della differenza di flusso termico scambiato tra un campione di materiale - il filo di Nitinol per l'appunto - e uno di riferimento, che solitamente è costituito dall'assenza di un vero e proprio campione (simulando l'ambiente esterno).

Attraverso cicli controllati di aumento e diminuzione di temperatura si possono osservare le reazioni esotermiche o endotermiche subite dal materiale che si sta analizzando; attraverso termocoppie (e una costante di cella

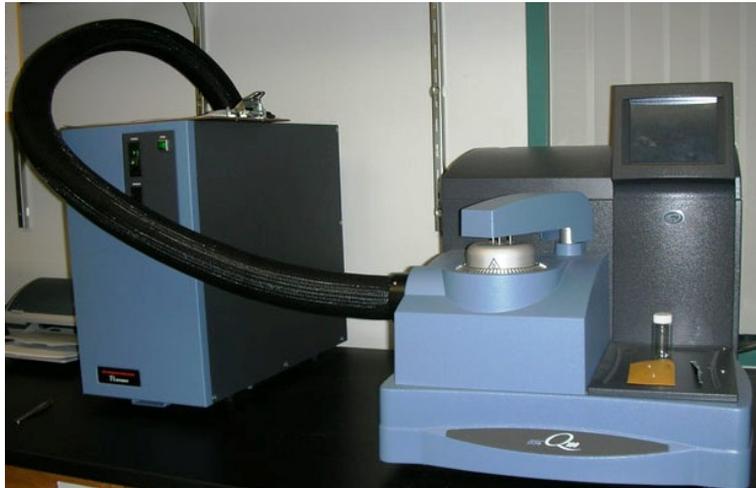


Figura 3.1: DSC: TA instruments Q100

opportunamente calcolata mediante calibrazione) è stato quindi possibile ricostruire l'andamento del flusso termico in funzione della temperatura.

Le trasformazioni di fase sono rappresentate da picchi di energia, poiché in quella circostanza avviene il cambiamento della struttura microcristallina. Le differenze di entalpia ricavate possono essere utili al calcolo della quantità di calore necessaria alla trasformazione, la quale è strettamente correlata allo stato microstrutturale del materiale.

Il Nitinol è caratterizzato sicuramente dalla presenza dei due picchi dovuti alle trasformazioni diretta e inversa; tuttavia, se il materiale non ha subito trattamenti termici di solubilizzazione¹, è possibile osservare anche un picco intermedio dovuto alla fase romboedrica. Ai fini applicativi di questa trattazione, considerando che questa fase tende a sovrapporsi in temperatura alla transizione martensitica principale man mano che si aumenta il livello di sforzo, il fenomeno non è risultato essere significativo, anche se resta molto importante nello studio dettagliato dell'analisi del recupero libero.

Le temperature caratteristiche del materiale di inizio e fine trasformazione sono state ricavate attraverso il 'metodo delle tangenti', come da normativa, individuando il punto di intersezione tra le rette tangenti ai punti in cui le curve presentano un flesso (vedi figura 3.2).

I dati sono stati memorizzati in formato ASCII, per cui facilmente manipolabili attraverso diversi software: in particolare è stato utilizzato il programma *TA Universal Analysis*[®], della stessa ditta costruttrice della strumentazione, oltre ad alcune semplici implementazioni *Matlab*[®].

¹o comunque trattamenti termici preliminari ad elevate temperature

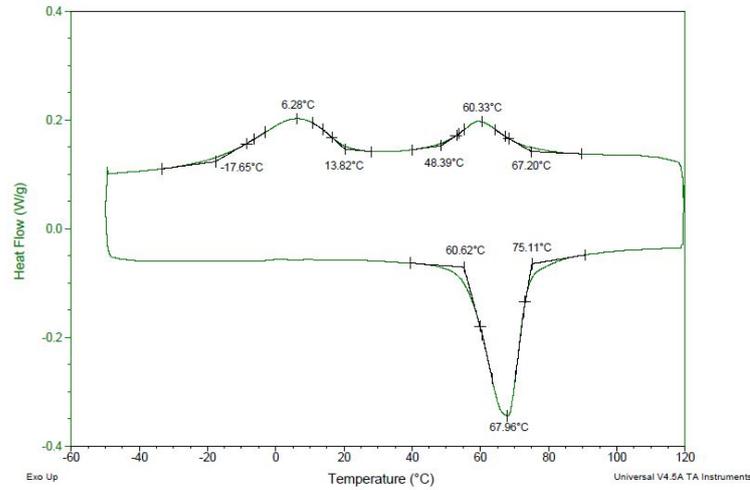


Figura 3.2: Analisi DSC: temperature di trasformazione

Nell'immagine 3.2 e nella tabella 3.1 si evidenziano le temperature di trasformazione del materiale. Si può notare come a temperatura ambiente, senza alcuna applicazione di uno sforzo esterno, il filo si trovi in fase martensitica, o meglio in una fase intermedia tra la martensitica e la romboedrica², mentre a temperature maggiori di 75 °C il materiale si trovi completamente in fase austenitica.

Tabella 3.1: Temperature di trasformazione: NiTi SmartFlex 0.20 mm

Specifica	Sigla	T [°C]
Inizio martensite	M_s	13.82
Picco martensite	M_p	6.28
Fine martensite	M_f	-17.65
Inizio romboedrica	R_s	67.20
Picco romboedrica	R_p	60.33
Fine romboedrica	R_f	48.39
Inizio austenite	A_s	60.62
Picco austenite	A_p	67.96
Fine austenite	A_f	75.11

²nel paragrafo successivo si potrà notare come l'applicazione di uno sforzo man mano crescente tenda a far scomparire la fase-R

Capitolo 3

Per evidenziare il fatto che il materiale fosse stabile, ovvero presentasse sempre le stesse temperature di trasformazione nei cicli successivi, sono stati effettuati due cicli di analisi: il risultato, come evidenziato nella figura 3.3, conferma l'efficacia del processo di stabilizzazione eseguito sul filo.

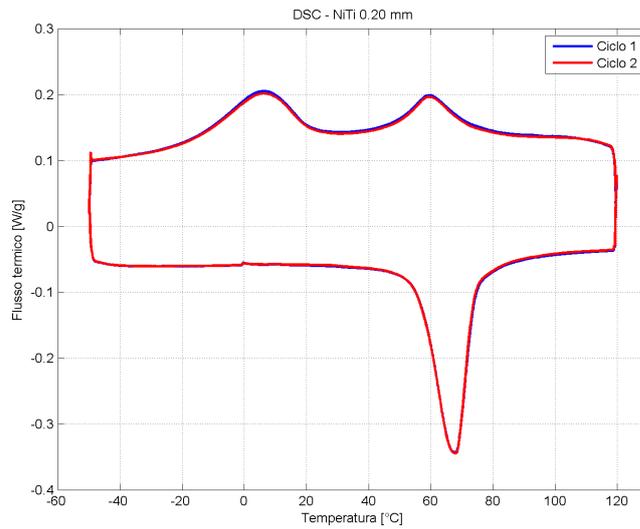


Figura 3.3: Analisi DSC: verifica stabilità

3.2 Analisi DMA

L'analisi DMA (Dynamic Mechanical Analysis) è un test in cui viene applicato un determinato livello di sforzo assiale, per poter ricavare le caratteristiche meccaniche del materiale - e quindi valutare ad esempio l'andamento della deformazione al variare dello sforzo - oppure per ottenere il grafico temperatura-deformazione corrispondente e calcolare il modulo di elasticità. Oltre alle prove meccaniche con parametri che variano linearmente nel tempo, con questo tipo di set-up sperimentale è possibile determinare il comportamento viscoelastico dei materiali imponendo uno sforzo di tipo sinusoidale a una nota frequenza.



Figura 3.4: DMA: TA instruments Q800

Le leghe SMA hanno comportamento funzionale strettamente correlato ai parametri di sforzo e temperatura, pertanto una completa caratterizzazione di questi materiali prevede almeno due tipologie di analisi, osservando il diverso comportamento in funzione di queste variabili.

3.2.1 Strain Recovery vs T: misura della deformazione a carico fisso e al variare della temperatura

La prima delle due analisi DMA consiste nel selezionare un livello di sforzo da applicare al filo di Nitinol e di mantenerlo al variare della temperatura, in modo da osservare le variazioni di deformazione dovute ai cambiamenti di fase e ricavare le temperature caratteristiche in quella particolare condizione³.

Il ciclo a cui è stato sottoposto il filo SMA⁴ è stato quindi il seguente:

1. Riscaldamento al di sopra della temperatura A_f ;
2. Mantenimento della temperatura per 5 minuti;
3. Applicazione dello sforzo scelto;
4. Raffreddamento al di sotto della temperatura M_f mantenendo lo sforzo applicato;
5. Mantenimento della temperatura per 5 minuti;
6. Riscaldamento al di sopra di A_f ;
7. Variazione dello sforzo applicato;
8. Ripetizione del ciclo termico.

I livelli di sforzo scelti (50, 100, 150, 200 e 300 MPa) sono stati applicati e monitorati attraverso una cella di carico di 18 N, valore questo che determinava lo sforzo massimo applicabile, pari a circa 573 MPa per il filo in esame (avente diametro 0.2 mm). I risultati di questo primo esperimento possono essere visualizzati nella figura 3.5.

Come si può notare, la deformazione di recupero aumenta all'aumentare dello sforzo, fino ad arrivare addirittura al 6.75% nel caso dell'applicazione di 300 MPa: in questo caso però, come si evince dalla non perfetta chiusura della curva, si inizia ad ottenere una deformazione residua permanente (pari a circa lo 0.2%) dovuto evidentemente al processo di snervamento del materiale e di introduzione di difetti irreversibili quali dislocazioni. Ad un livello di sforzo inferiore invece questo non avviene, perciò il recupero della deformazione è totale: i valori risultanti sono indicati nella tabella (3.2).

³Infatti, come verrà specificato nel seguito, le temperature di trasformazione differiscono dalle analoghe ricavate attraverso l'analisi DSC, seguendo l'equazione di Clausius-Clapeyron ($\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta h}{T\Delta v}$, dove P è la pressione, T la temperatura, Δh e Δv le variazioni di entalpia e di volume specifico durante il cambiamento di fase), che evidenzia la proporzionalità diretta tra la temperatura ed il livello di sforzo applicato.

⁴dopo un primo ciclo di riscaldamento/raffreddamento per eliminare sforzi residui

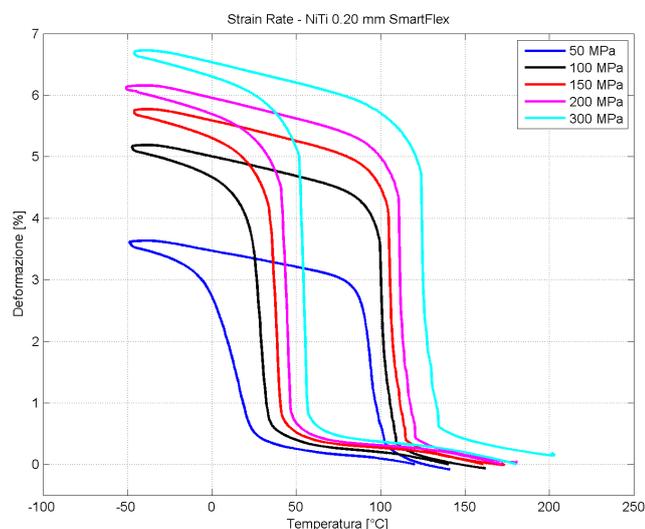


Figura 3.5: Analisi DMA: grafico deformazione/temperatura a sforzo fissato

Tabella 3.2: Valori di recupero di deformazione al variare del livello di sforzo

σ [MPa]	ϵ [%]	$\epsilon_{residua}$ [%]
50	3.65	Assente
100	5.20	Assente
150	5.75	Assente
200	6.15	0.08
300	6.75	0.20

Dallo stesso grafico di figura 3.5 si possono individuare le temperature caratteristiche di trasformazione di fase, come accennato in precedenza: infatti, anche in questo caso utilizzando il metodo delle tangenti, i punti in cui avvengono il bruschi cambiamenti di pendenza di ogni curva (o analogamente i vertici dei parallelogrammi circoscritti che le curve formano nel diagramma) rappresentano appunto le trasformazioni diretta e inversa del materiale SMA.

Queste temperature cambiano a seconda del livello di sforzo applicato, seguendo la relazione di Clausius-Clapeyron che indica come questa variazione avvenga linearmente con un coefficiente angolare pari a circa 10 MPa/°C, valore tuttavia dipendente dalla sezione del filo, che per sezioni ridotte - e a causa della tessitura in questo caso instaurata nel materiale - può ridursi

Tabella 3.3: Temperature di trasformazione di fase al variare del livello di sforzo

	σ [MPa]	T [°C]
A_f	50	98.26
	100	103.58
	150	108.16
	200	113.47
	300	127.00
M_s	50	23.00
	100	34.31
	150	42.03
	200	46.74
	300	56.81

a 5 MPa/°C. Di conseguenza, è stata ricavata dai dati sperimentali la relazione lineare e il coefficiente di Clausius-Clapeyron, specificatamente per le temperature A_f e M_s .

$$\begin{aligned}
 A_f &\rightarrow \frac{d\sigma}{dT} = 8.72 \text{ MPa}/^\circ\text{C} \\
 M_s &\rightarrow \frac{d\sigma}{dT} = 7.39 \text{ MPa}/^\circ\text{C}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

I risultati ottenuti si avvicinano alla teoria: questi dati potranno essere utilizzati in fase di progettazione per ottenere una stima delle temperature di trasformazione anche a livelli di sforzo differenti, e di conseguenza valutare l'iniezione di corrente per l'attivazione del filo.

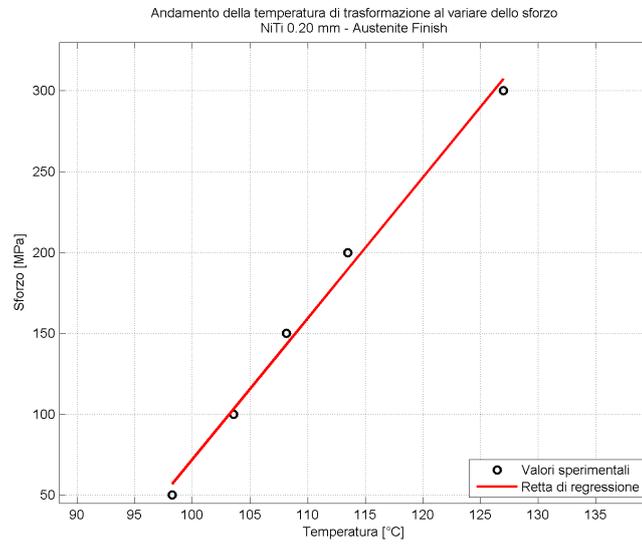


Figura 3.6: Clausius-Clapeyron: A_f

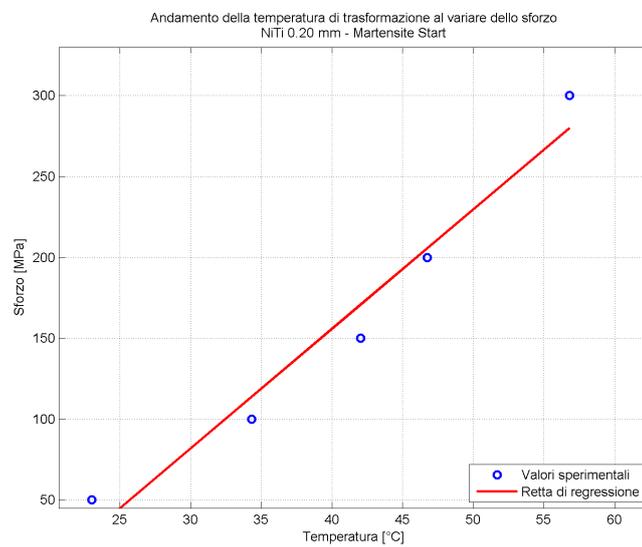


Figura 3.7: Clausius-Clapeyron: M_s

3.2.2 Stress vs strain: misure di deformazioni e stress relativi in isoterma

In questa seconda analisi, in maniera duale rispetto al caso precedente, la variabile che deve essere mantenuta costante durante il ciclo è la temperatura: una volta stabilita, si è applicato uno sforzo variabile linearmente fino ad un valore massimo (impostato) sufficiente ad evidenziare la classica curva 'a bandiera' presentata da queste leghe.

Le temperature sono state scelte in relazione precisa con quelle di trasformazione di fase ottenute mediante l'analisi DSC, ed in particolare si è selezionato:

- $T_1 = -40$ °C (al di sotto della M_f)
- $T_2 = 6$ °C (pari alla M_p)
- $T_3 = 25$ °C (temperatura ambiente)
- $T_4 = 60$ °C (pari alla R_p)
- $T_5 = 75$ °C (pari alla A_f)
- $T_6 = 85$ °C ($A_f + 10$ °C)
- $T_7 = 95$ °C ($A_f + 20$ °C)
- $T_8 = 105$ °C ($A_f + 30$ °C)
- $T_9 = 115$ °C ($A_f + 40$ °C)

Come da teoria, ci si aspetta che a basse temperature (in cui quindi è presente un'alta frazione martensitica) il diagramma sia caratterizzato da un plateau dovuto alla riorientazione delle varianti (detwinning), il quale sta alla base della deformazione di recupero ottenibile. Inoltre, si prevede che la pendenza del tratto elastico risulti maggiore man mano che la temperatura aumenta, con l'eccezione delle temperature al di sotto della M_f , data l'ulteriore rigidità dovuta ad effetti termodinamici secondari (si veda la figura 3.9 per maggiori dettagli). In questi casi comunque il recupero di deformazione è totale⁵, e questo lo si nota osservando la classica chiusura della curva, in cui il punto finale è a deformazione nulla. A temperature maggiori di A_f (le curve tratto-punto nel diagramma 3.8, escludendo l'ultima di colore giallo) si può notare invece che questo comportamento avviene parzialmente, con una piccola deformazione permanente residua. Una delle possibili cause è il

⁵ovviamente innalzando la temperatura sopra alla A_f dopo ogni ciclo di stress-strain

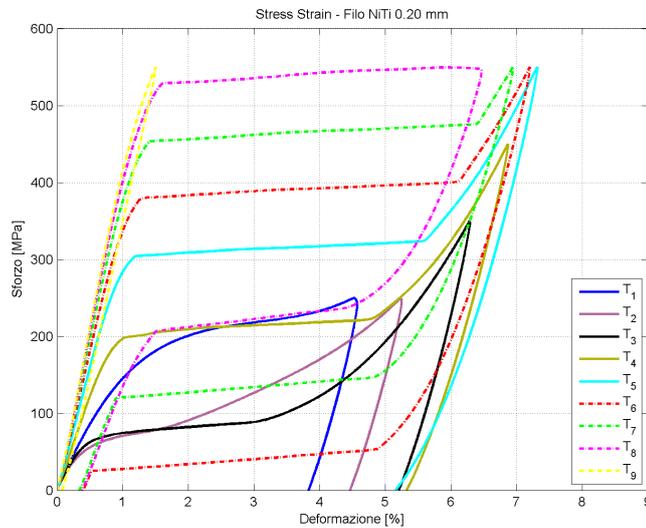


Figura 3.8: Analisi DMA: grafico sforzo/deformazione a temperatura fissata

fatto che il materiale ha subito una deformazione plastica irreversibile dovuta ai primi cicli⁶, oppure ancora perché si ha una minima frazione martensitica che nonostante la rimozione dello sforzo applicato resta stabile e non recupera completamente. Anche in questa circostanza, grazie al riscaldamento intermedio tra un ciclo e l'altro, tale deformazione si annulla.

A temperature sufficientemente alte invece ($T_9 = 115\text{ °C}$ o maggiori) si è completamente in fase austenitica e lo sforzo raggiungibile dalla strumento non è sufficiente per indurre la martensite a questa temperatura.

⁶che poi nei cicli successivi non si presenta più

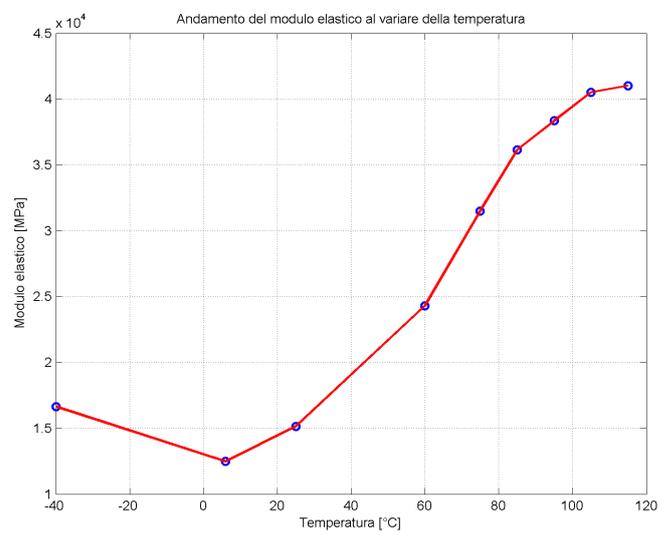


Figura 3.9: Andamento del modulo elastico al variare della temperatura

3.3 Caratterizzazione dell'antagonismo

Come descritto nel capitolo precedente, si è resa necessaria un'ulteriore prova di caratterizzazione per determinare le deformazioni dei fili se utilizzati in configurazione antagonista, effetto che sta alla base per la progettazione dell'attuazione della zampa in assenza di gravità. Essendo questo un test non convenzionale, il primo passo è stato quello di progettare l'attrezzatura dedicata: prendendo spunto dal lavoro compiuto da Wang et al. [21], si è scelto quindi di ottenere i dati di deformazione attraverso la misurazione dello spostamento orizzontale di una guida lineare posta tra i due fili collegati in serie (come mostrato in figura 3.10). L'altra estremità di ogni filo è invece vincolata ad una cella di carico così da misurare la forza di trazione sviluppata dall'attivazione, e quindi ricavare il già citato diagramma 'a farfalla' sforzo/deformazione.

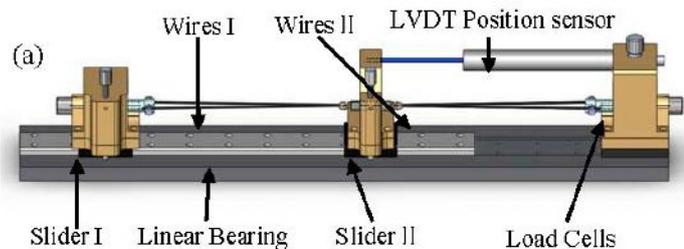


Figura 3.10: Schema della strumentazione utilizzata per il test di caratterizzazione

3.3.1 Allestimento del banco di prova

Ciò che è fondamentale per la scelta dei componenti da porre sul banco di prova è il fatto che occorre cercare di ridurre al minimo gli attriti di scorrimento perché si presume che la corsa della guida centrale sia di pochi millimetri, o analogamente che le forze in gioco siano basse (dell'ordine di qualche Newton).

E' perciò stata selezionata una guida lineare in scala ridotta del tipo a ricircolo di sfere, che sul mercato rappresentano il non-plus-ultra per quanto riguarda questa caratteristica: le specifiche tecniche possono essere visualizzate nell'immagine 3.11, dove le dimensioni scelte sono quelle della lunghezza del binario ($L = 70\text{mm}$) e dell'altezza complessiva ($H=13\text{ mm}$).

Un'ulteriore miglioria per ridurre gli inevitabili attriti è stata quella di utilizzare un laser per la misurazione dello spostamento: infatti per questo tipo di esperimento si può utilizzare anche un classico LVDT, ma in questo

Capitolo 3

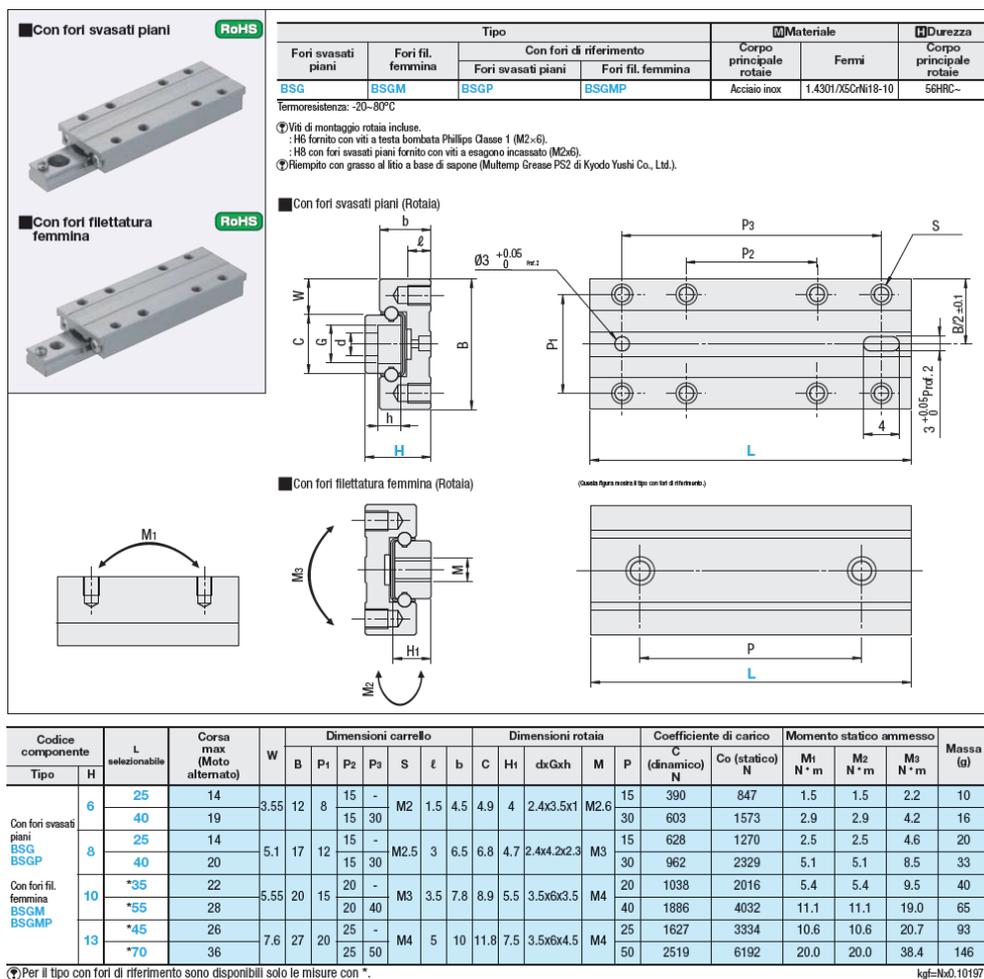


Figura 3.11: Specifiche della guida lineare: Misumi mod. BSGM

caso lo strumento deve essere collegato alla guida lineare e può perciò indurre forze indesiderate. Il target del laser consiste in un bersaglio di materiale metallico posizionato sulla guida e distante circa 10 cm dalla sorgente (valore nominale per una corretta misurazione).

Come detto in precedenza, uno dei due fili deve essere pre-deformato prima di poter svolgere l'esperimento. Esistono essenzialmente due modi per ottenere questo obiettivo: il primo è quello di tendere il filo e allungarlo di una lunghezza tale che quando rilasciato raggiunga la pre-deformazione voluta⁷, mentre la seconda modalità è quella di applicare una forza (sforzo) nota tale che produca l'allungamento desiderato.

⁷occorre considerare infatti anche il ritorno elastico, come mostrato in figura 3.15

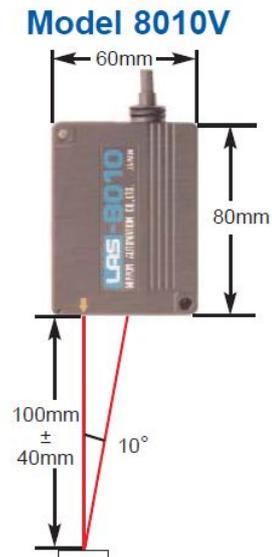


Figura 3.12: Laser: Trask Instrumentation mod. 8010v

E' utile quindi riferirsi al diagramma ottenuto mediante l'analisi meccanica di sforzo-deformazione a $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura 3.13), in quanto la pre-deformazione viene eseguita a temperatura ambiente: approssimando il ritorno elastico con semplici rette è possibile conoscere le deformazioni ottenibili a livelli di sforzo differenti dalla prova effettuata.

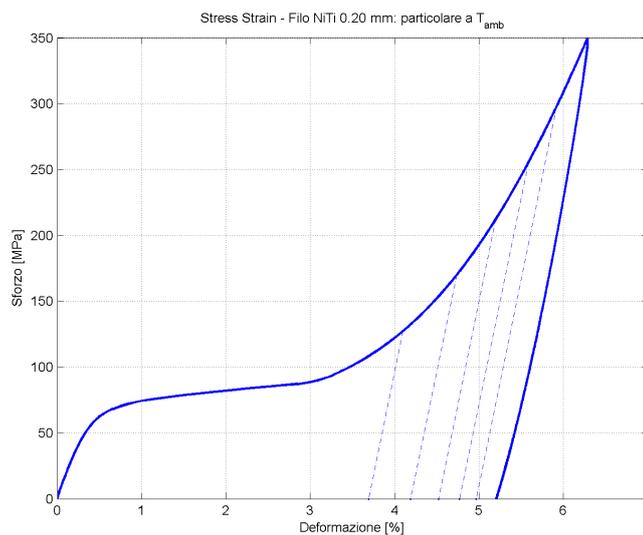


Figura 3.13: Diagramma sforzo/deformazione a $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Capitolo 3

In questo modo si può scegliere il grado di pre-deformazione desiderato a cui è associata la forza corrispondente da applicare al filo (figura 3.14).

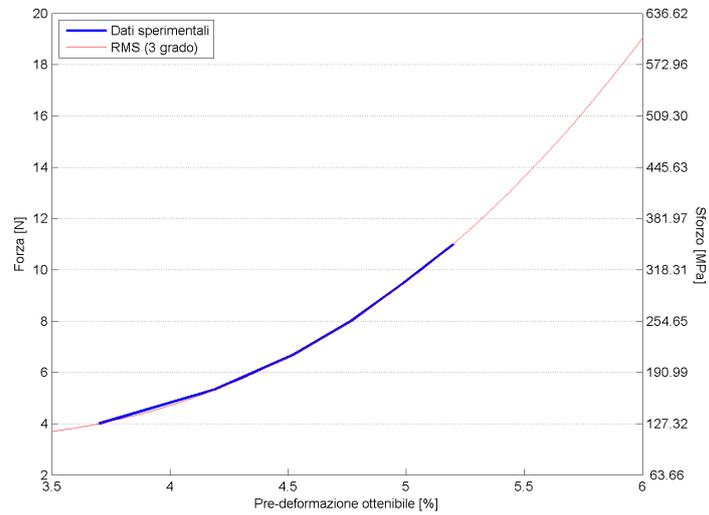


Figura 3.14: Diagramma forza/deformazione ottenibile a $T = 25^{\circ}\text{C}$

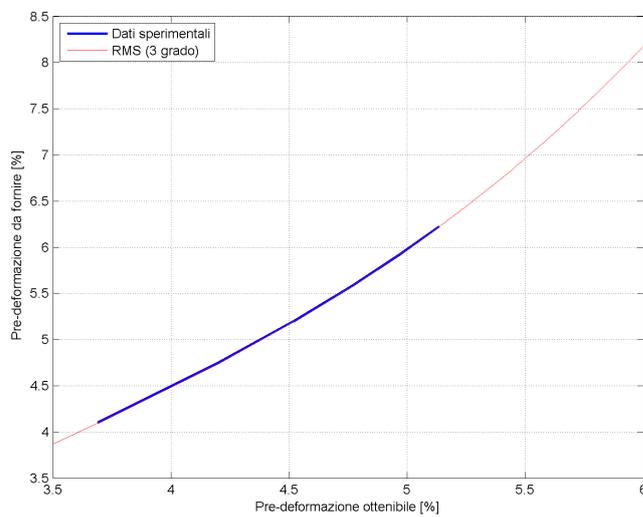
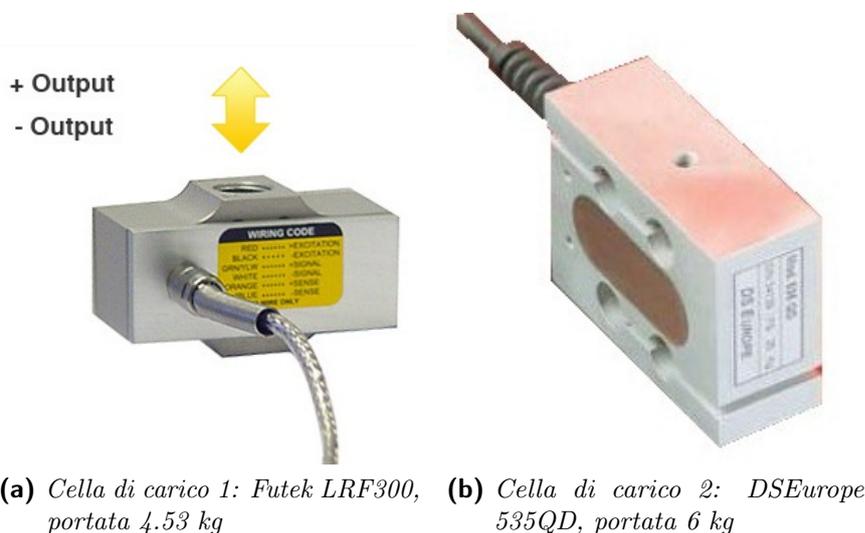


Figura 3.15: Pre-deformazione ottenibile considerando il ritorno elastico

Lo stesso risultato, come si diceva, può essere raggiunto se si ha a disposizione uno strumento in grado di allungare direttamente il filo misurandone la deformazione. Si è perciò scelta questa seconda soluzione, utilizzando una guida micrometrica posta sotto la cella di carico: agendo così infatti, si ha il duplice vantaggio di conoscere quando il filo è perfettamente teso (rilevando un piccolo scostamento dallo zero del carico) e contemporaneamente pilotare con precisione l'allungamento controllando la guida manualmente.

Riguardo le celle di carico, compatibilmente con la disponibilità dell'attrezzatura già presente in laboratorio (e soprattutto considerando le forze in gioco), si sono selezionate quelle aventi una portata relativamente bassa - rispettivamente di 4.53 e 6 kg - in modo da poterle utilizzare al meglio della loro precisione e sensibilità strumentale.



(a) Cella di carico 1: Futek LRF300, portata 4.53 kg (b) Cella di carico 2: DSEurope 535QD, portata 6 kg

Figura 3.16: Celle di carico per la misurazione della trazione

Passando invece all'alimentazione, la soluzione adottata è stata quella di far compiere un percorso di andata-ritorno ad entrambi i fili per poterli così attivare da un solo lato piuttosto che collegare i morsetti elettrici anche sui supporti posti sulla guida: in questo modo questi ultimi elementi possono essere semplicemente dei perni (preferibilmente costituiti di materiale isolante) senza alcuna strumentazione aggiuntiva che possa inficiare la misurazione.

Infine per ciò che concerne il vincolo, dato appunto che l'alimentazione viene erogata vicino alla cella di carico, è necessario che in quella zona vi sia un materiale isolante per evitare il corto circuito. Si è scelto quindi di costruire degli accessori in teflon, con una geometria tale da permettere una discreta semplicità di montaggio. Per bloccare materialmente il filo invece

Capitolo 3

sono stati utilizzati sistemi di crimpaggio meccanico di dimensioni ridotte con capacità di serraggio tramite viti.

Tutti i componenti elencati in precedenza (guide, supporti e strumentazione) hanno la necessità di essere alloggiati su una base metallica avente una lunghezza adeguata all'obiettivo da raggiungere: facendo riferimento al modello solido (vedi figura 3.17), si è deciso quindi che il banco di prova dovesse avere un ingombro in lunghezza di almeno 450 mm.

Per ottenere un'ottima stabilità globale è stata scelta una base spessa 20 mm, mentre per migliorare ulteriormente la precisione longitudinale della guida, è stata successivamente effettuata una scanalatura centrale profonda 2 mm e larga quanto il binario.

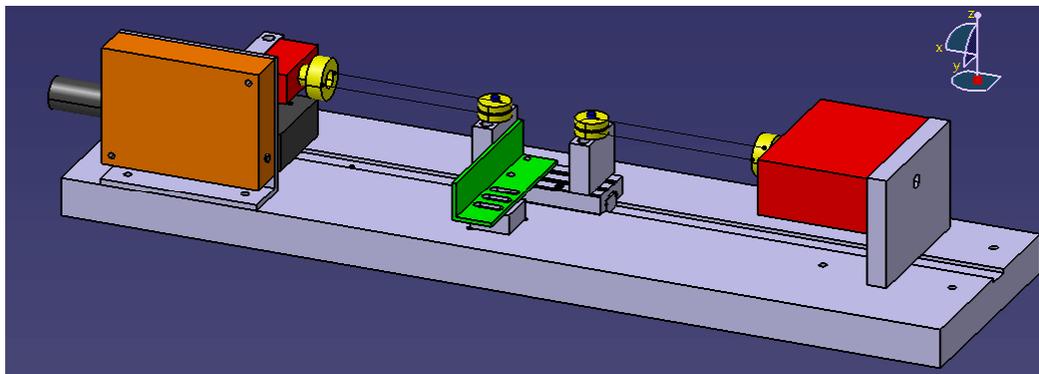


Figura 3.17: Modello CATIA dell'assieme del banco di prova: in rosso le celle di carico, in arancio il laser (con in verde il suo bersaglio), e in giallo i supporti in teflon

Sulla base metallica sono stati creati dei fori ulteriori a quelli di alloggio nominale per poter eventualmente modificare la lunghezza iniziale dei fili di Nitinol e provarne l'invariabilità dei risultati a tale modifica. In altre parole, si è scelta una distanza tra il supporto sulla guida lineare e il vincolo sulla cella di carico pari a circa 90 mm, riducibile o aumentabile di 33 mm.

In realtà, se si aumentasse ancor più il valore di questa distanza, la misurazione della deformazione risulterebbe migliore, in quanto essa dipende dalla risoluzione del laser ($50 \mu m$): tuttavia questo comporterebbe inevitabilmente l'allungamento del banco di prova (con conseguente aumento della lunghezza dei fili utilizzati, nonché dei tempi di riscaldamento/raffreddamento).

Le distanze indicate in precedenza rappresentano un buon compromesso per tutti questi fattori, in accordo con i già citati Wang [21] e Sofla [18] per test di caratterizzazione analoghi.

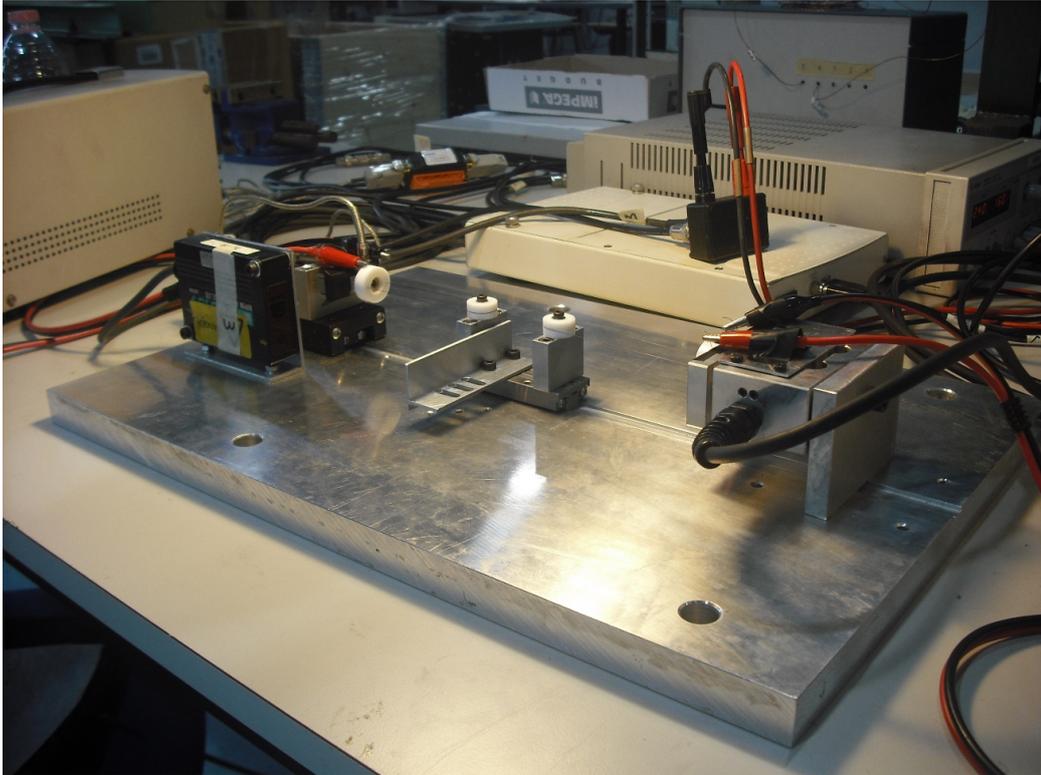


Figura 3.18: Banco di prova per i test di caratterizzazione: sullo sfondo si possono notare gli alimentatori (grigi) e la scheda di acquisizione (bianca)

3.3.2 Installazione dei fili

Le operazioni di montaggio costituiscono la principale problematica del test: infatti i fili devono essere tesi ma non sottoposti a sforzo, e soprattutto uno dei due deve essere pre-deformato prima dell'avvio.

La soluzione adottata è quindi stata la seguente:

1. Scelta di massima della lunghezza iniziale del filo 2 (quello non pre-deformato) e ancoraggio alla cella di carico corrispondente;
2. Ancoraggio al supporto della guida lineare;
3. Messa in tensione del filo 2, monitorando i dati della cella di carico 2;
4. Blocco della guida lineare sulla base;
5. Misurazione precisa della lunghezza del filo 2 (chiamata L nella sezione dedicata ai cenni teorici);

6. Determinazione della lunghezza del filo 1 ($L' = L \cdot (1 + \epsilon_1^s)$);
7. Ancoraggio e messa in tensione del filo 1, lungo L, monitorando i dati della cella di carico 1;
8. Pre-allungamento del filo 1 tramite slitta micrometrica, ottenendo la lunghezza L' maggiorata del ritorno elastico;
9. Rilascio dello sforzo indotto dalla slitta micrometrica, ottenendo la lunghezza L' desiderata;
10. Messa in tensione del filo 1, monitorando i dati della cella di carico 1;
11. Rilascio del blocco della guida lineare.

A questo punto si può dare inizio al test come illustrato nel capitolo precedente, con lo scopo di ottenere tutte le deformazioni incognite dei punti notevoli del grafico sforzo-deformazione.

3.3.3 Alimentazione

L'attuazione, ovvero il cambiamento di fase da martensitica ad austenitica del materiale, avviene tramite riscaldamento per effetto Joule: nella fattispecie si è scelto che i fili venissero percorsi da corrente controllando tramite due alimentatori il voltaggio (e di conseguenza l'amperaggio, dato che la resistenza dei fili non ha una variazione significativa durante la trasformazione⁸) necessario a superare la temperatura di A_f in un determinato intervallo di tempo scelto.

Per poter misurare la temperatura del filo e stabilire così la potenza necessaria, la prima soluzione concepita è stata quella di utilizzare due termocoppie di tipo S (Platino, Platino/Rodio): dopo diversi tentativi questo approccio è stato scartato in quanto non si è riuscita ad ottenere una valida misurazione a causa dell'eccessiva dispersione termica dovuta alla convezione con l'ambiente esterno in relazione al diametro fine del filo.

In particolare, nel momento in cui si notava visivamente il cambiamento di fase nel materiale, ovvero si era nell'intorno della temperatura di trasformazione (di circa 75 °C), la temperatura rilevata dalle termocoppie, oltre ad

⁸Questa affermazione non è del tutto vera, in quanto ovviamente la resistenza è direttamente proporzionale alla lunghezza del filo ($R = \tilde{\rho}l/S$, con $\tilde{\rho}$ indicante la resistività del materiale e S la sezione del filo); inoltre essa aumenta all'aumentare della temperatura, quindi varia in maniera duale rispetto alla relazione precedente, dato che il filo attivo si accorcia. Tuttavia nel caso in esame si è dimostrato sperimentalmente che la variazione dovuta ai due effetti è minore del 3-5%, portando di fatto ad un cambiamento di amperaggio dell'ordine di 30 mA, in quanto le lunghezze in gioco sono relativamente ridotte.

essere molto oscillante a causa dei moti convettivi, era di circa 40-50 °C e quindi ben al di sotto della temperatura teorica. Occorre sottolineare però che, nonostante la termocoppia fosse ben a contatto con il filo di Nitinol, la temperatura misurata è in realtà una media tra quella della superficie esterna del materiale e la temperatura dell'ambiente, giustificando così l'errore elevato⁹.

La soluzione alternativa adottata è stata quindi quella di considerare una versione, seppur semplificata, del bilancio termico tempo variante dei flussi agenti sul sistema in esame e di calcolare la corrente necessaria in via teorica.

Bilancio termico

Considerando anche il contributo radiativo, il bilancio termico agente sul filo di Nitinol può essere scritto nella seguente forma:

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = Ri^2 - hA(T - T_{amb}) - \sigma \epsilon A(T^4 - T_{amb}^4) \quad (3.2)$$

dove si è indicato con c_p il calore specifico del Nitinol, ρ la sua densità, V il volume del campione, R la resistenza elettrica ad esso associata, i la corrente, h il coefficiente di scambio termico convettivo, A la superficie laterale del filo, σ la costante di Stefan-Boltzmann, ϵ l'emissività, dt l'intervallo di tempo e con T la temperatura.

Scegliendo e mantenendo un valore costante di corrente, la variabile d'interesse è ovviamente la temperatura all'interno del filo in un dato istante di tempo: utilizzando per semplicità la risoluzione tramite EA, è possibile conoscere tale grandezza al passo temporale $j + 1$ -esimo conoscendo quello al passo temporale precedente (partendo da una temperatura iniziale pari a quella ambiente).

$$T_{j+1} = T_j + \frac{[Ri^2 - hA(T_j - T_{amb}) - \sigma \epsilon A(T_j^4 - T_{amb}^4)]dt}{\rho c_p V} \quad (3.3)$$

semplificabile in:

$$T_{j+1} = T_j + \frac{[(\tilde{\rho}i^2)/(\pi^2 r^3) - 2h(T_j - T_{amb}) - 2\sigma \epsilon(T_j^4 - T_{amb}^4)]dt}{\rho c_p r} \quad (3.4)$$

dove compaiono $\tilde{\rho}$, che rappresenta la resistività del materiale, e r che è ovviamente il raggio del filo (0.1 mm).

⁹Infatti nei test di attivazione di fili sottili come questi e di studio delle fasi di recupero, solitamente i set up sperimentali sono isolati in una campana trasparente che stabilizza l'ambiente esterno e permette una corretta misura dei parametri in gioco.

I dati considerati per il calcolo sono (cfr. tabella 2.4):

- Densità Nitinol: 6450 kg/m^3 ;
- Resistività: $0.88 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega\text{m}$;
- Calore specifico: 542 J/(kgK) ;
- Emissività: 0.7;

Per la determinazione del coefficiente di scambio termico convettivo h invece, sono state utilizzate le relazioni disponibili in letteratura [20] e valide per la convezione naturale di cilindri metallici di diametro fine in posizione orizzontale (correlazione di Morgan):

$$\left\{ \begin{array}{l} Ra = \frac{\rho_{air} g d^3 dT}{T_{film} \alpha \mu} \\ Nu = 1.02 Ra^{0.148} \\ h = 0.028 Nu/d \end{array} \right. \quad (3.5)$$

dove Ra indica il numero di Rayleigh, Nu il numero di Nusselt, ρ_{air} la densità dell'aria, g l'accelerazione di gravità, d il diametro del filo, dT la differenza di temperatura, T_{film} la temperatura media tra quella del filo e quella ambiente, α la diffusività dell'aria e μ la sua viscosità.

Con i dati indicati in precedenza si ottiene un coefficiente h pari a circa $86 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tempi di riscaldamento/raffreddamento

Il risultato della risoluzione del bilancio termico precedente è che in atmosfera non controllata, condizione operativa del laboratorio tecnologico, per ottenere l'attivazione del filo e vincere la convezione esterna occorrono almeno 0.38 A^{10} : per le prove si è quindi scelto un valore di 0.57 A , sufficientemente maggiore rispetto a quello limite e deciso in modo tale da ottenere un'attivazione in un tempo ragionevole (1 secondo). Questi valori si intendono validi per qualsiasi lunghezza del filo, in quanto la relazione del bilancio scritto in precedenza non dipende da essa: ciò che cambia al variare di tale grandezza è però la potenza richiesta, dato che $P = Ri^2$.

¹⁰O meglio una tensione tale che produca 0.38 A di corrente, misurando preliminarmente la resistenza del filo di Nitinol, così da superare $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ($A_f + 15 \text{ }^\circ\text{C}$)

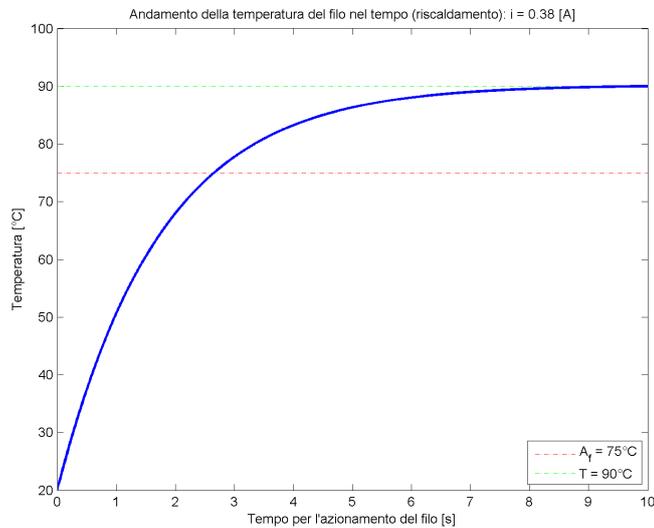


Figura 3.19: Valore minimo di corrente necessaria per l'attivazione del filo, considerando la convezione esterna e l'irraggiamento ($i = 0.38$ A)

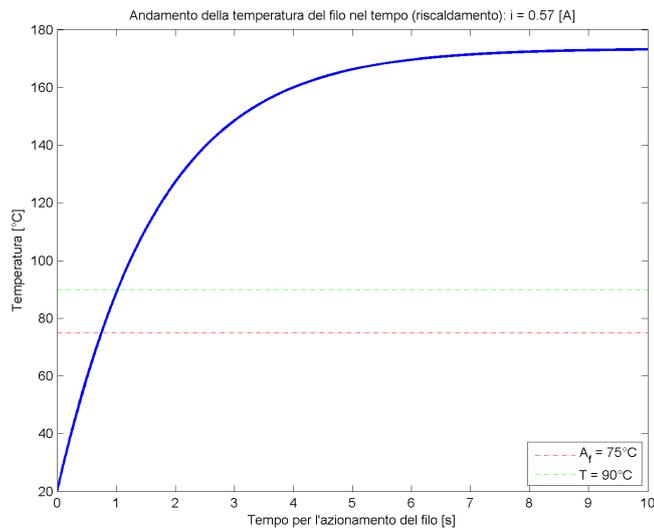


Figura 3.20: Tempo necessario per l'attivazione del filo considerando la convezione esterna e l'irraggiamento ($i = 0.57$ A)

Per quanto riguarda il riscaldamento dunque non si hanno particolari problemi una volta che si introduce la corrente necessaria: non bisogna infatti preoccuparsi se la temperatura di regime supera quella di trasformazione, in quanto la temperatura di utilizzo di questi materiali può arrivare tranquilla-

Capitolo 3

mente fino a 250-300 °C senza riscontrare modificazioni della microstruttura. Il problema principale però è nei tempi di raffreddamento: in questo caso, partendo da una temperatura del filo di 175 °C (valore teorico di regime ottenuto dai risultati) si ha che occorrono circa 10-11 secondi per riportare il materiale a temperatura ambiente.

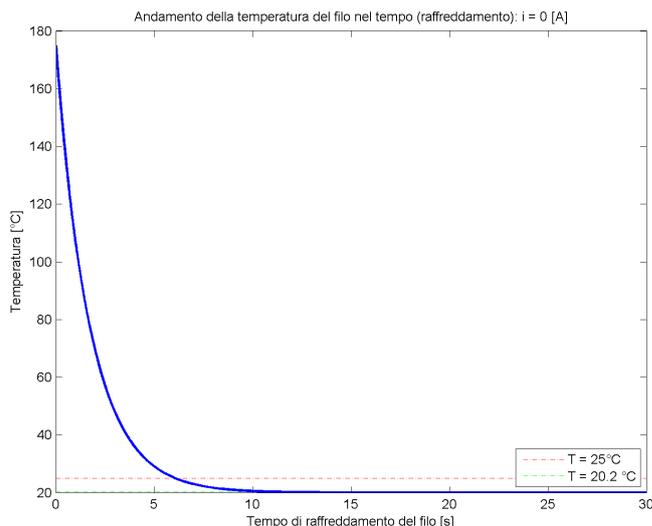


Figura 3.21: Tempo necessario per il raffreddamento del filo considerando la convezione esterna e l'irraggiamento

Considerando invece l'ambiente spaziale, e più precisamente lo spazio profondo, dove il termine convettivo è nullo e lo scambio termico è principalmente radiativo, ipotizzando la temperatura esterna di 3 K e mantenendo costante il valore di corrente scelto ($i = 0.57$ A), i tempi di riscaldamento per il primo ciclo si alzano di circa 3 secondi; per i cicli successivi invece i tempi necessari all'attivazione saranno minori di 1 secondo, assumendo condizioni iniziali differenti (es. 20 °C) date dalla temperatura minima ottenuta dal primo ciclo di raffreddamento.

La criticità fondamentale però in questa fase sono i tempi massimi di attivazione, in quanto si ottiene un valore di temperatura di regime decisamente più elevato rispetto al caso delle condizioni ambientali del laboratorio (maggiore di 300 °C, temperatura limite di utilizzo). Questo aspetto, sotto un certo punto di vista può essere considerato un fattore positivo per la riduzione dei tempi-ciclo, ma nasconde la necessità di progettare un sistema di controllo per una corretta iniezione di corrente.

Per ciò che concerne il raffreddamento invece, i problemi sono peggiori: scegliendo una temperatura accettabile (ad esempio sempre 20 °C come valore

minimo da raggiungere, partendo ancora da 175 °C), il tempo necessario per la disattivazione è dell'ordine dei 40 secondi¹¹.

Tutte queste considerazioni tuttavia non sono molto significative, poiché i dimostratori per uso spaziale sono dotati di un sistema di controllo termico attivo e passivo tali da isolare e mantenere range di temperature d'utilizzo prefissate. Inoltre, occorre precisare che la temperatura esterna quasi certamente sarà maggiore di quella dello spazio profondo, ed anzi, se la zampa viene direttamente esposta al sole, si verifica il problema opposto di temperature esterne così elevate da indurre la trasformazione di fase e quindi attivazioni non desiderate.

Ciò che è certo però è che per ottenere tempi di raffreddamento più bassi occorrono necessariamente sistemi attivi, quali per esempio celle di Peltier (si veda [16] per ulteriori dettagli), mentre la fase di riscaldamento ha bisogno di sistemi di controllo tali che riducano i tempi di attivazione e di conseguenza la temperatura massima raggiunta.

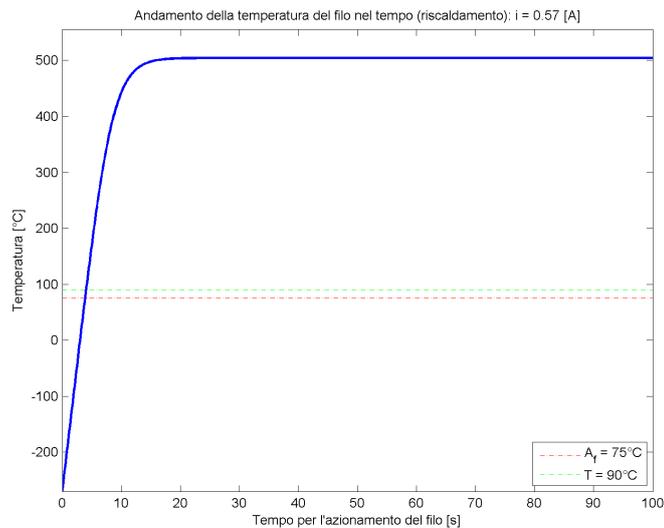


Figura 3.22: Tempo necessario per l'attivazione del filo considerando solo l'irraggiamento ($i = 0.57$ A): ambiente spaziale

¹¹I risultati qui ottenuti sono stati confermati anche attraverso un'analisi FEM tempo variante mediante il software *Comsol Multiphysics 3.5*[®] in cui sono state poste le condizioni al contorno di flusso convettivo e/o radiativo e le temperature iniziali.

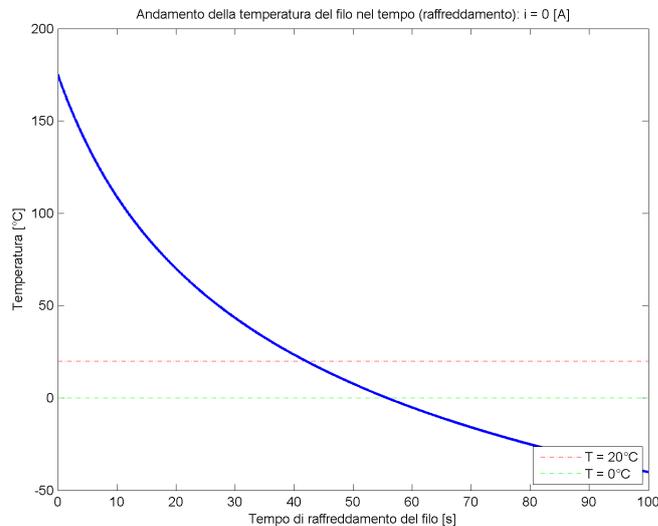


Figura 3.23: Tempo necessario per il raffreddamento del filo considerando solo l'irraggiamento: ambiente spaziale

3.3.4 Acquisizione dati

Per il recupero dei dati si è utilizzata una scheda di acquisizione multi-canale modello *NI USB-6289* dell'azienda *National Instruments*[®], mentre l'interfaccia software è stata creata tramite il programma *LabView*[®] 2012.

Gli ingressi della scheda, come indicato in precedenza, sono gli strumenti di misura utilizzati per l'esperimento:

- Ch 0: LASER;
- Ch 1: CELLA CARICO 1 (Futek LRF300);
- Ch 2: CELLA CARICO 2 (DSEurope 535QD);
- Ch 3: Alimentatore 1;
- Ch 4: Alimentatore 2;

E' da sottolineare che i canali 3 e 4 sono stati aggiunti successivamente per ottenere anche una verifica sull'ingresso di alimentazione (V) in funzione del tempo. Dopo aver calibrato le celle e il laser, ottenendo quindi il valore del guadagno e dell'offset di ogni strumento, si è proceduto dunque alla stesura del software, di cui si mostra l'architettura a blocchi (figura 3.24).

Il blocco principale *DAQ Assistant* rappresenta la scheda di acquisizione, le cui uscite possono essere visualizzate in grafici real time; la storia temporale

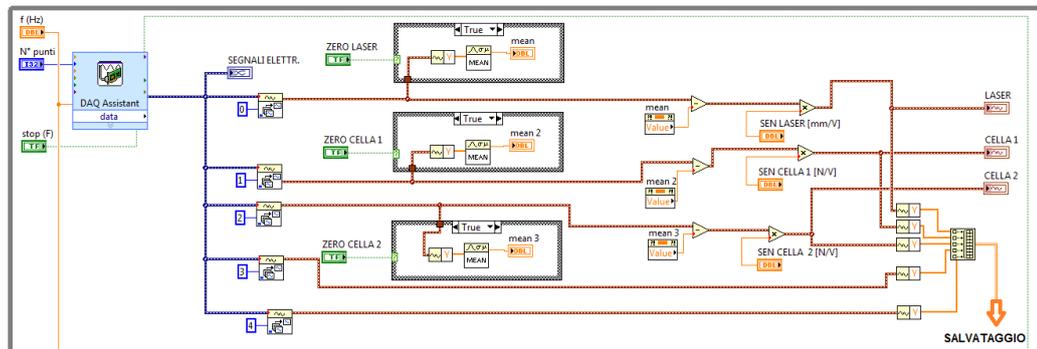


Figura 3.24: Software *LabView*[®] per l'acquisizione dati

di tali grandezze viene invece memorizzata in file di testo per una successiva manipolazione.

Dopo alcune prime prove, in cui l'alimentazione veniva effettuata manualmente per n cicli, senza un vero e proprio controllo temporale¹², si è deciso di automatizzare il tutto costruendo un piccolo circuito elettrico di supporto costituito da due relé il cui scopo era quello di fungere da interruttori.

Di conseguenza, è stato creato un ulteriore programma *LabView*[®] per la generazione dei segnali d'ingresso modellati come onde quadre, in modo da poter variare i cicli di attivazione/disattivazione dell'alimentazione in maniera ripetibile; in particolare, i tempi di riscaldamento e di raffreddamento sono stati impostati entrambi pari a 20 secondi, per ottenere un valore di spostamento della guida (ovvero della deformazione dei fili) a regime¹³.

Nella figure 3.25 e 3.26 è possibile notare il segnale di corrente ideale in confronto a quello effettivamente erogato¹⁴: oltre al lieve ritardo di fase dovuto ai tempi di elaborazione e ad altri contributi, si sottolinea la durata del picco di corrente, il quale identifica il cambiamento di fase del materiale.

Collegato a questo aspetto, un'altra informazione che è possibile estrapolare dai grafici è la variazione della resistenza del filo durante la trasformazione: come ipotizzato, essendo questa differenza inferiore al 5% rispetto al valo-

¹²considerando comunque un tempo di attivazione/disattivazione di circa 20 secondi, come evidenziato nel paragrafo precedente.

¹³In realtà il tempo di riscaldamento può essere ridotto almeno della metà perché, come si nota nell'immagine 3.20, si arriva a regime già dopo 5 secondi. Per i tempi di raffreddamento invece si consiglia di non diminuire il valore di 20 secondi stabilito, date le inerzie termiche residue che vengono accumulate ad ogni ciclo.

¹⁴si ricorda però che l'ingresso viene dato in tensione, limitando in corrente, trasformandolo in un segnale di corrente semplicemente dividendo per la resistenza del filo, assunta costante

Capitolo 3

re nominale, è stato possibile ribadire le assunzioni fatte in precedenza di resistenza costante.

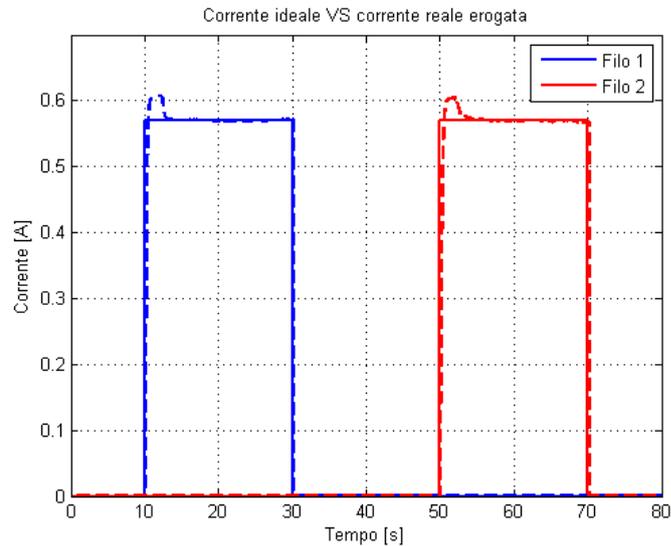


Figura 3.25: Segnale di corrente ideale (linea continua) VS. corrente realmente erogata (linea tratteggiata)

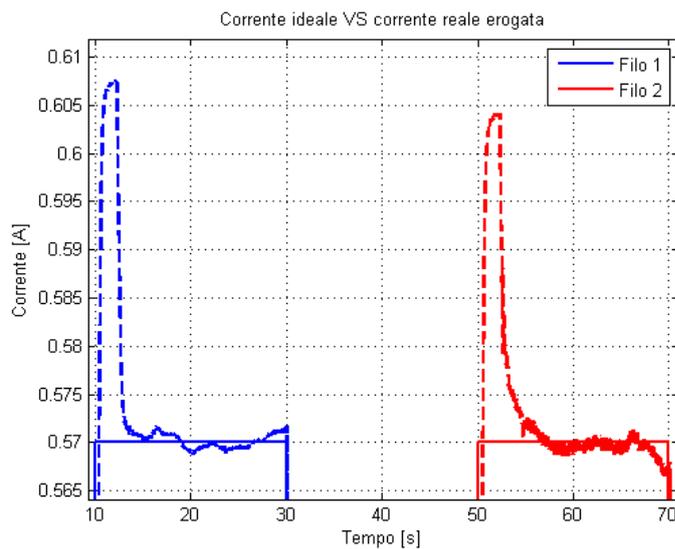


Figura 3.26: Segnale di corrente ideale (linea continua) VS. corrente realmente erogata (linea tratteggiata): particolare

3.3.5 Risultati dei test

Una volta definito il tutto (architettura del banco di prova, scelta dell'alimentazione e dei tempi minimi di attivazione/disattivazione, verifiche di funzionamento della strumentazione e dell'acquisizione dati) si è proceduto con la campagna di prove sperimentali. Per ottenere una valida gamma di risultati che possano essere ritenuti accettabili e ripetibili, si è deciso di analizzare tre condizioni differenti di pre-montaggio (tabella 3.4), modificando al contempo più variabili: ad esempio, si è fatta variare la pre-deformazione del filo 1 scegliendo valori compresi tra il 3 ed il 6%, oppure si sono cambiate le lunghezze dei campioni, i tempi di accensione, nonché il numero di cicli del fenomeno.

Tabella 3.4: Condizioni di pre-montaggio scelte per i test di caratterizzazione dell'antagonismo

#	Caso	Lunghezza filo 1	Lunghezza filo 2
1	$t < 0$	L	L
	$t = 0$	$L' = L + \Delta L$	L
2	$t < 0$	L	L
	$t = 0$	$L' = L + \Delta L$	$L' = L + \Delta L$
3	$t < 0$	$L - \Delta L$	L
	$t = 0$	L	L

Nella tabella si è indicato con la dicitura ' $t < 0$ ' lo stato iniziale dei fili prima dell'eventuale pre-deformazione, mentre con ' $t = 0$ ' la condizione di partenza per l'avvio del test. In altre parole, viene distinto il concetto tra *lunghezze iniziali* e *lunghezze modificate* una volta completate le operazioni preliminari per l'assemblaggio. La deformazione utile risultante che appare nei grafici dei prossimi paragrafi quindi, essendo definita come «rapporto tra la variazione di lunghezza di una fibra di materiale e sua la lunghezza originaria» (def. di Beeckman-Bernoulli), è riferita alle condizioni ' $t < 0$ '.

Nelle prossime pagine si mostrano alcuni risultati ottenuti; tuttavia si anticipa già che si è scelto di ripetere più volte il caso '1', anche denominato nel seguito prova '*standard*', optando per la pre-deformazione del 4% per il primo filo. Questo livello di pre-deformazione scelto è giustificato dal fatto che esso è il valore che la ditta produttrice garantisce abbia ripetibilità di minimo 100000 cicli (o meglio compreso tra 100k e 1000k cicli), sotto uno sforzo minore di 150 MPa (valore quest ultimo superiore ma paragonabile allo sforzo necessario al detwinning del Nitinol a temperatura ambiente).

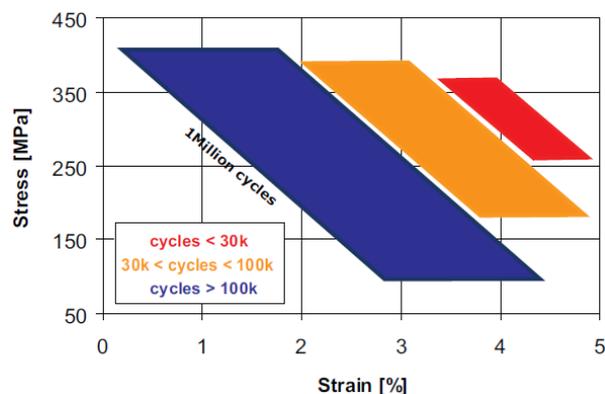


Figura 3.27: Performance a fatica per i fili scelti

Caso 1 - prova 'standard'

Questo tipo di prova, come già sottolineato, è stata quella più studiata ed analizzata per ottenere un buon valore medio dei punti notevoli di interesse del grafico a farfalla sforzo/deformazione. Il test si riferisce alle medesime procedure descritte nel paragrafo '*Ciclo preparatorio per attuatori antagonisti*', pertanto i fili sono inizialmente indeformati, tesi e della stessa lunghezza. Prima di dare il via alla prova, occorre pre-allungare il filo 1 della quantità stabilita e azzerare il carico (applicato al filo stesso per deformatarlo).

Nel seguito viene illustrato qualche risultato ottenuto (pre-deformazioni del 3, 4 e 5%), dove si può notare che, in via generale, più si aumenta la pre-deformazione migliori sono le prestazioni ottenute, intese in termini di deformazione utile (figure 3.28, 3.29, 3.30).

Questo concetto è valido non oltre una certa pre-deformazione in quanto si potrebbe giungere alla plasticizzazione del materiale in fase martensitica, rendendo così inutilizzabile l'attuatore: in particolare, come si potrà notare nella sezione seguente, la massima performance del filo qui selezionato si verifica applicando una pre-deformazione del 4.8%.

Oltre alla ovvia considerazione che più il materiale viene sollecitato, più la tensione interna aumenta (si veda il grafico in basso a destra di ogni prova dove si mostra la lettura delle celle di carico), si può notare che si ha un picco di forza ad ogni attuazione. Questo fenomeno può essere dovuto essenzialmente a due fattori: il primo è sicuramente l'effetto dell'attrito statico tra la guida e il carrello che occorre vincere per far sì che il movimento avvenga; il secondo, forse quello più rilevante, è dovuto alle caratteristiche meccaniche del materiale in fase martensitica, ed in particolare al limite di sforzo da raggiungere per l'inizio del detwinning.

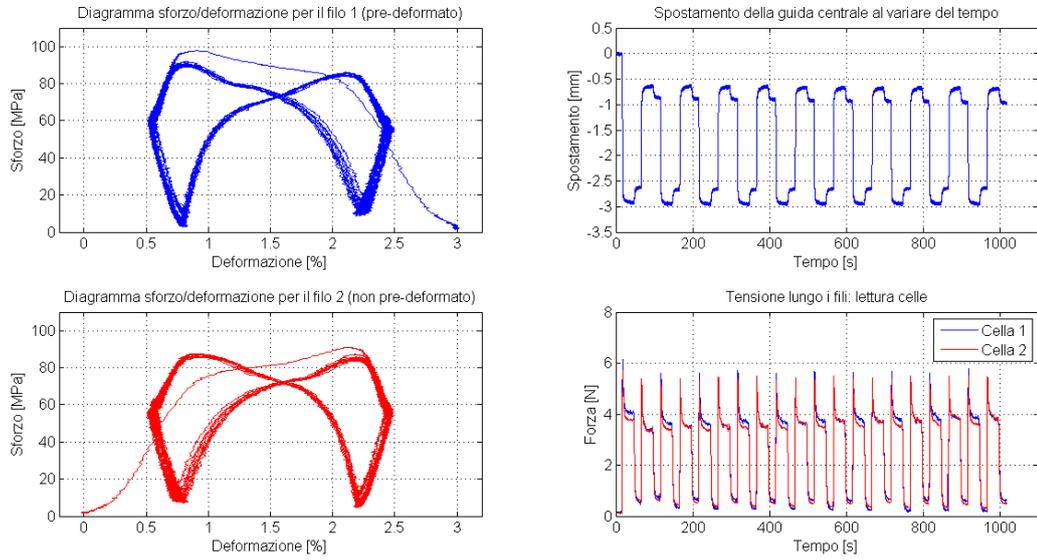


Figura 3.28: Caso 1: pre-deformazione filo 1 al 3%

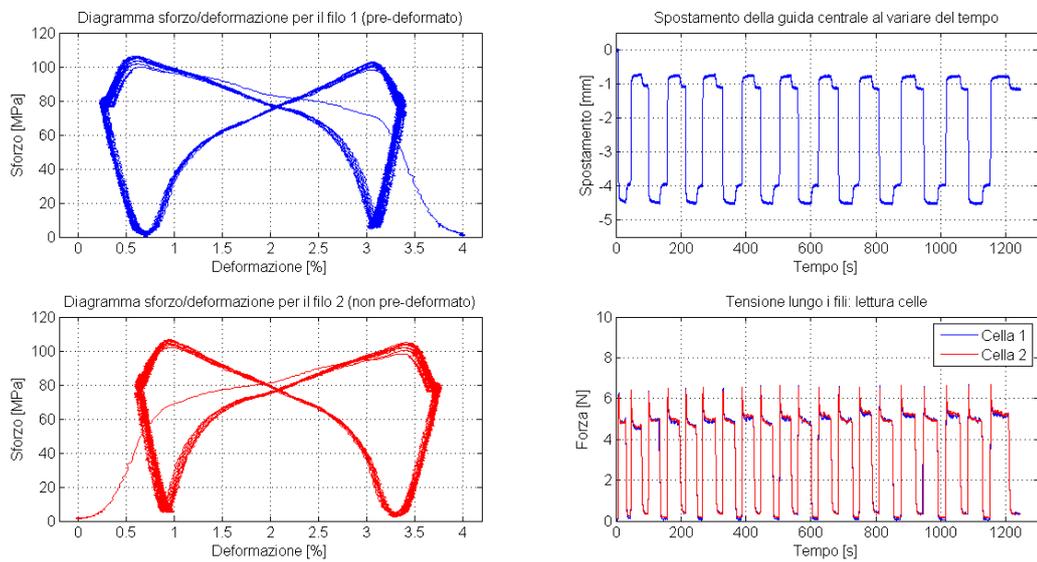


Figura 3.29: Caso 1: pre-deformazione filo 1 al 4%

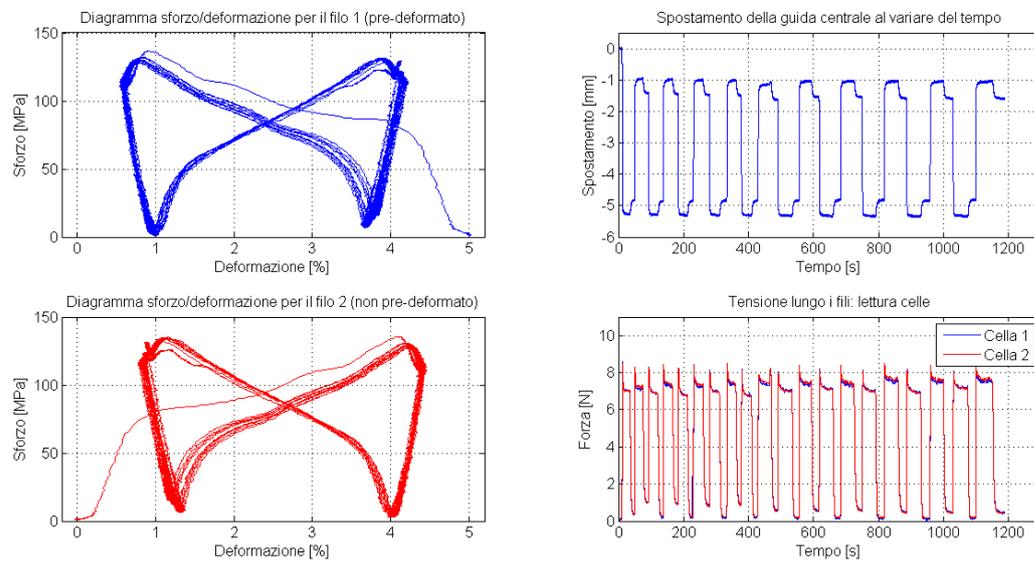


Figura 3.30: Caso 1: pre-deformazione filo 1 al 5%

Caso 2

In questo tipo di prova si è studiato il caso in cui i due fili, di lunghezza iniziale uguale, vengono pre-deformati della stessa quantità (mediante la slitta micrometrica) e, senza rilasciare lo sforzo, vengono azionati in sequenza.

Come intuibile, si aspetta che le deformazioni utili siano maggiori rispetto al caso precedente, che le 4 posizioni d'equilibrio siano nettamente più distanziate (farfalla più *aperta*) ma anche che si solleciti il materiale in maniera molto più rischiosa, portandolo al limite dello snervamento con pre-deformazioni minori: infatti si è dimostrato che effettuando prove con pre-deformazioni maggiori del 5% si ottiene la plasticizzazione del filo non azionato, ovvero quello in fase martensitica.

A differenza della prova 'standard', in questo caso la tensione interna ai due fili all'inizio della prova è diversa da zero (vedi figure 3.31, 3.32, 3.33), e la deformazione di partenza è pari a quella scelta per la prova. Come ipotizzato, le deformazioni massime raggiunte sono maggiori, in quanto le condizioni iniziali facilitano il superamento dello sforzo critico di detwinning.

Inoltre, in questo modo, il filo non attivo è indotto a percorrere anche buona parte del secondo tratto elastico (giungendo come detto ai limiti meccanici e giustificando così il fenomeno).

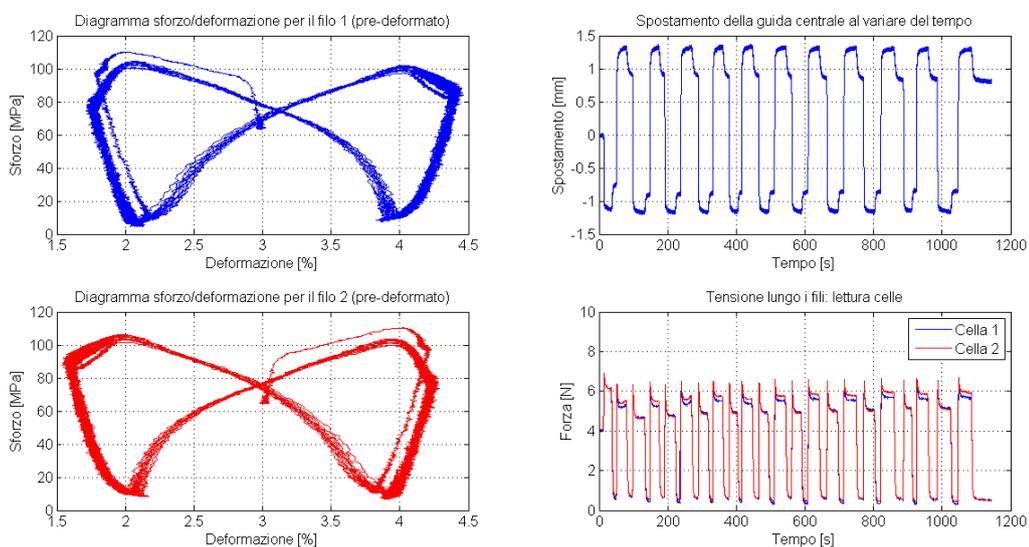


Figura 3.31: Caso 2: pre-deformazione entrambi i fili al 3%

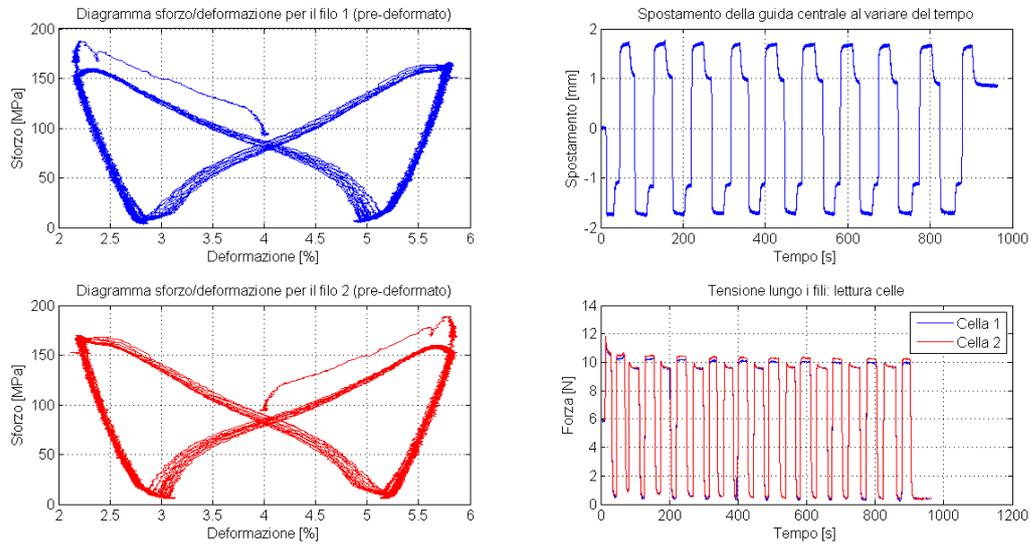


Figura 3.32: Caso 2: pre-deformazione entrambi i fili al 4%

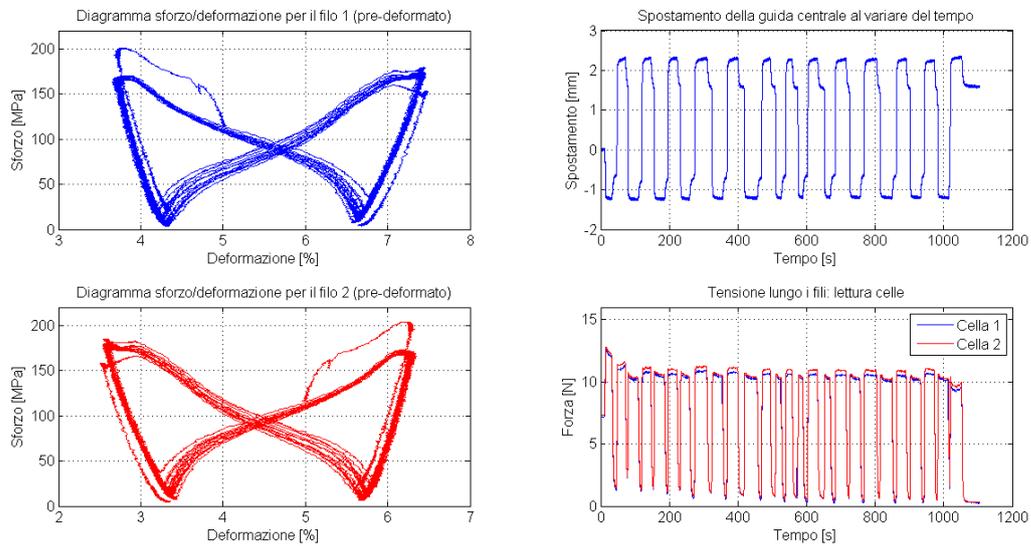


Figura 3.33: Caso 2: pre-deformazione entrambi i fili al 5%

Caso 3

Nell'ultimo caso analizzato, le lunghezze originarie dei fili sono diverse, e regolate in modo tale che la loro lunghezza sia pari solo dopo la pre-deformazione del filo 1.

Ne consegue la necessità di manipolare il risultato di deformazione, in quanto riferito a due lunghezze differenti; i grafici ottenuti, per le convenzioni assunte, non potranno più essere speculari come negli altri due casi proposti.

Anche in questa circostanza però, così come per la prova 'standard', la tensione interna dei fili prima dell'avvio del test è pari a zero.

Queste prove sono state effettuate per completezza, e i risultati evidenziano che sono paragonabili a quelli ottenuti nel caso '1', sia in termini di deformazione utile ottenuta, sia in termini di sforzo interno.

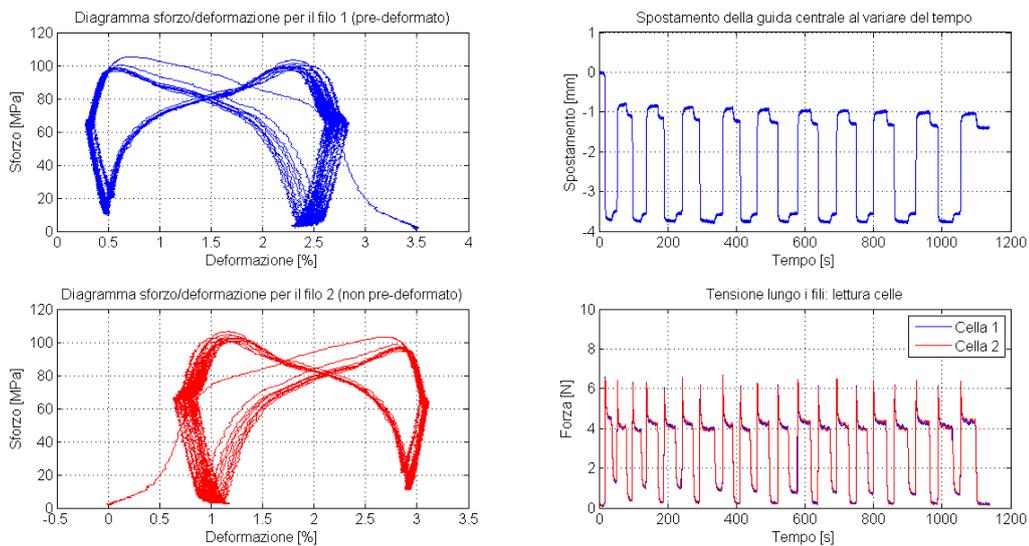


Figura 3.34: Caso 3: pre-deformazione filo 1 al 3.5%

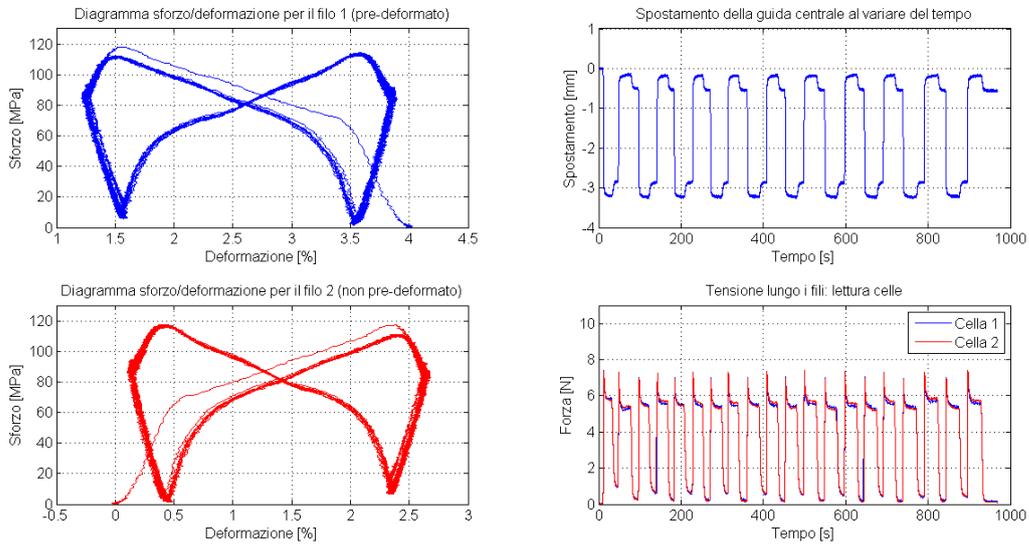


Figura 3.35: Caso 3: pre-deformazione filo 1 al 4%

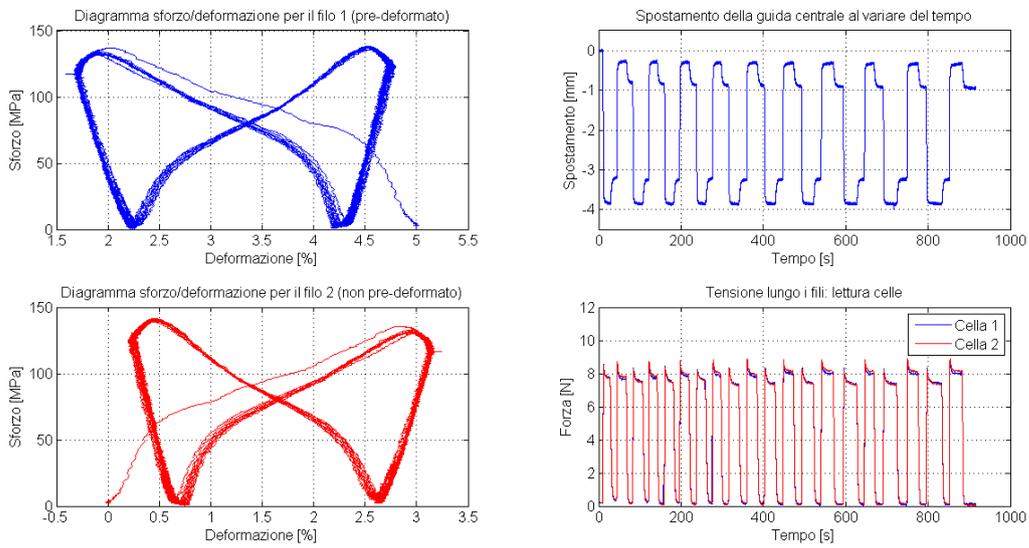


Figura 3.36: Caso 3: pre-deformazione filo 1 al 5%

Analisi globale della prova 'standard'

Il risultato ottenuto dall'analisi statistica della serie di prove effettuate (prova 'standard') può essere visualizzato in un diagramma pre-deformazione VS. deformazione utile ottenuta. Indicando con le lettere A, B, C, D i 4 punti notevoli della farfalla, e con E, F, G, H gli intervalli ad essi associati (tali che $E = D-A$; $F = B-C$; $G = B-D$; $H = A-C$ come viene mostrato nell'immagine 3.37) è stato possibile ottenere il grafico relativo (figura 3.38).

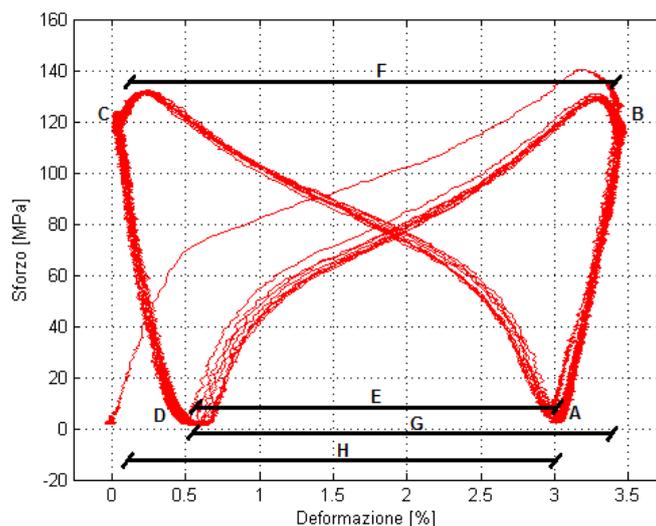


Figura 3.37: Legenda per i punti notevoli

Tabella 3.5: Risultati globali della prova 'standard'

ϵ_1^s [%]	E [%]	F [%]	G [%]	H [%]
3.0	1.4552	1.8997	1.7022	1.6527
3.5	2.0247	2.7716	2.4170	2.3792
4.0	2.5578	3.0934	2.8228	2.8284
4.5	2.6226	3.6050	3.0891	3.1385
5.0	2.7340	3.5901	3.1370	3.1871
5.5	2.5090	3.5553	3.0140	3.0503

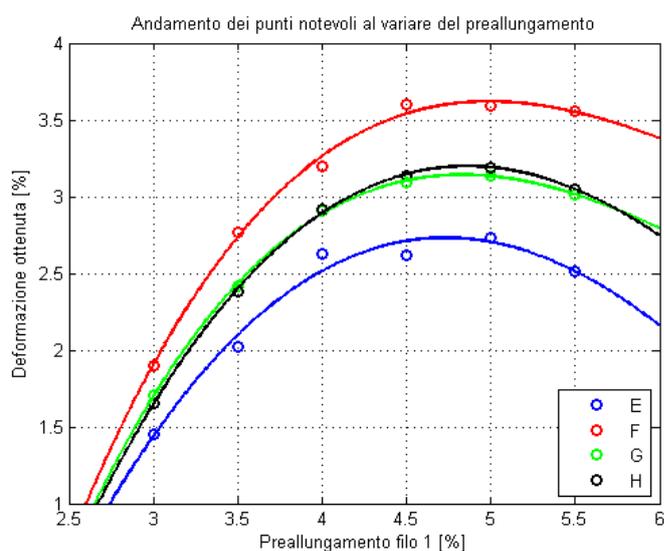


Figura 3.38: Risultati globali della prova 'standard'

Come anticipato, si riesce ad ottenere la massima deformazione utile con una pre-deformazione del filo 1 pari al 4.8%: oltre questo valore inizia il decadimento delle prestazioni dovuto all'avvicinarsi sempre più alla plasticizzazione del materiale in fase martensitica. Ovviamente, gli andamenti degli intervalli G e H sono pressoché coincidenti, confermando la simmetria dell'andamento a farfalla: essi rappresentano le differenze di deformazione ottenute quando il filo viene attivato, ed è perciò il valore fondamentale che sta alla base della progettazione dell'attuatore.

Per quanto riguarda gli intervalli E ed F invece, si nota che la loro differenza aumenta all'aumentare della pre-deformazione: in altre parole i quattro punti di equilibrio sono via via più distanziati, e questo si traduce in quattro posizioni che la zampa può assumere durante il ciclo di attivazione.

Questo aspetto può rivelarsi positivo o negativo a seconda dell'utilizzo: infatti, se si volessero quattro posizioni distinte (massimo e minimo assoluto quando i fili sono attivi, massimo e minimo relativo quando essi sono inattivi) si consiglia di pre-deformare il filo ad un livello compreso tra il 4.5% ed il 5.5%, o in alternativa seguire le procedure del caso '2' (pre-deformare entrambi i fili partendo da una condizione di sforzo non nullo).

Se invece l'obiettivo è quello di ottenere una sorta di interruttore on-off, con due posizioni desiderate, l'andamento che più rispecchia questo movimento è dato da pre-deformazioni minori del 4.5%: anche in questo caso, sia chiaro, si ottengono inevitabilmente quattro posizioni, ma i due massimi (e analogamente i minimi) risultano essere molto più vicini, approssimando

pertanto in maniera più o meno adeguatamente questo fenomeno.

Considerando quindi, come detto, la pre-deformazione del primo filo pari al 4% e trascurando per ora l'andamento transitorio durante l'attivazione (dal momento che non è interessante ai fini della progettazione), è possibile sintetizzare in un ulteriore grafico la situazione ottenuta dallo studio dei valori medi di deformazione utile per entrambi i fili (figura 3.39).

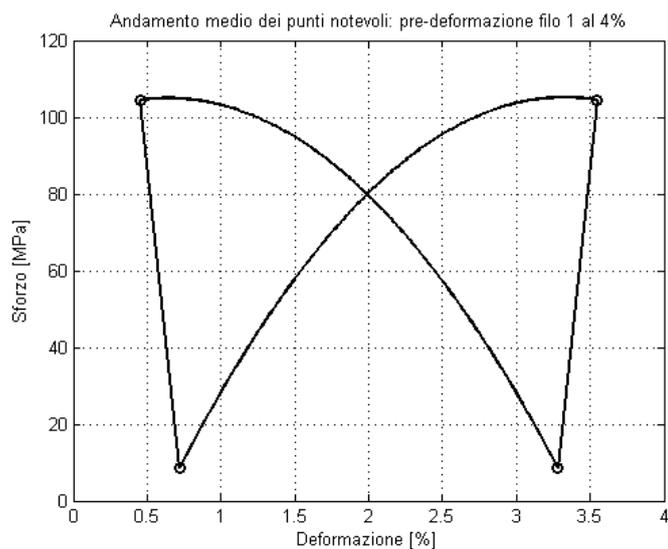


Figura 3.39: Valori medi dei punti notevoli: pre-deformazione filo 1 al 4%

Tabella 3.6: Punti notevoli mediati per la prova 'standard' al 4%

Punto/Intervallo	Deformazione [%]
A	3.2789
B	3.5467
C	0.4533
D	0.7211
E	2.5578
F	3.0934
G=H	2.8256
Condizione filo	Sforzo [MPa]
Attivo	104.45
Inattivo	8.74

Capitolo 4

Progettazione della zampa

Partendo dai risultati ottenuti dalla caratterizzazione del comportamento antagonista, e conoscendo dunque le deformazioni utili di lavoro dei fili di Nitinol, il passo successivo è stato quello di progettare la struttura della zampa del rover.

La scelta è ricaduta sul mantenimento della struttura originale (l'ultima revisionata, composta principalmente da tubolari in alluminio 6063-T5 avente sezione quadrata di dimensioni 25x25x1.3 mm), con ovvie modifiche ed adattamenti per il passaggio degli attuatori SMA.

In questo capitolo vengono descritti i passi per la scelta della disposizione dei fili e per il loro dimensionamento, fino ad arrivare alla modellazione solida dei componenti e alla susseguente realizzazione nell'officina del laboratorio tecnologico del Politecnico di Milano.

4.1 Scelta della soluzione di progetto

Presupponendo di non modificare drasticamente la morfologia della struttura esistente, si sono ipotizzate diverse soluzioni di progetto tra le quali emergono:

1. *Piastre esterne di supporto e fili SMA tiranti*: questa soluzione, simile a quella ideata da Burcu e Bülent [1] per il controllo della cerniera azionante un flap di un velivolo (figura 4.1) è la più semplice e sicura da progettare, soprattutto per il successivo montaggio dei fili. Di contro, essa presenta diversi svantaggi, tra i quali vi sono sicuramente l'impossibilità di garantire un adeguato schermaggio termico (collegato al fatto che i fili sono esterni al tratto di zampa) e l'ingombro delle piastre che può interferire con la struttura primaria.

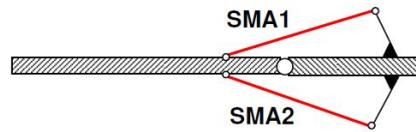


Figura 4.1: Piastre esterne e fili SMA (Burcu-Bülent)

2. *Sistema interno di pulegge:* i vantaggi di questo sistema (già rodato ed utilizzato nella prima progettazione della zampa attuata mediante SMA) sono sicuramente gli ingombri, la compattezza e la possibilità di schermare esternamente la struttura (controllo termico). Gli svantaggi sono senz'altro la difficoltà di montaggio e i ridotti spazi interni per eventuali sistemi di raffreddamento. La soluzione, come quella di figura 4.4, sembrerebbe però la più fattibile sotto molti punti di vista.
3. *Sistema ibrido tra 1 e 2:* in questo caso si comanderebbe l'avanzata del rover attraverso un sistema di fili tiranti esterni, mentre i gradi di libertà dell'alzata della zampa verrebbero azionati mediante il sistema di pulegge. Rimangono valide le considerazioni fatte in precedenza riguardo i pro e i contro per queste soluzioni.
4. *Modello 'filo passante':* il concetto, non facilmente attuabile, consiste nel far passare il filo di Nitinol attraverso un tubo flessibile e comandare l'attivazione in un punto più accessibile (ad esempio sopra o sotto il payload del rover, come si mostra in figura 4.2). Questa soluzione potrebbe essere interessante se fossero richieste rotazioni più elevate, in quanto la lunghezza dell'attuatore sarebbe decisamente maggiore. I problemi in questo caso sono dovuti alle guaine, che devono resistere a temperature elevate (maggiori di 100 °C), non contribuire alla rigidità e non produrre elevati attriti; inoltre si hanno difficoltà di ancoraggio e possibilità di intralcio durante la camminata.
5. *Filo e molla di richiamo:* in questo caso si utilizza il filo di Nitinol per il primo movimento (ponendolo interno o esterno alla struttura della zampa), e la molla - sia essa SMA o semplicemente metallica - per il ritorno alla posizione iniziale, come suggerisce il progetto analogo sviluppato da Ho e Lee [6]. Va da sé che i risultati dell'antagonismo non sono validi per questa soluzione, in quanto gli elementi sono completamente differenti. Il sistema risulterebbe semplice e relativamente comodo per il montaggio, ma anche in questo caso nascerebbero problemi dal punto di vista dello schermaggio termico oltre che di difficoltà di controllo della deformazione della molla (figura 4.3).

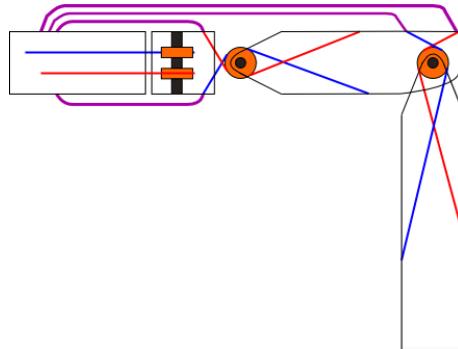


Figura 4.2: Modello 'filo passante'

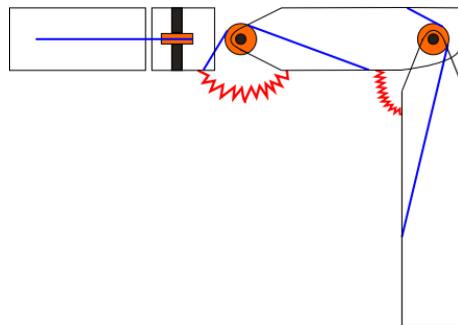


Figura 4.3: Filo e molla di richiamo

Occorre perciò tenere in considerazione gli aspetti positivi e negativi che queste soluzioni presentano: in particolare, stilando una tabella di confronto (4.1), in cui si indicano dei parametri valutativi da 1 a 3 in ordine crescente di difficoltà, si può ottenere un'informazione utile per la scelta ottimale.

Tabella 4.1: Tabella comparativa per le soluzioni di progetto

Aspetto considerato	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 4	Sol. 5
Semplicità intrinseca	1	3	2	3	1
Facilità di montaggio fili	1	3	3	2	2
Schermaggio termico	3	1	2	2	3
Ingombro	3	1	2	3	2
Fattibilità	2	1	1	3	3
Totale	10	9	10	13	11

Si è preferito procedere quindi con la soluzione 2, ovvero quella avente il sistema di pulegge interno per tutti i gradi di libertà, mantenendo la soluzione

3 come alternativa in caso di problematiche non considerate in fase di progetto.

Entrando nel dettaglio, una possibilità è quella di porre due pulegge parallele (in teflon) per ogni grado di libertà, lasciandole libere di ruotare su di un perno¹: questa scelta è motivata dal fatto che il filo, una volta alloggiato sulle pulegge, sarà sottoposto a minor attrito (in quanto dopo aver vinto quello statico incontrerà solo rotolamento, e non strisciamento), tra l'altro su di un materiale molto adatto a questo scopo.

In aggiunta, in corrispondenza di ogni cerniera è necessario l'inserimento di un componente, quale un cuscinetto o una boccia, per permettere la rotazione indipendente tra i diversi tratti.

Vincolando i capi di ogni filo di Nitinol su due pezzi di zampa consecutivi (tibia-femore, femore-anca e anca-corpo del rover) si ipotizza quindi di far avvenire il comportamento antagonista senza considerare alcuna forzante esterna, se non appunto l'inevitabile attrito.

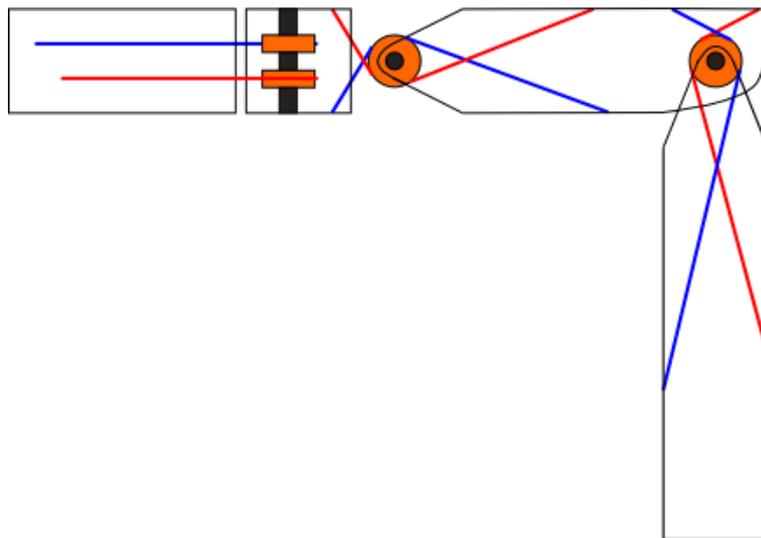


Figura 4.4: Sistema interno di pulegge

Il primo passo è stato quindi quello di stabilire, almeno da un punto di vista teorico, se e come fosse possibile installare l'attuatore all'interno della struttura, il che si traduce nel calcolo della lunghezza di filo necessaria alla rotazione desiderata. In caso contrario infatti sarebbe indispensabile modificare la morfologia della zampa o scegliere una soluzione di progetto alternativa tra quelle indicate in precedenza.

¹Risulta ovvio quindi che tra perno e pulegge ci debba essere un minimo di gioco.

4.2 Studio del posizionamento dei fili SMA

Per determinare la lunghezza dei fili di Nitinol e la posizione dei punti di ancoraggio è stato eseguito uno studio preliminare basato essenzialmente sulla risoluzione di semplici problemi geometrici. Ogni grado di libertà è stato affrontato singolarmente, ma la base comune è la scelta di alcune variabili (come ad esempio il raggio delle pulegge, la sezione del tubolare e uno dei due punti di vincolo) per conoscere la minima lunghezza necessaria dell'attuatore - e la relativa localizzazione del secondo punto di collegamento alla struttura esterna - in grado di poter far ruotare di un angolo desiderato il tratto di zampa corrispondente.

4.2.1 Tibia

Facendo riferimento alla figura 4.5, dove si mostrano gli angoli e le distanze principali considerate per il calcolo, indicando con $\delta' = \delta_1 + \Delta\alpha$ e con $\delta'' = \delta_2 - \Delta\alpha$ si ha che:

$$D \operatorname{tg}(\psi) + \frac{R_p}{\cos(\psi)} - H = 0 \quad (4.1)$$

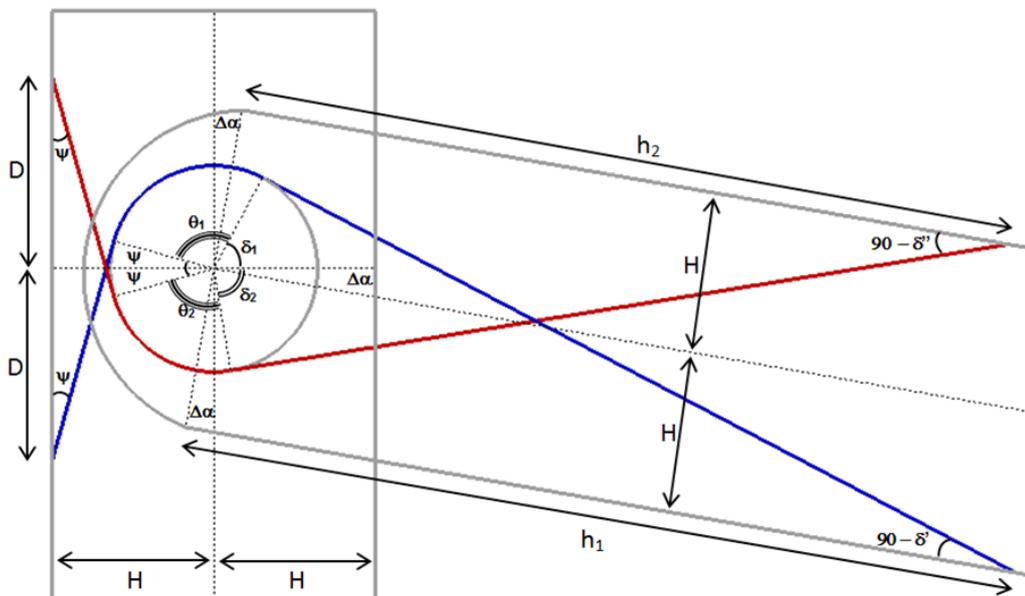


Figura 4.5: Convenzioni e angoli per la tibia

Capitolo 4

L'incognita ψ è determinabile attraverso la ricerca dello zero della funzione, scegliendo come valore iniziale $\pi/4 = 45^\circ$. Proseguendo, si ha che

$$H \operatorname{tg}(\delta') + \frac{R_p}{\cos(\delta')} - h_1 = 0 \quad (4.2)$$

dove anche in questo caso, come sopra, l'incognita δ' è ricavata risolvendo l'equazione trascendente. A questo punto, conoscendo i valori degli angoli ψ e δ' è possibile ricavare la lunghezza del primo filo di Nitinol, pari a:

$$L_1 = \frac{D}{\cos(\psi)} + R_p \operatorname{tg}(\psi) + R_p \theta_1 + \frac{(h_1 - R_p \cos(\delta'))}{\sin(\delta')} \quad (4.3)$$

dove con θ_1 si è indicato l'angolo di avvolgimento del filo sulla puleggia, pari a $180^\circ - \psi - \delta_1$. Avendo ora scelto il preallungamento del filo 1 del 4%, si ha automaticamente determinata la lunghezza del secondo filo.

$$L_2 = \frac{L_1}{1.04} \quad (4.4)$$

Utilizzando temporaneamente la variabile

$$L'_2 = L_2 - \frac{D}{\cos(\psi)} - R_p \operatorname{tg}(\psi) \quad (4.5)$$

si può come prima risolvere l'equazione che segue nell'incognita δ'' :

$$R_p \sin(\delta'') + H - [L'_2 - R_p(180^\circ - \psi - \Delta\alpha - \delta'')] \cos(\delta'') = 0 \quad (4.6)$$

giungendo finalmente alla determinazione del punto d'ancoraggio del secondo filo, denominato h_2 :

$$h_2 = \frac{R_p}{\cos(\delta'')} + H \operatorname{tg}(\delta'') \quad (4.7)$$

Variando opportunamente il valore di h_1 (tale che non superi la lunghezza massima del tratto di zampa considerato), e definendo un range valido di angoli di rotazione desiderati (es. $30.5-31.5^\circ$) si è poi scelta tra tutte le possibili soluzioni quella che minimizza la lunghezza di filo, e quindi la potenza richiesta.

Occorre però precisare alcune considerazioni: facendo riferimento ai risultati delle prove di caratterizzazione, si può notare che il primo ciclo d'attivazione fornisce una deformazione maggiore rispetto alla curva a farfalla descritta nei cicli successivi. Ecco perciò che per il montaggio bisogna partire da una posizione iniziale differente da quella di riposo ($\alpha_0=90^\circ$), giustificando così

l'angolo $\Delta\alpha$ mostrato in figura 4.5. Le relazioni sopra scritte rimangono ugualmente valide anche a valle di questa puntualizzazione. Infatti, l'angolo di rotazione ottenuto (chiamato nel seguito θ) può essere ricavato mediante la relazione:

$$\theta = (\epsilon - \Delta\epsilon) \cdot L_1/R_p \quad (4.8)$$

dove la quantità $(\epsilon - \Delta\epsilon)$ rappresenta l'intervallo $G = H$ delle prove di caratterizzazione, o più specificatamente $\epsilon = A$ e $\Delta\epsilon = C$.

Il valore di $\Delta\alpha$, non noto a priori, può essere ipotizzato e controllato a posteriori in modo tale che l'errore commesso sia minore di una certa tolleranza, ad es. di 1/10 di grado.

$$err_{\Delta\alpha} = \Delta\alpha - \Delta\epsilon \cdot L_1/R_p \quad (4.9)$$

Inoltre, un aspetto molto importante da tenere in considerazione è la modalità di passaggio attraverso la parete del tubolare: infatti, il supporto di materiale isolante (assimilabile ad una sorta di tappo) non ha dimensioni trascurabili, ancorché sia un componente minuto.

In particolare, occorre modificare le relazioni sopra scritte imponendo un valore costante aggiuntivo alla lunghezza del filo calcolato (ovvero l'altezza del supporto) e contemporaneamente ridurre il valore di H , assunto in un primo momento pari alla metà della sezione esterna del tubolare, del valore pari all'altezza del gambo che si inserisce all'interno della zampa (si veda figura 4.6).

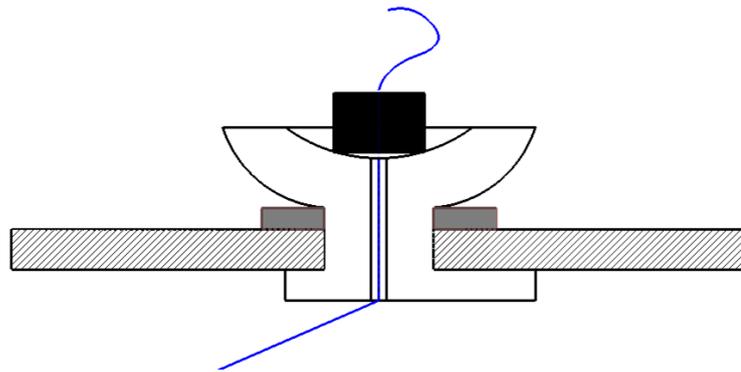


Figura 4.6: Supporto isolante per l'uscita del filo

Tenendo dunque fissati i valori di:

- Raggio puleggia R_p (depurato della sede dei fili): 7.5 mm;
- Distanza D : 13 mm;

Capitolo 4

- Distanza H : $(12.5 - 1 - 1.3) \text{ mm} = 10.2 \text{ mm}$;

si sono ottenuti i risultati di tabella 4.2.

Tabella 4.2: Dimensionamento fili per la tibia

h_1 [mm]	h_2 [mm]	L_1 [mm]	L_2 [mm]	θ [deg]	$\Delta\alpha$ [deg]
82	79.05	119.00	114.40	25.68	6.5
105	101.54	141.76	136.30	30.60	7.8
128	123.98	164.64	158.31	35.60	9.0
151	146.45	187.63	180.42	40.50	10.3

Più in generale si ha:

$$\begin{cases} h_1 = 4.6486 \cdot \theta - 37.345 \text{ [mm]} \\ h_2 = 4.5418 \cdot \theta - 37.568 \text{ [mm]} \end{cases} \quad (4.10)$$

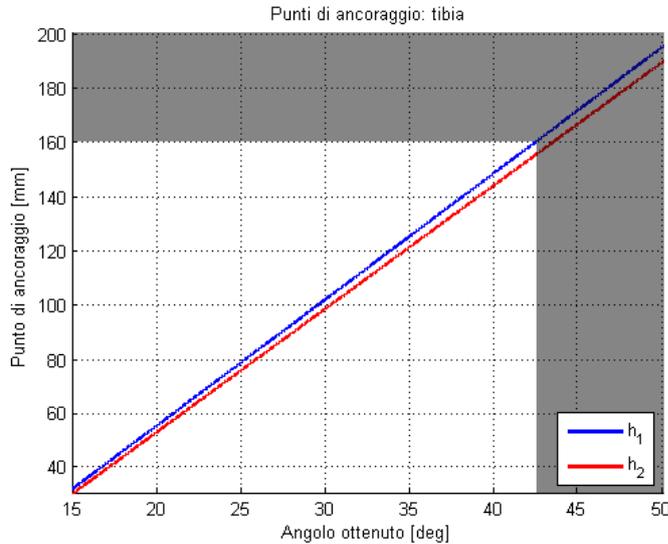


Figura 4.7: Punti di ancoraggio per la tibia VS. angolo ottenuto

L'area grigia del grafico di figura 4.7 rappresenta il limite fisico dovuto alla lunghezza utile del tratto di zampa per l'installazione dei fili (160 mm), portando di fatto ad un valore massimo di θ pari a 42.45° .

4.2.2 Femore

Il procedimento è analogo a quello eseguito per la tibia, tuttavia facendo riferimento alla figura 4.8, dove si mostrano gli angoli e le distanze principali considerate per il calcolo, indicando con $\delta' = \delta_1 - \tilde{\beta}$ e con $\delta'' = \delta_2 + \tilde{\beta}$ si ha che:

$$H \operatorname{tg}(\psi) + \frac{R_p}{\cos(\psi)} - D = 0 \quad (4.11)$$

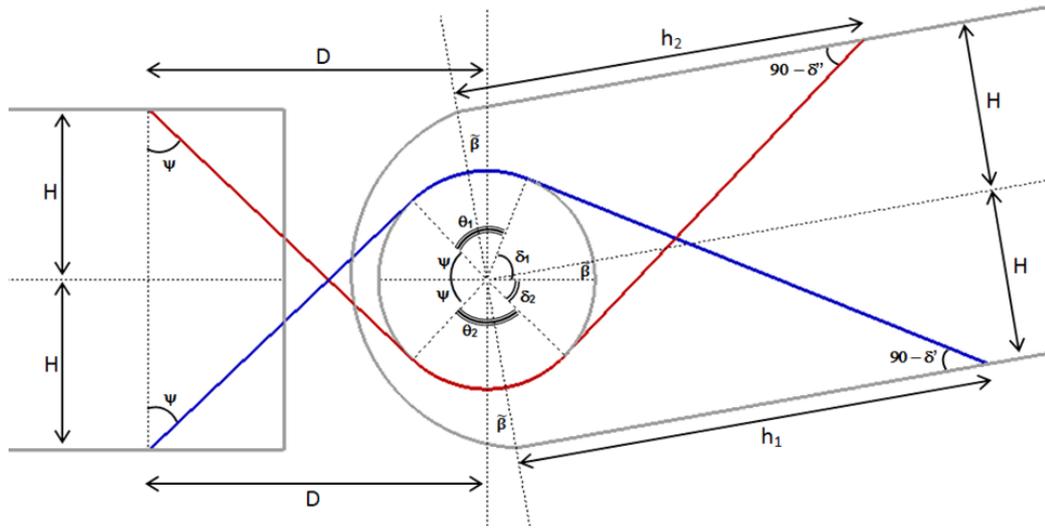


Figura 4.8: Convenzioni e angoli per il femore

L'incognita ψ è determinabile attraverso la ricerca dello zero della funzione, scegliendo come valore iniziale $\pi/4 = 45^\circ$. Nello stesso modo, per poter successivamente ricavare l'incognita δ' , si risolve l'equazione trascendente:

$$H \operatorname{tg}(\delta') + \frac{R_p}{\cos(\delta')} - h_1 = 0 \quad (4.12)$$

A questo punto, conoscendo i valori degli angoli ψ e δ' è possibile ricavare la lunghezza del primo filo di Nitinol, pari a:

$$L_1 = \frac{H}{\cos(\psi)} + R_p \operatorname{tg}(\psi) + R_p \theta_1 + \frac{H}{\cos(\delta')} + R_p \operatorname{tg}(\delta') \quad (4.13)$$

dove con θ_1 si è indicato l'angolo di avvolgimento del filo sulla puleggia, pari a $180^\circ - \psi - \delta_1$. Come prima, la lunghezza del secondo filo è determinata una volta scelto il grado di pre-deformazione del filo 1 (4%).

$$L_2 = \frac{L_1}{1.04} \quad (4.14)$$

Capitolo 4

Utilizzando temporaneamente la variabile

$$L'_2 = L_2 - \frac{H}{\cos(\psi)} - R_p \operatorname{tg}(\psi) \quad (4.15)$$

si può ora risolvere l'equazione che segue nell'incognita δ'' :

$$R_p \sin(\delta'') + H - [L'_2 - R_p(180^\circ - \psi - \delta'' + \tilde{\beta})]\cos(\delta'') = 0 \quad (4.16)$$

giungendo finalmente alla determinazione del punto d'ancoraggio del secondo filo, denominato h_2 :

$$h_2 = \frac{R_p}{\cos(\delta'')} + H \operatorname{tg}(\delta'') \quad (4.17)$$

Anche in questa circostanza si precisa che per il montaggio occorre partire da una posizione iniziale differente da quella di riposo ($\beta_0=80^\circ$), motivo dell'introduzione dell'angolo $\tilde{\beta} = 90^\circ - \beta_0 - \Delta\beta = 10^\circ - \Delta\beta$.

Il valore di $\Delta\beta$, come fatto per la tibia, può essere ipotizzato e controllato a posteriori:

$$\operatorname{err}_{\Delta\beta} = \Delta\beta - \Delta\epsilon \cdot L_1/R_p \quad (4.18)$$

Il target in questo caso è una rotazione del femore di 20° , e tenendo fissati i dati di:

- Raggio puleggia R_p (depurato della sede dei fili): 7.5 mm;
- Distanza D : 25 mm;
- Distanza H : (12.5 - 1 - 1.3) mm = 10.2 mm;

si sono ottenuti i seguenti risultati, scegliendoli in modo tale da minimizzare la lunghezza del filo:

Tabella 4.3: Dimensionamento fili per il femore

h_1 [mm]	h_2 [mm]	L_1 [mm]	L_2 [mm]	θ [deg]	$\Delta\beta$ [deg]
30	24.58	74.42	71.56	16.06	4.1
53	47.78	95.46	91.79	20.61	5.3
77	71.36	118.72	114.15	25.63	6.5
89	83.12	130.54	125.52	28.18	7.2

Più in generale si ha:

$$\begin{cases} h_1 = 4.8136 \cdot \theta - 46.631 \text{ [mm]} \\ h_2 = 4.7608 \cdot \theta - 51.003 \text{ [mm]} \end{cases} \quad (4.19)$$

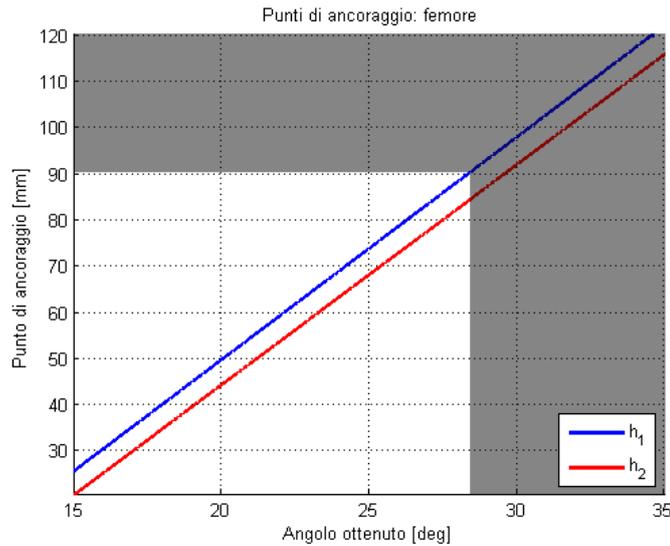


Figura 4.9: Punti di ancoraggio per il femore VS. angolo ottenuto

La lunghezza del tratto di tubolare identifica il limite massimo su h_1 per l’inserimento dei fili (pari a 90 mm, vedi l’area grigia del grafico di figura 4.9), portando di fatto ad un valore massimo di θ pari a 28.38° .

4.2.3 Anca

Per quanto riguarda la rotazione dell’anca, utile per l’avanzata del rover, il procedimento è piuttosto simile ai precedenti (si veda la figura 4.10 per le convenzioni adottate).

Le incognite in questo problema sono gli angoli ϕ_1 e ϕ_2 che servono per identificare al solito le lunghezze degli attuatori, gli angoli di avvolgimento e l’angolo di rotazione utile del tratto di zampa. Per il calcolo di ϕ_1 si è risolta l’equazione trascendente:

$$\frac{H + R_p \cos(\phi_1)}{\text{tg}(\phi_1)} + R_p \sin(\phi_1) - h_1 = 0 \quad (4.20)$$

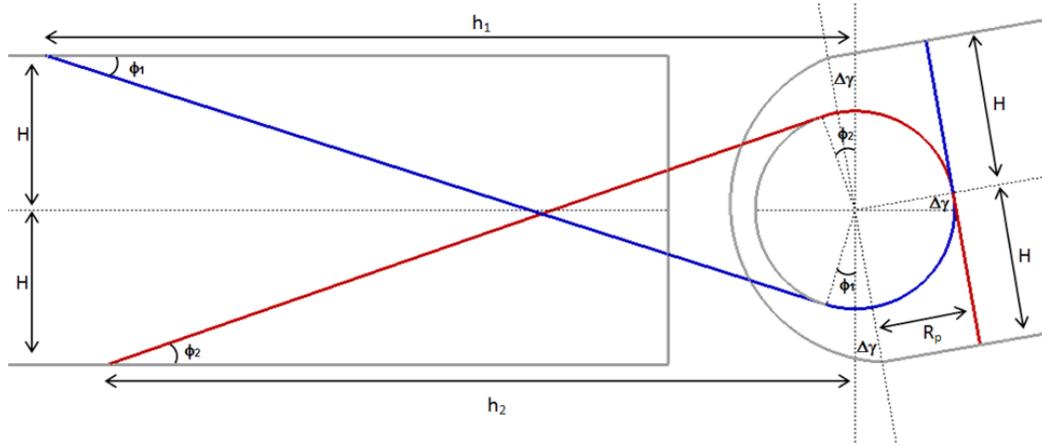


Figura 4.10: Convenzioni e angoli per l'anca

in modo da determinare subito le lunghezze dei due fili di Nitinol.

$$L_1 = \frac{(h_1 - R_p \sin(\phi_1))}{\cos(\phi_1)} + R_p \phi_1 + H + R_p(\gamma + \Delta\gamma) \quad (4.21)$$

$$L_2 = \frac{L_1}{1.04} \quad (4.22)$$

A questo punto, introducendo la variabile:

$$L'_2 = L_2 - H - R_p(\gamma - \Delta\gamma) \quad (4.23)$$

si può come prima risolvere la relazione

$$(L'_2 - R_p \phi_2) \sin(\phi_2) - R_p \cos(\phi_2) - H = 0 \quad (4.24)$$

avente lo scopo di conoscere l'angolo ϕ_2 .

Il punto di attacco del secondo filo, denominato h_2 è dunque facilmente calcolabile:

$$h_2 = (L'_2 - R_p \phi_2) \cos(\phi_2) + R_p \sin(\phi_2) \quad (4.25)$$

Come per la tibia ed il femore, per il montaggio occorre partire da una posizione iniziale differente da quella di riposo ($\gamma_0=90^\circ$), ovvero ruotando l'anca di un angolo $\Delta\gamma$.

Anche qui, l'errore commesso su $\Delta\gamma$ viene limitato imponendo una tolleranza di 1/10 di grado.

$$err_{\Delta\gamma} = \Delta\gamma - \Delta\epsilon \cdot L_1/R_p \quad (4.26)$$

Tabella 4.4: Dimensionamento fili per l'anca

h_1 [mm]	h_2 [mm]	L_1 [mm]	L_2 [mm]	θ [deg]	$\Delta\gamma$ [deg]
61	58.62	95.42	91.75	20.60	5.3
85	82.06	118.87	114.29	25.66	6.5
108	104.55	141.65	136.20	30.58	7.8
131	127.01	164.57	158.24	35.52	9.1

Impostando come obiettivo da raggiungere la rotazione di 30° , scegliendo gli stessi valori di H e raggio delle pulegge usati per la tibia e il femore, si sono ottenuti i risultati di tabella 4.4.

Più in generale si ha:

$$\begin{cases} h_1 = 4.6724 \cdot \theta - 35.002 \text{ [mm]} \\ h_2 = 4.5643 \cdot \theta - 35.153 \text{ [mm]} \end{cases} \quad (4.27)$$

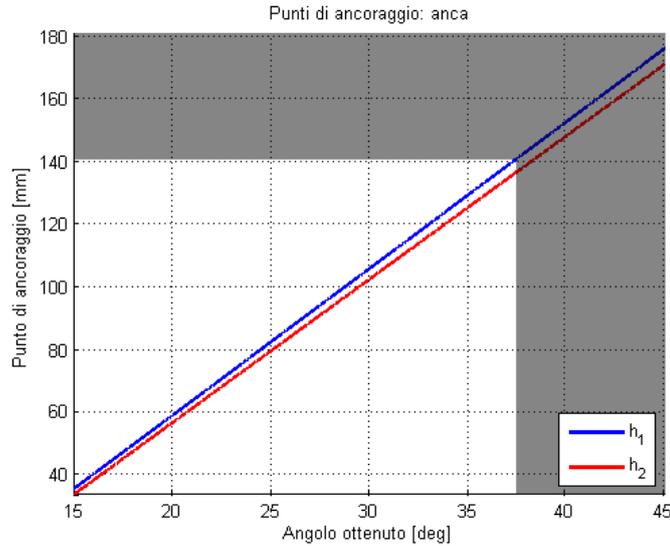


Figura 4.11: Punti di ancoraggio per l'anca VS. angolo ottenuto

Similmente agli altri due gradi di libertà, bisogna porre attenzione al limite ultimo su h_1 dato dalla lunghezza utile del tratto di zampa (140 mm). Come si nota dal grafico 4.11, si può ottenere quindi un valore massimo di θ pari a 37.45° .

4.3 Modellazione dei componenti

Come già accennato, per le dimensioni e gli ingombri si è partiti dall'ultima revisione disponibile, che differisce dalla seconda (figura 4.12) solo per la lunghezza della tibia², mentre per gli accorgimenti dovuti all'inserimento dei fili di Nitinol in sostituzione ai motori elettrici si è preso ulteriore spunto dalla soluzione adottata successivamente in cui per la prima volta sono stati utilizzati questi attuatori (figura 4.13).

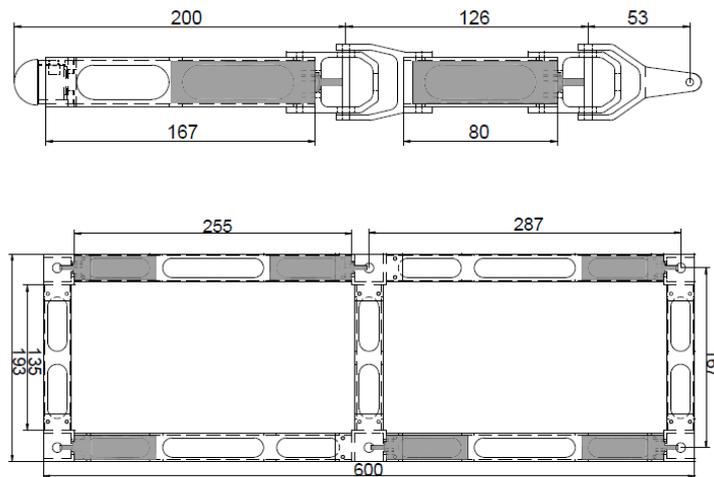


Figura 4.12: Modello della zampa (seconda revisione) e del payload

Avendo dunque a disposizione i dati per il corretto posizionamento dei fili di Nitinol, i quali hanno dimostrato la fattibilità di installazione senza alcuna modifica alle lunghezze dei vari tratti (lasciando quindi inalterato l'ingombro del rover), si è proceduto alla modellazione solida dei vari componenti.

In particolare, si è fatto riferimento alle seguenti dimensioni vincolanti:

- Sezione tubolare: **25x25x1.3 mm**;
- Distanza Cerniera tibia-Fine tibia: **165 mm**;
- Distanza Cerniera tibia-Cerniera femore: **126 mm**;
- Distanza Cerniera femore-Cerniera anca: **53 mm**.

²passata da 200 a 165 mm

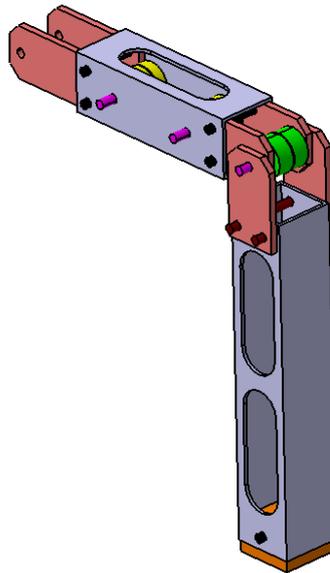


Figura 4.13: Primo modello della zampa attuata mediante SMA (da [19])

Per ciò che concerne la struttura primaria, si è mantenuta quindi l'idea di costituire tali pezzi con tubolari d'alluminio di sezione quadrata: le asole laterali, utili in principio *solo* per alleggerire la struttura, hanno ora un duplice vantaggio in quanto vengono sfruttate per facilitare l'inserimento manuale dei fili (figura 4.14). Gli elementi di collegamento tra un tratto e l'altro invece, prima composti da parti macchinate per l'alloggio degli ingranaggi conici (adatti alla trasmissione della rotazione dei motori), sono stati completamente revisionati e studiati in modo tale che potessero fungere anche da fermi meccanici di fine corsa (figura 4.15).

Infine, è doverosa una considerazione riguardo le cerniere: nella prima versione di Nemesys non è stato previsto alcun dispositivo meccanico utile alla riduzione dell'attrito tra due oggetti in movimento rotatorio, quali il perno ed il tratto di zampa associato. A partire dalla seconda versione invece è stato scelto di inserire dei cuscinetti a sfera, migliorando pertanto la rotazione e annullando anche la possibile ovalizzazione dei fori. Questa soluzione è stata perciò scelta come punto di partenza: sensibili all'eventuale problema dell'outgassing in campo spaziale infatti, si è pensato di sostituire i cuscinetti attraverso componenti in teflon simili a boccole, i quali hanno un basso coefficiente di attrito, sono leggeri, e non contengono fluidi quali oli lubrificanti³.

³Un'alternativa a questa idea può essere quella di utilizzare cuscinetti a sfera in materiale ceramico, collaudati già in applicazioni per uso spaziale.

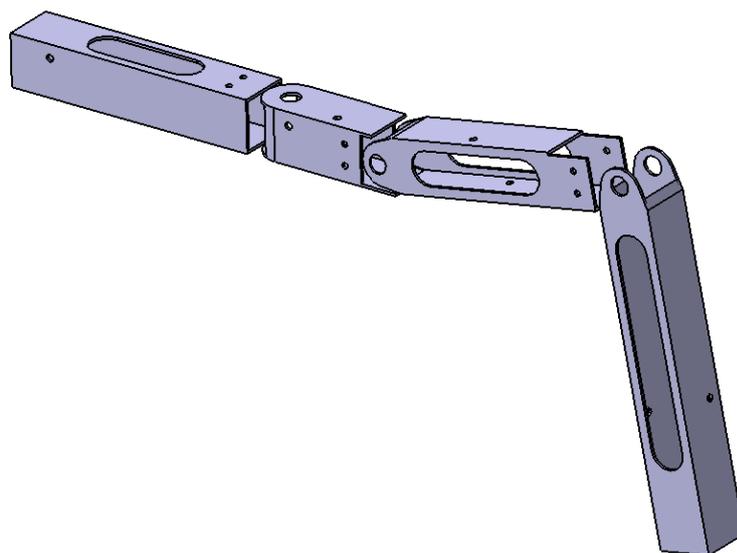


Figura 4.14: Struttura primaria della zampa: tubolari

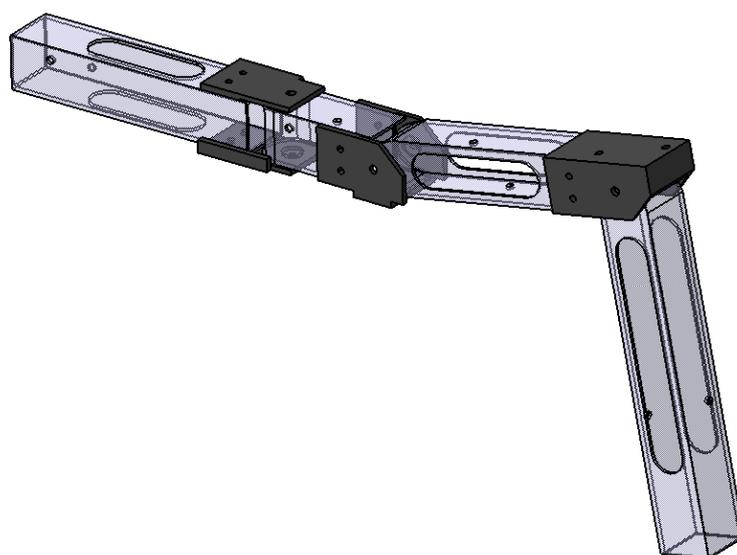


Figura 4.15: Elementi di collegamento per i tratti di zampa

La scelta delle boccole al posto dei cuscinetti inoltre fa sì che tutti i componenti costituenti la cerniera (perno, pulegge, distanziali) siano smontabili (figura 4.17): questo aspetto è fondamentale per le prove di collaudo, in quanto si presume che vengano eseguiti più test cambiando i fili. In questo modo si garantisce anche l'ispezionabilità per la sostituzione di eventuali parti danneggiate, cosa che invece non poteva avvenire nelle versioni precedenti.

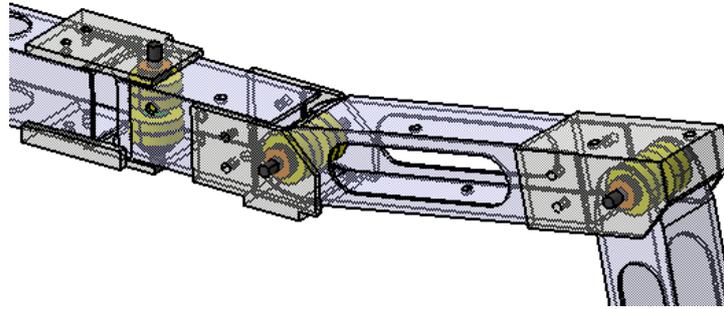


Figura 4.16: Cerniere: perni, pulegge e distanziali

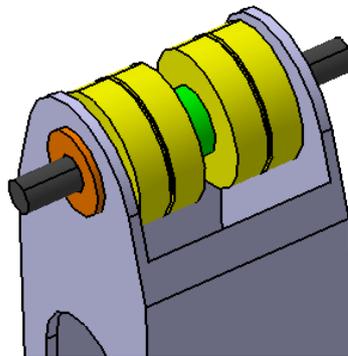


Figura 4.17: Particolare della cerniera: in arancio le boccole in teflon, in giallo le pulegge, in verde i distanziali

Infine, come già si poteva notare dalle immagini precedenti, sui tubolari e sulle piastre di collegamento sono stati creati i fori per il passaggio dei fili di Nitinol, nei punti individuati dallo studio teorico di posizionamento: l'intorno di quest'area, come già accennato, è stata isolata mediante l'utilizzo di componenti adatti al raggiungimento di questo obiettivo. Il risultato della progettazione CAD, effettuato tramite il software *CATIA V5*[®] è mostrato nell'immagine 4.18.

Gli obiettivi da raggiungere sono perciò una rotazione di 30° per la tibia, una di 20° per il femore ed una rotazione dell'anca di 30°: nell'immagine 4.19 è possibile visualizzare la posizione iniziale e la posizione finale desiderata.

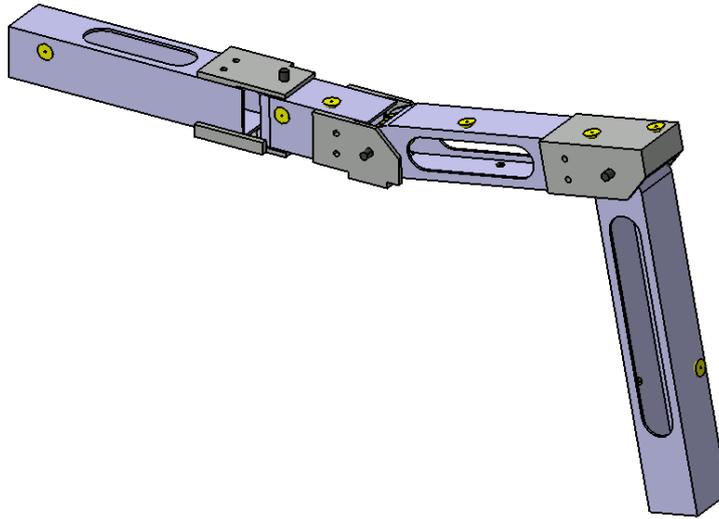
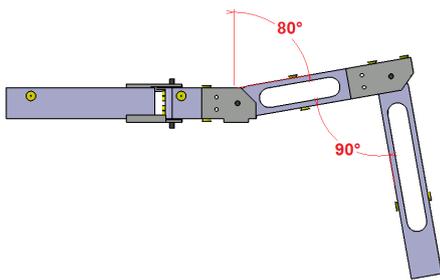
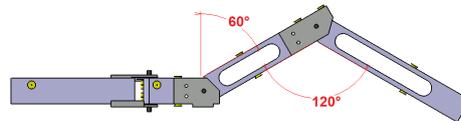


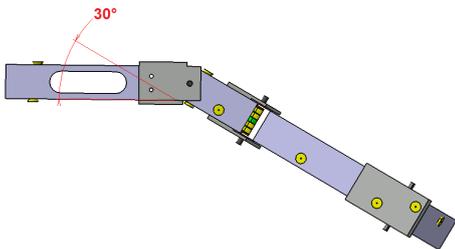
Figura 4.18: Modello solido della zampa completa: in giallo la posizione delle uscite dei fili di Nitinol



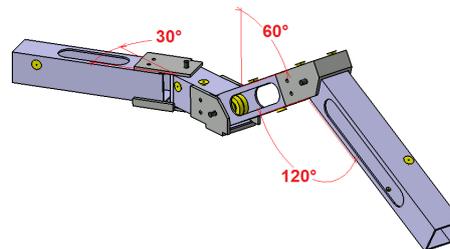
(a) Posizione iniziale: $\alpha_0=90^\circ$, $\beta_0=80^\circ$



(b) Posizione finale (alzata): $\alpha=120^\circ$, $\beta=60^\circ$



(c) Posizione finale (avanzata): $\gamma=30^\circ$



(d) Posizione finale (vista isometrica): $\alpha=120^\circ$, $\beta=60^\circ$, $\gamma=30^\circ$

Figura 4.19: Rotazioni teoriche desiderate per l'alzata e l'avanzata

4.4 Realizzazione della zampa

I tre tratti principali della zampa (più uno ulteriore che simula l'attacco al corpo del rover, utile all'alloggiamento dei fili per la rotazione dell'anca) sono stati realizzati partendo dallo stesso lotto di tubolari in alluminio utilizzati già per le ultime due revisioni del modello.

Per ciò che riguarda gli elementi di collegamento tra i tratti invece, si sono scelte piastrine di alluminio di spessore iniziale pari a 3 mm, a cui sono state effettuate successivamente delle fresature di 0.8 mm in corrispondenza della zona interessata all'inserimento del tubolare, facilitandone così la sua rotazione. Per il collegamento femore-tibia, l'elemento è stato ottenuto per asportazione da truciolo alla macchina utensile.

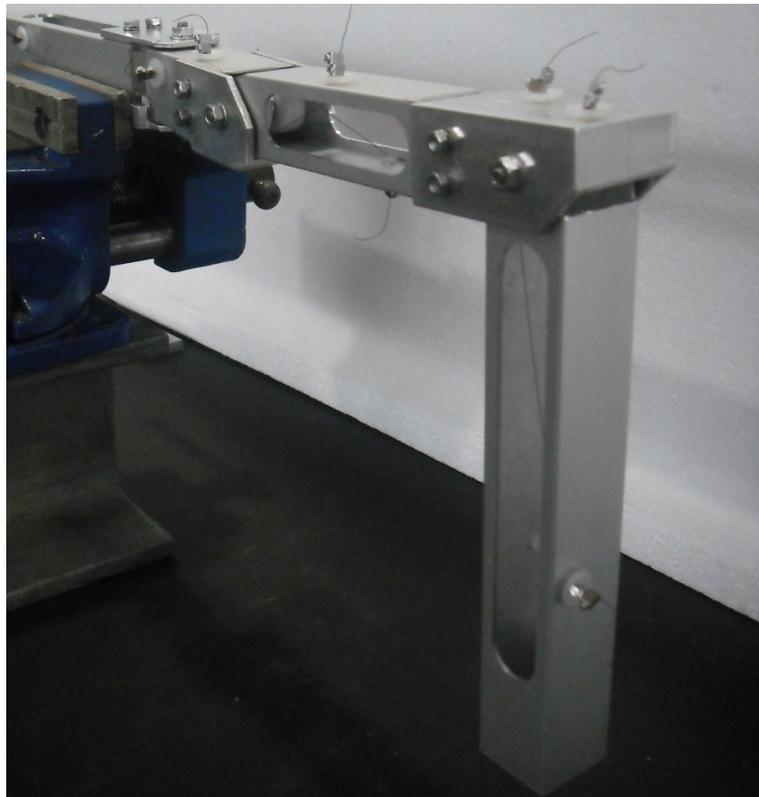


Figura 4.20: Visione globale della zampa (1)

I perni, di diametro 4 mm, sono stati ricavati da una barra cilindrica di acciaio rettificato - dunque particolarmente adatto per le sue caratteristiche di resistenza ad eventuali distorsioni - su cui sono state praticate le filettature agli estremi per il serraggio successivo tramite dadi.

Capitolo 4

Le pulegge, come detto, sono state ottenute da barre cilindriche di teflon riducendole a misura (diametro 16 mm) attraverso tornitura. Una volta ottenute le sedi per l'alloggiamento dei fili (profonde 0.5 mm), si è praticato il foro centrale di diametro 4.2 mm, in modo da permettere un minimo di gioco col perno e ridurre gli attriti; i distanziali per questi componenti invece, molto semplicemente, sono costituiti da una serie di 3-4 rondelle di acciaio per ottenere l'allineamento esatto con i fori d'uscita del filo.

Le boccole, anch'esse in teflon, presentano una conformazione simile alle pulegge, ma ovviamente sono di dimensioni inferiori: il diametro del foro interno è lo stesso, pari a 4.2 mm, mentre il diametro esterno è di 9 mm (valore minimo ottenibile dalle lavorazioni al tornio). Essendo spesse solo 3 mm, e praticando anche qui una sede di qualche decimo di millimetro, questi componenti sono stati installati a pressione nei fori corrispondenti dei tubolari.

L'incastro a pressione è stato sfruttato anche per i componenti isolanti che permettono l'uscita del filo di Nitinol, praticando sul tubolare un foro di diametro di poco inferiore rispetto a quello del gambo da inserire, montandoli pertanto con una lieve interferenza.

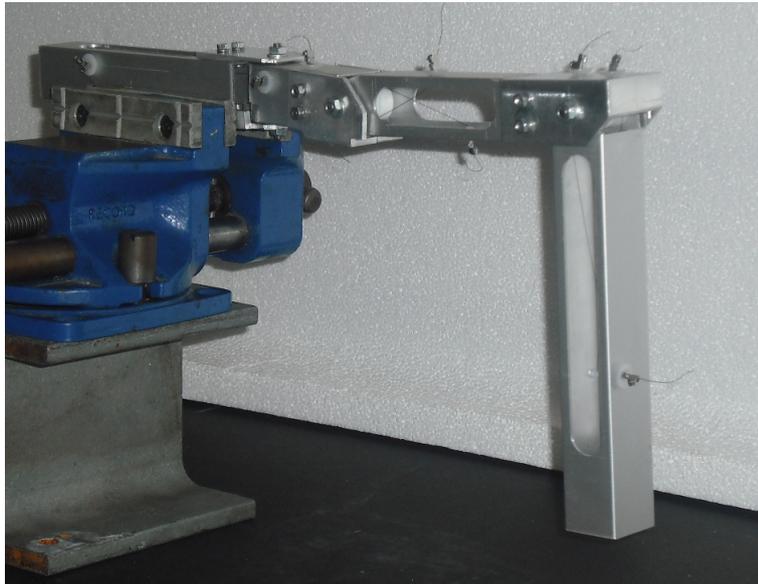


Figura 4.21: Visione globale della zampa (2)

In definitiva, la zampa ottenuta ha una massa totale di 172 g, valore paragonabile rispetto a quella dell'ultima revisione (164 g). Se si aggiungesse anche la parte di tubolare simulante l'attacco al rover e le relative piastrine di collegamento si raggiungerebbero invece i 238 g.

4.5 Questioni aperte

4.5.1 Rotazione dell'anca

La criticità per ciò che concerne la rotazione dell'anca è che il sistema, se azionato con attuatori SMA antagonisti, può riprodurre un movimento classico di andata e ritorno alla posizione iniziale, senza cioè aver la possibilità (almeno in linea teorica, senza alcun controllo) di fermarsi nella posizione intermedia. In altre parole, non è in grado di effettuare una rotazione del tipo $-\gamma \rightleftharpoons 0^\circ \rightleftharpoons \gamma$, come invece avviene mediante l'utilizzo dei motori elettrici, ma solamente un ciclo a due posizioni.

Pertanto, per il momento si è dimensionata la coppia di fili di Nitinol in modo da ottenere una rotazione da 0° a $+30^\circ$ ed il conseguente ritorno: per fare in modo che si abbiano le stesse performance dei motori una possibile soluzione è quella di inserire un'ulteriore coppia di fili per ruotare il tratto da 0° a -30° , con l'inevitabile aumento del numero dei componenti ma soprattutto dei tempi ciclo.

Questa considerazione può essere già ritenuta sufficiente per rinunciare alla modifica, in quanto raddoppiare il tempo di ogni passo equivale ad effettuarne due di metà ampiezza. Tuttavia, nel caso si volesse scegliere la strada dell'arcata completa a 3 posizioni, bisogna far presente che la complessità maggiore è dovuta al fatto che le due coppie di fili non devono influenzarsi l'una con l'altra: questo implica necessariamente che i centri di rotazione siano due, come illustrato schematicamente nell'immagine seguente (figura 4.22).

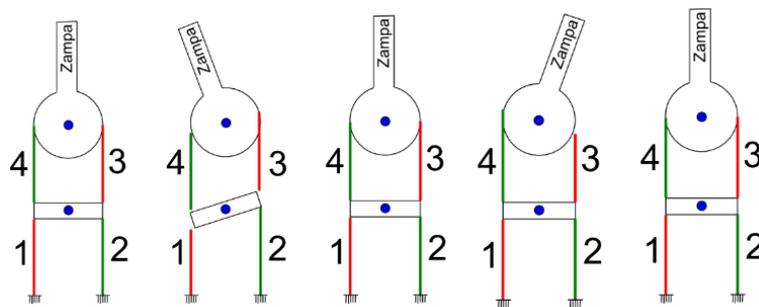


Figura 4.22: Soluzione per l'arcata completa

Lasciando eventualmente aperta la questione, se invece il requisito fondamentale non fosse quello di ottenere la posizione centrale ma piuttosto si desiderasse una variazione di rotazione totale di 60° , si potrebbe semplicemente ruotare il sistema di riferimento e partire dalla posizione -30° ciclando $-\gamma \rightleftharpoons \gamma$: in questa circostanza però (oltre ad ottenere uno sbilanciamento

del sistema, dato che la posizione del centro di massa cambia) il problema si sposterebbe sulle lunghezze eccessive degli attuatori, o meglio sul superamento delle dimensioni massime trasversali del corpo del rover, dove si presume vengano alloggiati i fili. Anche in questo caso la soluzione esisterebbe, in quanto si potrebbe inserire un sistema di carrucole sotto il corpo del rover per sfruttare meglio lo spazio disponibile: il rovescio della medaglia però (oltre alla maggior complessità del sistema) sta certamente nell'aumento degli attriti, anche qui da ridurre mediante cuscinetti e/o elementi in teflon. L'alternativa, ovvia, è quella invece di aumentare la larghezza della struttura primaria.

4.5.2 Autosostentamento

Nonostante il requisito del lavoro fosse quello di testare il comportamento dell'antagonismo puro simulando quindi l'assenza di forzanti esterne, ci si è posti il problema dell'autosostentamento del rover scegliendo come possibili ambienti operativi quello lunare, marziano e terrestre. Sottolineando il fatto che ora come ora Nemesys non si autosostiene nemmeno con i motori (o meglio riesce a farlo se essi vengono mantenuti accesi fornendo una coppia costante tale da vincere la forza peso), si è proceduto quindi con un calcolo preliminare per verificarne la possibilità.

Va da sé che, avendo progettato ad-hoc le coppie di attuatori SMA nelle condizioni sopra indicate, i fili di Nitinol scelti non possono garantire l'autosostentamento della struttura. Inoltre, inserendo la gravità si perde il concetto di antagonismo puro, in quanto uno dei due fili viene 'aiutato' dalla forza peso della zampa stessa (ritornando alla situazione ottenuta da [19]) e occorrerebbe eseguire nuove prove di caratterizzazione ove però il sistema risulterebbe sbilanciato (filo 1 VS. filo 2 + forzante). Tuttavia il banco di prova progettato sarebbe ugualmente utilizzabile, ad esempio inserendo una molla in serie al filo in grado di provocare una forza elastica pari a quella nota. Anche la struttura della zampa, in linea di principio, dovrebbe essere modificata marginalmente, mantenendo cioè la soluzione di progetto scelta e variando ovviamente le posizioni dei fori d'uscita dei fili o qualche componente (ad esempio cambiando le dimensioni delle pulegge).

La soluzione più semplice sarebbe quella di inserire dei fermi meccanici che vengono attuati per bloccare la zampa nella posizione di riposo e disattivati una volta che essa deve compiere un movimento⁴: le forze si scaricherebbero sulla struttura esterna mantenendo i fili di Nitinol senza ulteriori sforzi interni dati dalla reazione vincolare.

⁴Anche qui si potrebbe pensare di attivare tali fermi per mezzo di leghe SMA al posto di eventuali motorini elettrici

Nel seguito viene presentato il caso in cui si richiedesse ai fili SMA il compito di vincere la forza peso: come detto nel capitolo introduttivo, il modello di Nemesys attuale (MK III) ha una massa di 6150 g, a cui va sottratto il 41% riferito ai motori e un ulteriore 7% dato dai componenti di trasmissione della coppia (ingranaggi conici, ecc.), portando di fatto ad una massa totale depurata di circa 3200 g.

Ipotizzando per ora di dover sollevare solo 1 zampa per volta (e non 3 come avveniva nel worst-case analizzato da [14]) si è considerato il semplice sistema di aste mostrato in figura 4.23, dove F_p è pari a 1/5 della forza peso totale del rover.

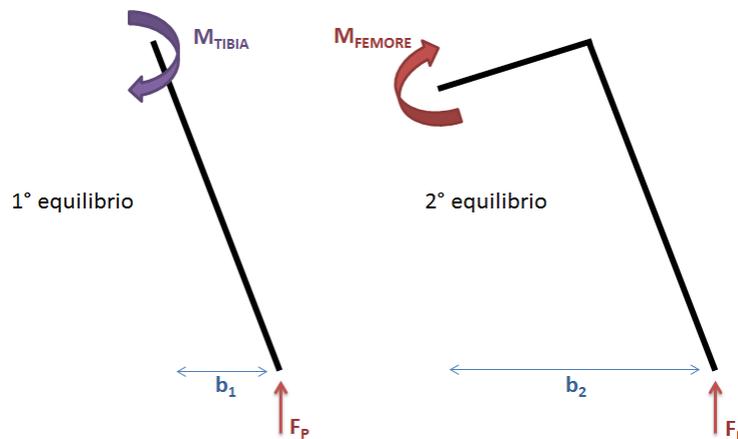


Figura 4.23: Sistema ad aste ipotizzato per il calcolo

Come si può notare, in ogni articolazione occorre fornire una coppia opposta al momento generato dalla forza peso: il componente più critico, come è facilmente intuibile, risulterà essere quello a cavallo tra il femore e l'anca in quanto il braccio di applicazione è il più elevato.

$$\begin{aligned}
 b_1 &= L_t \sin(10^\circ) = 165 \text{ [mm]} \sin(10^\circ) = 28.65 \text{ [mm]} \\
 b_2 &= L_f \cos(10^\circ) + L_t \sin(10^\circ) = \\
 &= 126 \text{ [mm]} \cos(10^\circ) + 165 \text{ [mm]} \sin(10^\circ) = 152.74 \text{ [mm]}
 \end{aligned}
 \tag{4.28}$$

Il momento che occorre fornire quindi è calcolabile facilmente moltiplicando la forza peso per il braccio corrispondente. Questo dovrà essere pari o inferiore al momento generato dal filo di Nitinol che, alloggiando su una puleggia di raggio R_p sarà uguale a $M = TR_p$, dove con T si è indicata la forza di trazione del filo.

Capitolo 4

Per valutare la forza T , bisogna fare riferimento ancora una volta all'andamento del grafico sforzo-deformazione a temperatura ambiente (figura 3.13) perché è a questa temperatura che il materiale è più facilmente 'detwinabile', e quindi presenta le peggiori caratteristiche meccaniche di resistenza: scegliendo ad esempio un valore massimo accettabile di deformazione pari allo 0.5% si ha che lo sforzo nel filo in fase martensitica è pari a circa 60 MPa. Questo valore di sforzo, moltiplicato per l'area della sezione del filo (che a questo punto diventa la variabile d'interesse per il calcolo del diametro minimo necessario) sarà appunto pari a T : nella tabella 4.5 vengono mostrati i risultati ottenuti con questo approccio.

Tabella 4.5: Autosostentamento: filo singolo in condizioni martensitiche

		Luna	Marte	Terra
g	$[m/s^2]$	1.6247	3.7110	9.8066
F_{pTOR}	$[N]$	5.1990	11.8752	31.3811
F_p	$[N]$	1.0398	2.3750	6.2762
M_{tibia}	$[Nm]$	0.0298	0.0680	0.1798
M_{femore}	$[Nm]$	0.1588	0.3628	0.9586
$A_{filo-tibia}$	$[mm^2]$	0.0662	0.1512	0.3996
$A_{filo-femore}$	$[mm^2]$	0.3529	0.8061	2.1303
$d_{filo-tibia}$	$[mm]$	0.2903	0.4388	0.7133
$d_{filo-femore}$	$[mm]$	0.6703	1.0131	1.6469

Come si può notare, questa scelta non è fattibile, in quanto anche sulla Luna (in cui la gravità è 1/6 di quella terrestre) occorrerebbe un filo di diametro 0.67 mm, un valore decisamente troppo elevato. Una soluzione alternativa potrebbe essere quella di sfruttare i fili non in fase martensitica, bensì lasciandoli attivi: in questa circostanza lo sforzo sviluppato dal filo aumenta fino a 210 MPa, in quanto il filo in fase austenitica aumenta drasticamente il suo modulo elastico: in questo caso la situazione è riassunta nella tabella 4.6.

Come prevedibile, i risultati migliorano sensibilmente, rendendo fattibile anche il sostentamento su Marte. Il problema però è che i fili attivi si degradano rapidamente, oltre a richiedere potenza in maniera continua: di conseguenza anche questa possibilità è da scartare, anche se si potrebbe ugualmente tenere in considerazione se si imponesse un comando di corrente pulsata, il che ridurrebbe il consumo energetico, non rovinando al contempo il filo e mantenendolo sopra alla temperatura A_f .

Tabella 4.6: Autosostentamento: filo singolo in condizioni austenitiche

		Luna	Marte	Terra
$A_{filo-tibia}$	$[mm^2]$	0.0189	0.0432	0.1142
$A_{filo-femore}$	$[mm^2]$	0.1008	0.2303	0.6086
$d_{filo-tibia}$	$[mm]$	0.1552	0.2345	0.3813
$d_{filo-femore}$	$[mm]$	0.3583	0.5415	0.8803

Lasciando inalterate le condizioni al contorno e le variabili scelte, un'ultima soluzione potrebbe però parzialmente risolvere i problemi evidenziati nel primo caso: in particolare, facendo compiere un percorso di andata/ritorno al filo in modo da sviluppare così il doppio della trazione, si dovrebbero ottenere miglieorie significative (tabella 4.7).

Tabella 4.7: Autosostentamento: filo doppio in condizioni martensitiche

		Luna	Marte	Terra
$d_{filo-tibia}$	$[mm]$	0.1452	0.2194	0.3567
$d_{filo-femore}$	$[mm]$	0.3352	0.5066	0.8235

Tralasciando i risultati ottimi che si otterrebbero con il doppio filo in fase austenitica (sempre per i motivi elencati in precedenza), quest'ultima soluzione sembra finalmente fornire alcune speranze per l'autosostentamento, sicuramente per l'ambiente lunare, e con buone possibilità anche per Marte. Tuttavia, un aspetto negativo legato a questo espediente è il fatto che raddoppiando la lunghezza degli attuatori si raddoppia la potenza richiesta. Inoltre, ancorché il dato di diametro necessario per Marte sembri plausibile, si faccia attenzione al fatto che il filo di Nitinol arrotolato sulla puleggia presenterà deformazioni sulle fibre esterne non proprio trascurabili, limitando di fatto il valore massimo del diametro, come suggerito da [19]:

$$d_{filo} \leq \frac{\epsilon_{max}}{1 - \epsilon_{max}} \cdot 2R_p \quad (4.29)$$

per esempio, se si assume un valore di ϵ_{max} sulle fibre esterne del 4% si ha che con il raggio della puleggia scelto (7.5 mm) il diametro massimo è pari a 0.6250 mm.

Concludendo, la soluzione più fattibile e sicura rimane quella dell'inserimento di fermi meccanici di sostegno. I risultati dell'autosostentamento

Capitolo 4

tramite filo infatti appaiono piuttosto limitanti, tenendo conto anche del fatto che sono stati calcolati senza assumere alcun margine di sicurezza e con 5 zampe a terra invece che 3. Qualora comunque si volesse scegliere di non utilizzare i fermi, tra le soluzioni alternative si propone di:

1. aumentare necessariamente il diametro del filo di Nitinol;
2. cercare di ridurre ulteriormente la massa del rover;
3. aumentare il raggio delle pulegge in modo da ottenere più coppia di contrasto;
4. mantenere il filo a temperature intermedie tra la fase martensitica e la fase austenitica (es. 50°C , non attivandolo) in modo da aumentare lo sforzo esercitabile;
5. diminuire il braccio di leva, riducendo le dimensioni di ingombro o ancor meglio ritornare alla configurazione MK I di Nemesys, avente le zampe retratte (figura 1.3);
6. conservare l'utilizzo del motore elettrico per la movimentazione del femore, essendo il tratto di zampa più gravoso, e attuare i rimanenti gradi di libertà con SMA.
7. inserire molle torsionali di supporto per il filo (possibilmente avente una costante elastica ridotta) in modo da aumentare il momento generato e parallelamente non influire in maniera rilevante sulle prestazioni, in termini di rotazione massima ottenibile.

Capitolo 5

Validazione sperimentale

In questo capitolo vengono presentati i risultati ottenuti dai test sperimentali di validazione. Per simulare l'assenza di gravità (requisito imposto per garantire il comportamento antagonista puro, obiettivo delle precedenti prove di caratterizzazione), l'alzata dell'arto è stata testata ponendo il sistema in posizione orizzontale, ovvero parallelamente al piano d'appoggio; per quanto riguarda l'avanzata invece, molto semplicemente, si è mantenuta la zampa sollevata dal terreno. In entrambi i casi si sono approssimate le condizioni di mancanza di forzanti esterne: i due movimenti però sono stati necessariamente studiati in modo separato.

5.1 Set-up preliminare

5.1.1 Preparazione dei fili

La prima operazione effettuata è stata quella di pre-allungare uno dei due fili, scegliendo come detto il livello di pre-deformazione del 4%.

Per far ciò, facendo riferimento alla figura 3.14, dove si mostra l'andamento forza/deformazione ottenibile del filo di Nitinol a temperatura ambiente, si è deciso di collegare un'estremità del filo ad una massa nota e scelta tale da produrre esattamente la deformazione voluta¹: in particolare, la forza di trazione necessaria deve essere pari a circa 5.1 N, dunque per raggiungere lo scopo è risultata essere sufficiente una massa di poco superiore ai 500 g. Il filo antagonista invece è stato sottoposto solamente ad un ciclo di

¹Nei test di caratterizzazione del comportamento antagonista invece si era preferito pre-allungare l'attuatore SMA attraverso la guida micrometrica, misurando direttamente la differenza di lunghezza: i metodi sono entrambi validi e del tutto equivalenti.

riscaldamento e raffreddamento a carico nullo per eliminare eventuali stati di sforzo o deformazione residui.

Una volta conclusa questa fase, si è passati al posizionamento dei fili all'interno del tratto di zampa corrispondente (seguendo il 'percorso' illustrato nel capitolo 4), e al successivo crimpaggio. Per come è stato progettato il sistema, queste operazioni (tutt'altro che semplici dati i ridotti spazi di manovra) hanno introdotto inevitabilmente errori - specialmente per ciò che concerne il grado di deformazione iniziale - modificando di fatto le condizioni ottimali desiderate: questo aspetto verrà trattato specificatamente nei paragrafi riguardanti i risultati ottenuti.

5.1.2 Sistema per la misurazione della rotazione

In fase di progettazione preliminare, per la misurazione degli angoli di rotazione era inizialmente prevista l'installazione di 3 encoder rotativi in corrispondenza del perno di ogni cerniera, in analogia con quanto fatto per Nemesys MK III.

In questa nuova versione della zampa però, dato che la scelta finale è ricaduta sull'utilizzo delle boccole in teflon al posto dei cuscinetti a sfera (per i vantaggi discussi nel capitolo 4), non è stato possibile percorrere la stessa strada, in quanto la rotazione del perno è risultata essere indipendente da quella del tratto di tubolare interessato: tuttavia una possibilità che permetterebbe ugualmente la misurazione diretta degli angoli - e di conseguenza rivalutare l'impiego degli encoder - sarebbe quella di modificare la sezione del perno nella zona centrale, cambiandone la morfologia (ad esempio con una forma a foro allungato o rettangolare) per una lunghezza pari alla larghezza esterna del tubolare, in modo da rendere solidali i due componenti.

Date le difficoltà riscontrate in fase di realizzazione, si è privilegiata quindi la semplificazione del progetto e la ricostruzione a posteriori della storia temporale degli angoli, lasciando comunque valida la soluzione proposta per eventuali sviluppi futuri.

Pertanto, anche per non inficiare la misura con altre strumentazioni esterne (ad esempio mettendo a contatto della zampa un potenziometro lineare), si è deciso di post-processare l'andamento attraverso l'ausilio di un programma *Matlab*[®] utile al tracciamento della posizione di alcuni bersagli mobili di tipo RGB². In particolare, dato in ingresso un video, il software è in grado di riconoscere i bersagli colorati (rossi, verdi e blu), di individuarne il centroide,

²Si veda la funzione madre (opportunosamente modificata) disponibile all'indirizzo <http://www.mathworks.it/matlabcentral/fileexchange/28757-tracking-red-color-objects-using-matlab/content/redObjectTrack.m>

e di restituire le coordinate dell'oggetto (in pixel, con origine in alto a sinistra) per ogni istante temporale, o meglio per ogni frame del video.

Dopo alcune prove di calibrazione si è verificata la bontà di tale soluzione (anche sotto il punto di vista della precisione dei risultati, dipendente dalla risoluzione dell'immagine), e stabilito di proseguire con questa modalità, ricostruendo in via numerica l'andamento degli angoli di rotazione.

5.1.3 Circuito di alimentazione

Le prove sul dimostratore tecnologico sono state effettuate in posizione orizzontale per simulare l'assenza di gravità: in questo modo quindi si sono testati i due movimenti (alzata e avanzata) separatamente, riducendo così a due il numero massimo di comandi da fornire in contemporanea, ovvero quelli necessari alla rotazione della tibia e del femore³.

Di conseguenza è stato preventivamente creato un circuito elettrico formato da quattro amplificatori operazionali (modello BB OPA 547T), posti in configurazione non invertente e collegati tra di loro in modo da poter utilizzare un'unica alimentazione esterna: infatti, a differenza delle prove di caratterizzazione dell'antagonismo in cui si sono utilizzati per comodità due generatori di tensione separati (uno per ogni filo, vedi figura 3.18), si è preferito simulare le condizioni operative - in cui l'alimentazione è unica - e al contempo non impiegare un numero elevato di dispositivi.

I comandi temporizzati (V_{in}) vengono forniti dalla scheda di acquisizione (sempre la *NI USB-6289* usata per i test precedenti e dotata di quattro uscite analogiche), alimentando così gli amplificatori per la conseguente circolazione della corrente necessaria all'attivazione del filo di Nitinol. Per conoscere se il valore della corrente è pari a quello desiderato, occorre misurare preliminarmente le resistenze ai capi di ogni filo SMA: a questo punto l'ingresso V_{in} è automaticamente determinato in quanto dipendente da essa.

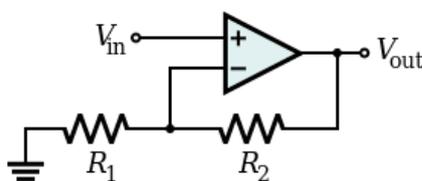


Figura 5.1: Amplificatore operazionale in configurazione non invertente

³ovviamente in tal caso sono coinvolti 4 fili di Nitinol, ossia le due coppie corrispondenti per l'alzata ed il ritorno alla posizione iniziale

$$V_{in} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i \quad (5.1)$$

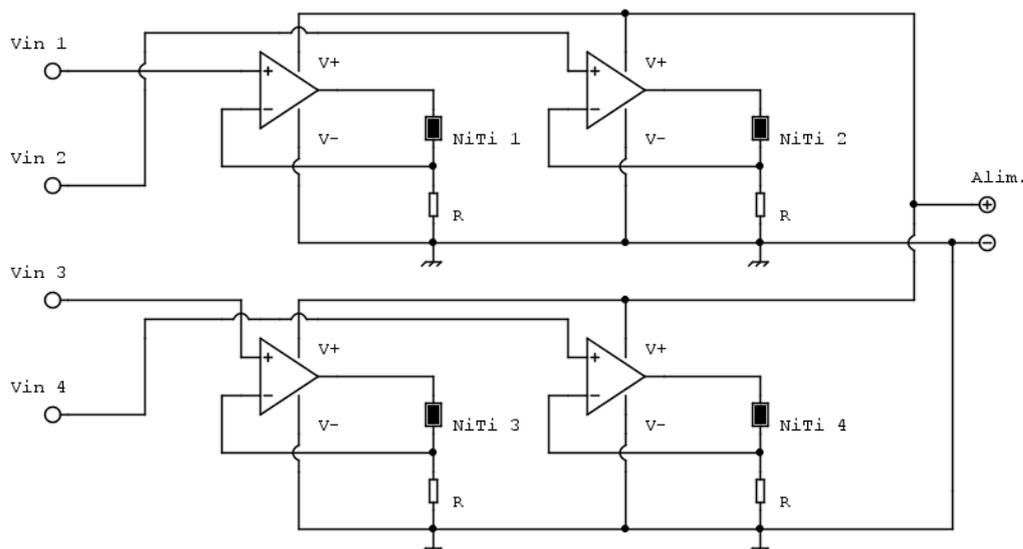


Figura 5.2: Circuito elettrico progettato per l'alimentazione di due coppie di fili

Entrando nel dettaglio, si sono utilizzate resistenze di potenza di 2Ω (chiamate R_1 nell'equazione generale dell'amplificatore operazionale, e in seguito semplicemente R come indicato nella figura 5.2) alimentando l'intero circuito con una tensione di 7.3 V , valore scelto in modo tale da essere sufficiente per l'attivazione contemporanea di tutti e quattro i fili⁴.

⁴E' da sottolineare il fatto che i componenti elettronici scelti disperdono potenza per effetto Joule, rendendo necessario l'impiego di dissipatori per evitare surriscaldamenti: la potenza dispersa, calcolabile a comandi spenti semplicemente visualizzando il valore di corrente non nulla indicato dall'alimentatore, è circa pari a 0.87 W . In altre parole, anche a riposo occorre fornire 0.87 W di potenza per il corretto funzionamento dell'impianto.

5.2 Esecuzione delle prove

Per collaudare il dimostratore tecnologico è stata eseguita una serie di 3 prove per ogni grado di libertà della zampa, sostituendo di volta in volta la coppia di fili di Nitinol per ulteriore verifica: i risultati della serie confermano la ripetibilità, pertanto vengono riportati gli esiti di un unico test.

Inoltre, ogni movimento è stato testato in maniera indipendente: questo appare ovvio per ciò che concerne il meccanismo dell'avanzata rispetto a quello dell'alzata (dato che per simulare l'assenza di gravità bisogna ruotare fisicamente il sistema di 90°), mentre invece è stata una scelta ponderata quella di trattare separatamente i due gradi di libertà dell'alzata in modo da dimostrare l'estrema libertà di comando da parte dell'utilizzatore. Per completezza è stata comunque effettuata una prova in cui tibia e femore sono stati azionati contemporaneamente.

5.2.1 Obiettivi

Come già descritto nel capitolo 4, gli obiettivi prefissati sono le rotazioni di:

- 30° per la tibia (grado di libertà dell'alzata utile al superamento di ostacoli di media entità);
- 20° per il femore (grado di libertà dell'alzata adibito al distacco dal terreno per la successiva avanzata dell'arto, oltre che per il superamento di piccoli ostacoli);
- 30° per l'anca (grado di libertà associato al movimento lungo la direzione d'avanzamento);

Per quanto riguarda l'atto dell'alzata, un'ulteriore dato significativo è quello relativo all'altezza massima di distacco dal terreno: questa grandezza è valutabile conoscendo l'altezza da terra del corpo del rover, chiamata h_{rover} .

$$h_{rover} = L_t \cos(\alpha_0 - \beta_0) - L_f \cos(\beta_0) \quad (5.2)$$

Nella formula, $\alpha_0 = 90^\circ$ e $\beta_0 = 80^\circ$ rappresentano gli angoli in posizione di riposo, mentre L_t e L_f indicano le lunghezze della tibia (165 mm) e del femore (126 mm). Sostituendo si ottiene un h_{rover} pari a 140.6 mm, utile appunto al calcolo dell'altezza massima (h_{max}) dal punto d'appoggio.

$$h_{max} = h_{rover} - [L_t \cos(\alpha - \beta) - L_f \cos(\beta)] \quad (5.3)$$

Capitolo 5

Per gli angoli α e β che compaiono nella relazione precedente si hanno 3 situazioni differenti:

1. se si aziona solamente la tibia, $\alpha = \alpha_0 + 30^\circ = 120^\circ$ e $\beta = \beta_0$;
2. se si aziona solamente il femore, $\alpha = \alpha_0 = 90^\circ$ e $\beta = \beta_0 - 20^\circ = 60^\circ$;
3. se si azionano contemporaneamente tibia e femore, $\alpha = \alpha_0 + 30^\circ = 120^\circ$ e $\beta = \beta_0 - 20^\circ = 60^\circ$.

I 3 casi portano rispettivamente ad un'altezza massima desiderata di **36.1** mm, **60.7** mm e **121.1** mm.

Per quanto riguarda il rimanente grado di libertà invece può essere utile conoscere l'entità dell'avanzamento in termini di distanza percorsa per ogni passo (p_{max}). In questo caso, applicando molto semplicemente Carnot, si ha che:

$$p_{max} = \sqrt{2L_{eq}^2(1 - \cos(\gamma))} \quad (5.4)$$

dove $\gamma = 30^\circ$ e $L_{eq} = L_f \cos(\beta_0) + L_t \sin(\alpha_0 - \beta_0) = 152.74$ mm, ottenendo un valore di p_{max} pari a **79.1** mm.

5.2.2 Risultati: Tibia

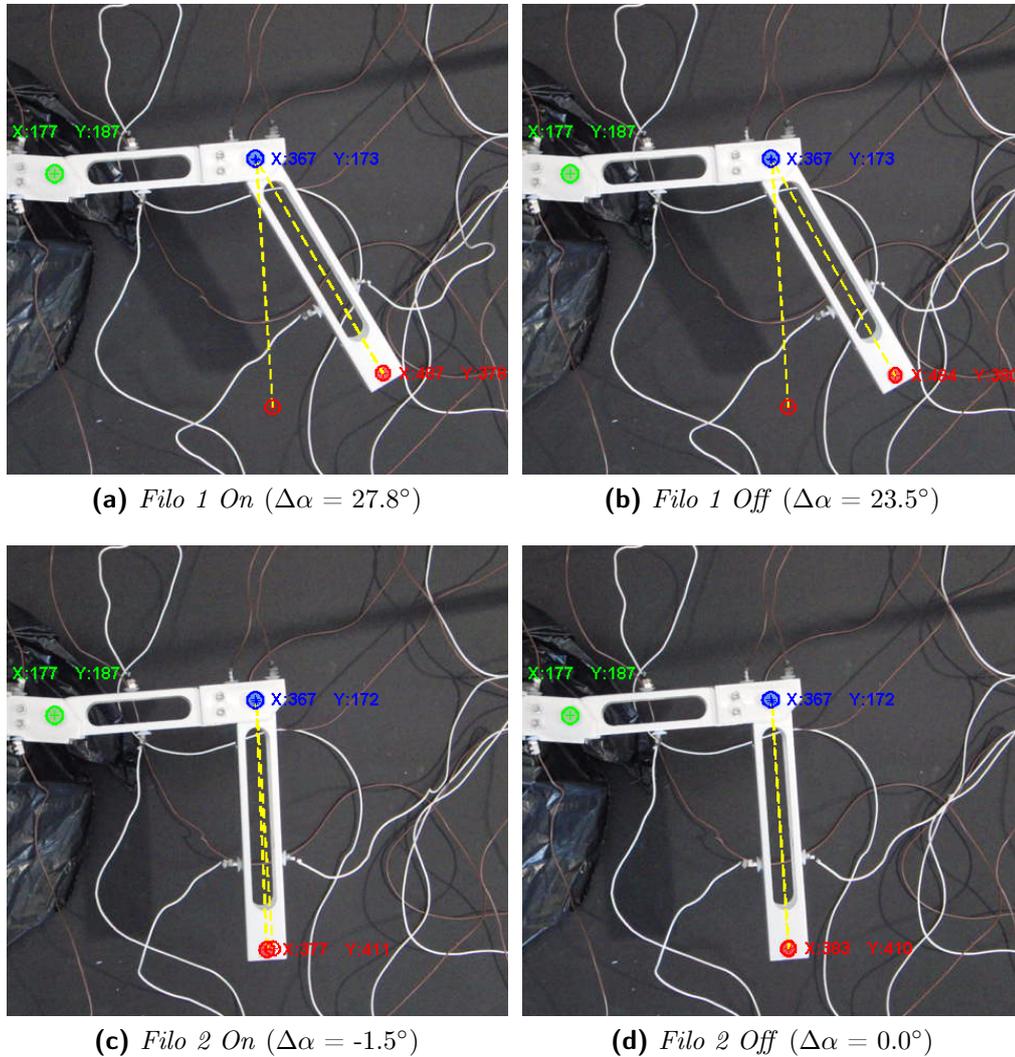


Figura 5.3: Sequenza di rotazione della tibia (coordinate in pixel)

Nelle figure 5.3 e 5.4 si mostrano i risultati ottenuti: la prima considerazione che è doveroso sottolineare è l'evidenza del corretto funzionamento del dispositivo e l'efficacia degli attuatori SMA in configurazione antagonista.

Inoltre, entrando nel dettaglio e osservando i valori numerici, si può notare che l'obiettivo è stato brillantemente raggiunto, in quanto la rotazione di questo tratto di zampa sfiora i 28° : ricordando infatti che i calcoli teorici sono stati condotti senza preoccuparsi di marginare alcuna variabile (in modo da ottenere un confronto diretto tra i risultati dei test di caratterizzazione e le

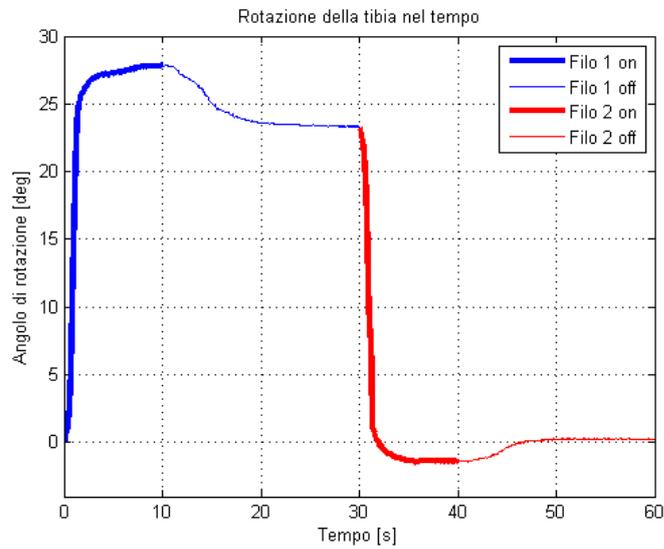


Figura 5.4: Storia temporale dell'angolo di rotazione della tibia

prove di validazione), e che esistono inevitabilmente perdite dovute ad attriti tra i diversi componenti, si può ritenere più che soddisfacente la variazione di angolo ottenuta.

Un aspetto negativo a cui bisogna porre attenzione però è la differenza tra le posizioni della tibia quando il filo è attivo rispetto a quando si è in fase di raffreddamento: i due punti di equilibrio infatti sono piuttosto distinti, e questo è dovuto essenzialmente ad errori in fase di montaggio (in particolare i fili sembrerebbero essere stati vincolati con uno sforzo non nullo).

Riconducendosi infine al calcolo dell'altezza massima di distacco dal terreno si è ottenuto il risultato di un h_{max} pari a 32.1 mm. Ricordandosi che il valore obiettivo era di 36.1 mm si ha quindi uno scartamento di 4 mm (-11%).

5.2.3 Risultati: Femore

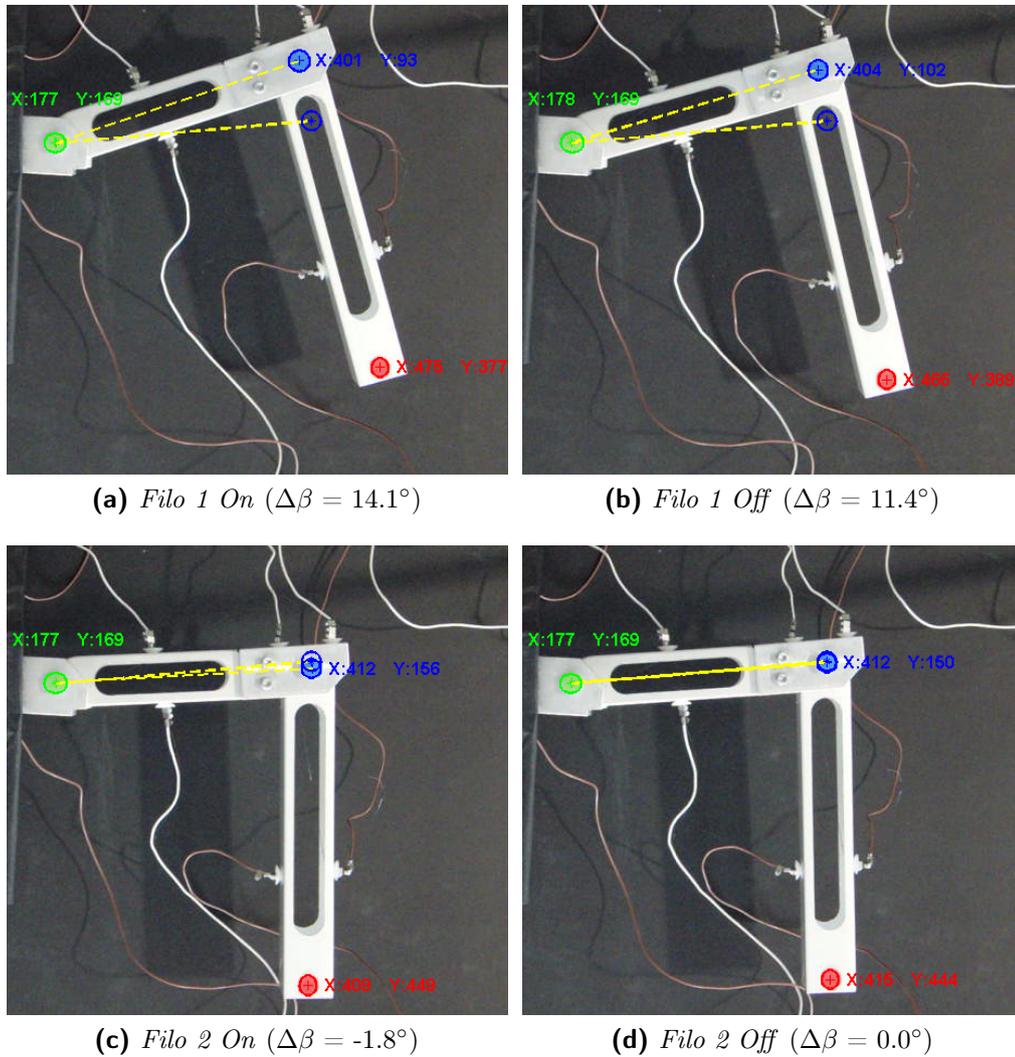


Figura 5.5: Sequenza di rotazione del femore (coordinate in pixel)

Nelle figura 5.5 viene mostrata la sequenza dei movimenti durante il ciclo di attivazione della coppia di fili di Nitinol preposti a questa rotazione.

I risultati di figura 5.6 evidenziano purtroppo alcune problematiche: innanzitutto si è riusciti ad ottenere una rotazione di soli 14° , a scapito dei 20° ipotizzati; secondariamente si nota che le posizioni di equilibrio tra filo attivo e inattivo sono abbastanza distanziate (circa 2.5°). Questi due aspetti sono imputabili senza dubbio agli errori di montaggio, così come è avvenuto nella prova precedente riguardante il movimento della tibia: risulta evidente infatti

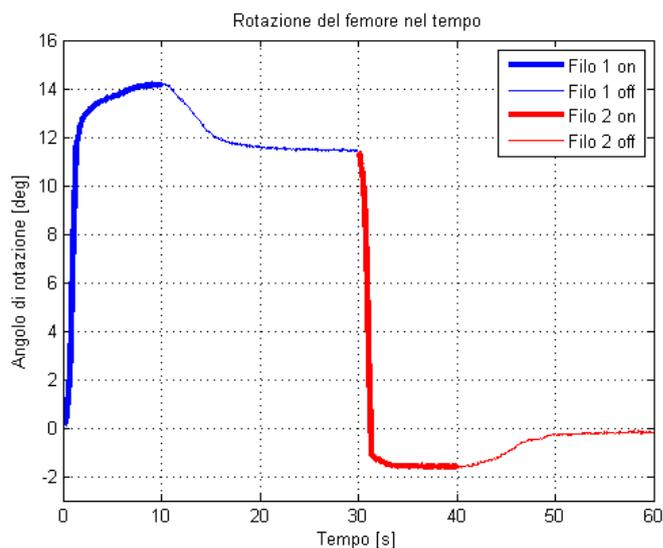


Figura 5.6: Storia temporale dell'angolo di rotazione del femore

che durante la messa in tensione e il crimpaggio resta applicato involontariamente un leggero sforzo iniziale, per giunta non misurabile (come invece avveniva durante le prove di caratterizzazione grazie al supporto delle celle di carico), causando una farfalla non esattamente simmetrica e più *aperta*. In aggiunta - oltre ovviamente alle perdite non del tutto trascurabili provocate dagli attriti - essendo questo il tratto con all'interno gli attuatori più corti, un'altra inesattezza è dovuta al fatto che non si riesce ad assicurare con estrema precisione il valore della lunghezza totale teoricamente calcolata nel capitolo 4, commettendo un errore percentuale più elevato rispetto agli altri due gradi di libertà.

Tuttavia emergono anche aspetti positivi da questo test sperimentale: in particolare l'obiettivo primario dell'alzata dell'arto è garantito, confermando quindi la bontà del cinematismo progettato. Inoltre, la rotazione ottenuta raggiunge il 70% del valore previsto e 14° sono più che sufficienti per il distacco (tanto è vero che anche nelle simulazioni di camminata di Nemesys MK III attuato con i motori elettrici la variazione di questo angolo non superava i 15°, si veda [14]).

L'altezza massima raggiunta, in questo caso attivando solo il femore, è pari a 41.4 mm: l'errore che si commette è evidentemente elevato dato che si prevedeva un h_{max} di 60.7 mm (-31.8%).

Essendo quindi parzialmente insoddisfatti dei risultati ottenuti, si è deciso di effettuare un'ulteriore prova modificando il grado di deformazione del filo 1, portandolo al 4.8%. I risultati sono visualizzabili nella figura 5.7, ed

evidenziano due aspetti in contraddizione: il primo, quello positivo, riguarda il miglioramento dell'angolo massimo ottenuto (17.7°) e quindi dell'alzata massima raggiunta da questo grado di libertà (53.1 mm, riducendo l'errore al -12.5%). L'aspetto negativo, come d'altronde era prevedibile, è un ulteriore peggioramento per ciò che riguarda la differenza tra le posizioni filo attivo/inattivo, portando lo scostamento ad oltre 5° .

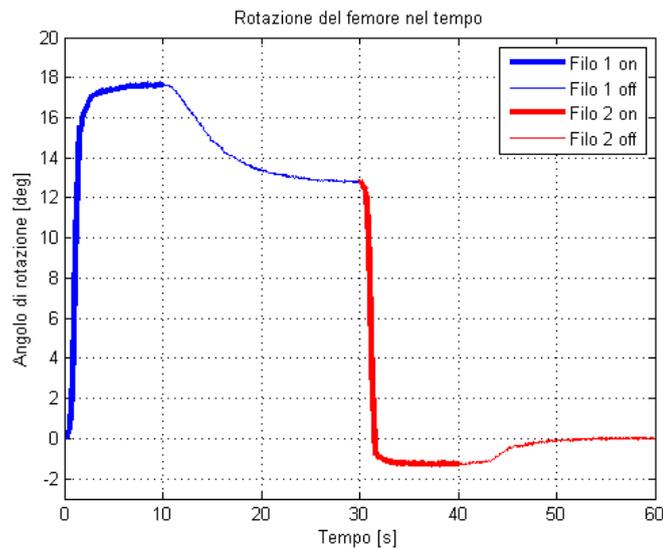


Figura 5.7: Storia temporale dell'angolo di rotazione del femore (2)

Ricapitolando, se l'obiettivo è quello di raggiungere un angolo di rotazione superiore, per questo grado di libertà occorre aumentare il livello di pre-deformazione del filo 1, o ancor meglio si potrebbe pensare di sovradimensionare la lunghezza degli attuatori (creando ovviamente altri due fori per l'uscita del filo leggermente scostati dalla posizione originale). In questo modo infatti si presume si riesca a ritornare nella condizione ottimale di andata/ritorno con le due posizioni intermedie più vicine ai massimi assoluti.

5.2.4 Risultati: Anca

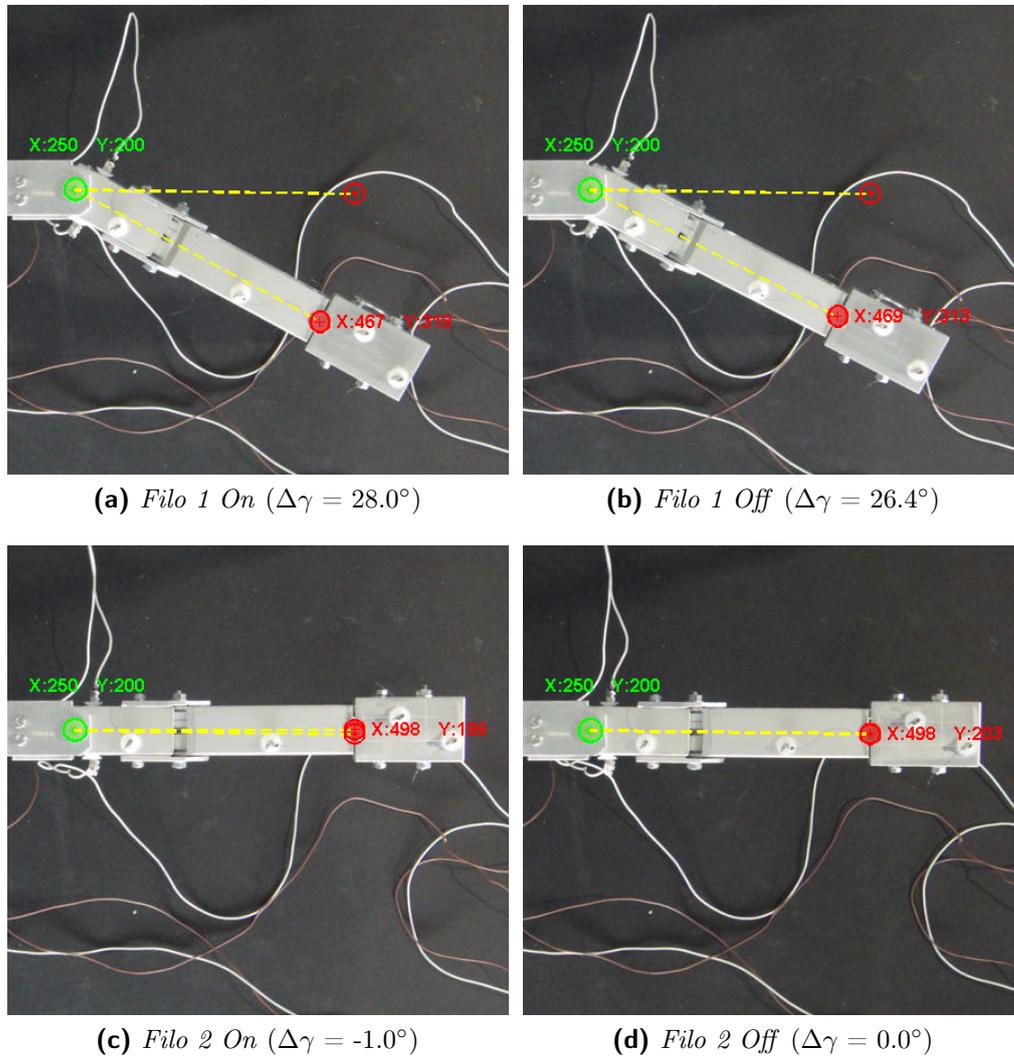


Figura 5.8: Sequenza di rotazione dell'anca (coordinate in pixel)

E' da sottolineare che i movimenti effettuati nel piano, come appunto la rotazione dell'anca, rispecchiano perfettamente le motivazioni dello studio di caratterizzazione del comportamento antagonista, poiché in questa situazione idealmente non si hanno forzanti di alcun tipo (salvo quando sono presenti pendenze eccessive del terreno).

Come si può notare (figure 5.8 e 5.9), per questo grado di libertà i risultati sono eccellenti, riuscendo ad ottenere una rotazione di 28° ; inoltre, anche il ritorno alla posizione iniziale è perfettamente riuscito e le posizioni di equilibrio

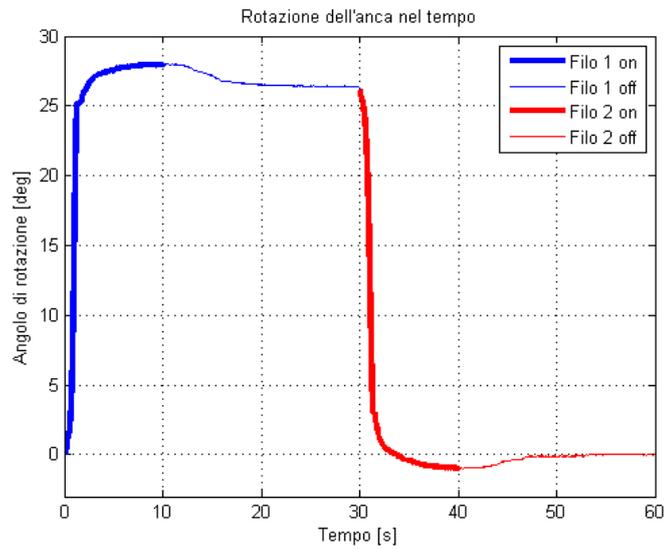


Figura 5.9: Storia temporale dell'angolo di rotazione dell'anca

tra filo attivo e inattivo sono poco distanti (differenza di circa 1.5°). In altre parole si è riusciti a simulare in maniera ottimale il comportamento on/off desiderato, senza particolari perdite dovute ad attriti o errori di montaggio, come invece è avvenuto per il femore.

Infine, per quanto riguarda la distanza d'avanzamento si è ottenuto un passo di ampiezza pari a 73.9 mm, commettendo un errore sul valore teorico (79.1 mm) di 5.2 mm (-6.5%).

5.2.5 Risultati: Alzata combinata

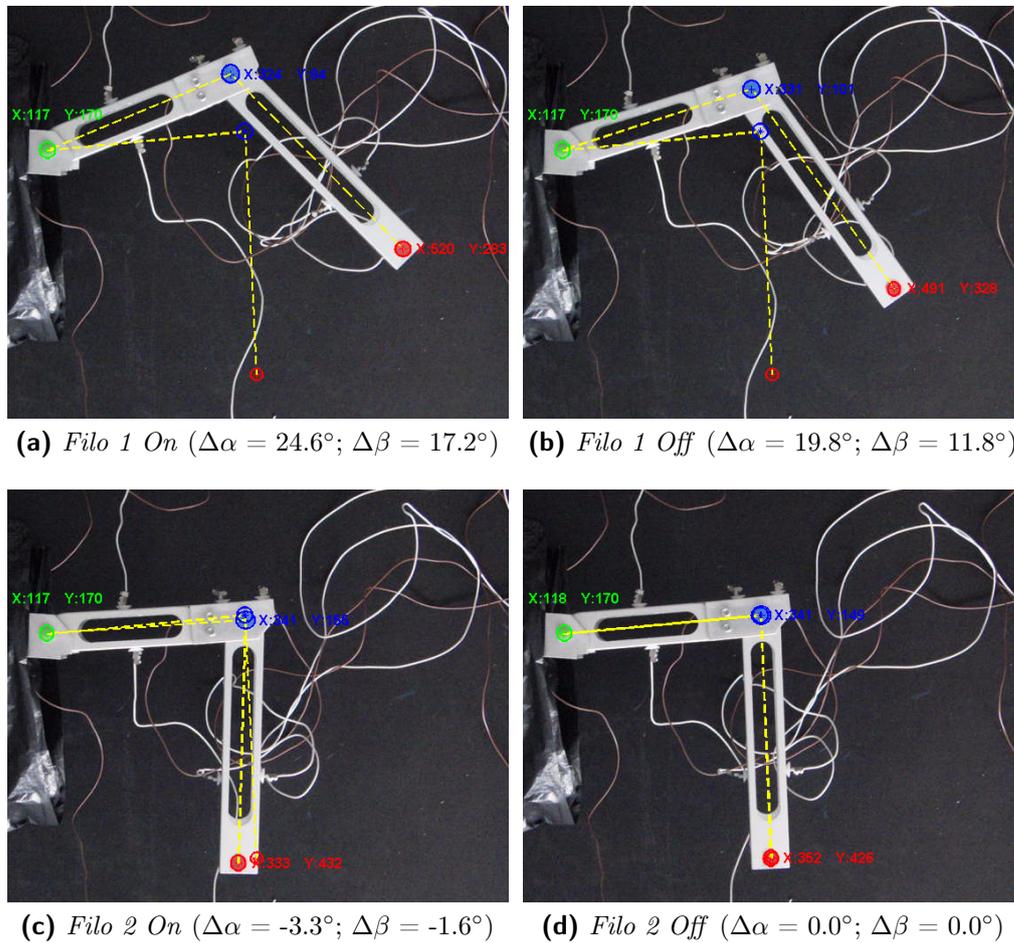


Figura 5.10: Sequenza di rotazione dell'alzata combinata (coordinate in pixel)

Per completezza è stata simulata anche l'alzata combinata, ovvero si sono attivati contemporaneamente i gradi di libertà del femore e della tibia. Avendo eseguito questa prova alla fine dei test di validazione, si è deciso di riutilizzare gli attuatori installati per ultimi (evitando così un'ulteriore sostituzione): in questo modo si è anche verificata la corretta funzionalità dei fili attivandoli a distanza di giorni. In particolare, nel grado di libertà del femore sono rimasti alloggiati quelli della prova (2) descritta nel paragrafo 5.2.3, con il filo 1 pre-deformato al 4.8%.

Tuttavia, siccome lo scopo era quello di mostrare la possibilità di variazione del comando (tra gdl indipendenti, dipendenti, durata dell'attivazione, ecc.)

e testare il software, si è ugualmente pensato che fosse interessante mostrare anche questi risultati.

Come si nota dalla sequenza di immagini (figura 5.10), e come previsto dalle relazioni teoriche illustrate negli obiettivi da raggiungere, attivando simultaneamente i due tratti della zampa si riesce ad ottenere un distacco da terra decisamente elevato. In particolare, ancorché come detto si presume che le condizioni di montaggio non siano quelle ottimali, è risultata un'altezza massima pari a circa 96 mm (a scapito dei 121.1 mm desiderati).

Presupponendo invece di considerare gli esiti migliori di tibia e femore (27.8° uniti ai 17.7°) si sarebbe ottenuto un valore di 105.7 mm (commettendo un errore del -12.7%, in linea con quelli precedenti).

Volendo analizzare in altro modo questo risultato, l' h_{max} di 105.7 mm consentirebbe al rover di superare ostacoli di altezza pari al **75.2%** della sua altezza totale.

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

Si può affermare di aver raggiunto gran parte degli obiettivi prefissati inizialmente.

In particolare, l'argomento cruciale di questa trattazione (ovvero la disposizione in configurazione antagonista di due attuatori in lega a memoria di forma) è stato analizzato approfonditamente, migliorandone così la comprensione, il principio di funzionamento e le performance ottenibili.

In questa circostanza, la campagna di prove sperimentali si è dimostrata valida, attestando la stabilità del sistema al variare di molteplici parametri d'interesse, proponendo al contempo diverse strategie di installazione: in altre parole, si è riusciti a mettere a punto una corretta procedura per la caratterizzazione dei fili di Nitinol in questa configurazione non convenzionale, utile al successivo dimensionamento di una coppia di attuatori SMA.

Focalizzandosi sull'applicazione, i risultati dei test hanno quindi permesso la progettazione di un dimostratore tecnologico - la zampa robotica di un rover spaziale - per studiarne la movimentazione in condizioni di assenza di gravità.

Il calcolo preliminare del bilancio termico agente sui fili e lo studio teorico del loro posizionamento all'interno della struttura hanno permesso di ottimizzare la potenza richiesta e di determinare la lunghezza minima necessaria degli attuatori: la combinazione di questi due fattori ha fatto in modo che si riducessero in maniera significativa i consumi, passando dai 19 W (richiesti per la camminata standard mediante l'utilizzo dei motori) ai circa 5 W per ogni zampa nel caso in cui tutti gli snodi vengano attivati contemporaneamente.

Lo straordinario vantaggio che comporta la sostituzione dei motori elettrici con i fili in Nitinol però riguarda senza dubbio il guadagno in termini di massa: confrontando i dati dell'ultima versione di Nemesys si è passati da 6150 a circa 3200 g, praticamente dimezzandone il valore. In aggiunta, il

beneficio dato dal risparmio di potenza sopra esposto avrà effetto anche sul contenimento dei sistemi di generazione, riducendo ulteriormente la massa totale (o sotto un altro punto di vista aumentando la capacità di eventuali payload scientifici).

Partendo da questi presupposti, gli sviluppi futuri del progetto sono numerosi, tra i quali spiccano certamente quelli di:

- eseguire ulteriori test di caratterizzazione dell'antagonismo, per poter validare i risultati e migliorarne la statistica, anche modificando altre variabili che per il momento non sono state considerate (diametro del filo, temperature esterne differenti, modalità ed entità dell'attivazione e del raffreddamento, ecc.);
- effettuare un'analisi approfondita sul tema dei problemi termici marginalmente trattati in questo lavoro di tesi (sistemi attivi di dissipazione, applicazioni nel vuoto, studio del comportamento del Nitinol in differenti condizioni ambientali);
- ideare un sistema di controllo per migliorare ulteriormente l'iniezione di corrente, i tempi di accensione/spengimento e le temperature raggiunte, specialmente se considera l'ambiente spaziale dove i requisiti necessitano un controllo molto più 'spinto';
- collegato al precedente, indagare se sia possibile controllare la trasformazione di fase, in modo da poter così ottenere un ventaglio di movimenti (e non solo un comando del tipo on/off) per la rotazione dei giunti della zampa;
- completare i test di collaudo eseguendo una prova a fatica per valutare l'eventuale perdita di prestazioni degli attuatori dopo migliaia di cicli;
- modificare il dimostratore esistente in modo da facilitare l'installazione degli attuatori SMA ed evitare così il problema dell'eccessiva sensibilità del sistema appurata in fase di montaggio: in questo modo infatti si presume che si possano ottenere esiti migliori e più coerenti.

Passando alle problematiche riscontrate, si evince che uno dei punti deboli delle SMA risultano essere senz'altro i tempi ciclo: sia durante i test di caratterizzazione che durante le prove di validazione si è preferito rimanere conservativi per evitare possibili danneggiamenti. Tuttavia, come dimostrato, i tempi di raffreddamento possono essere ridotti fino a 12-13 secondi (sempre sfruttando solo la convezione naturale), mentre se si traesse vantaggio dalla

convezione forzata si otterrebbe un sistema prestante anche sotto questo punto di vista, pur non eguagliando la velocità dei motori. Per la fase di attivazione invece i tempi sono relativamente ridotti, anche qui ulteriormente riducibili aumentando l'efficacia del riscaldamento per effetto Joule: dato però che l'obiettivo primario consisteva nella diminuzione della potenza necessaria, si è trovato un compromesso scegliendo un valore di corrente che fosse adatto e ponderato.

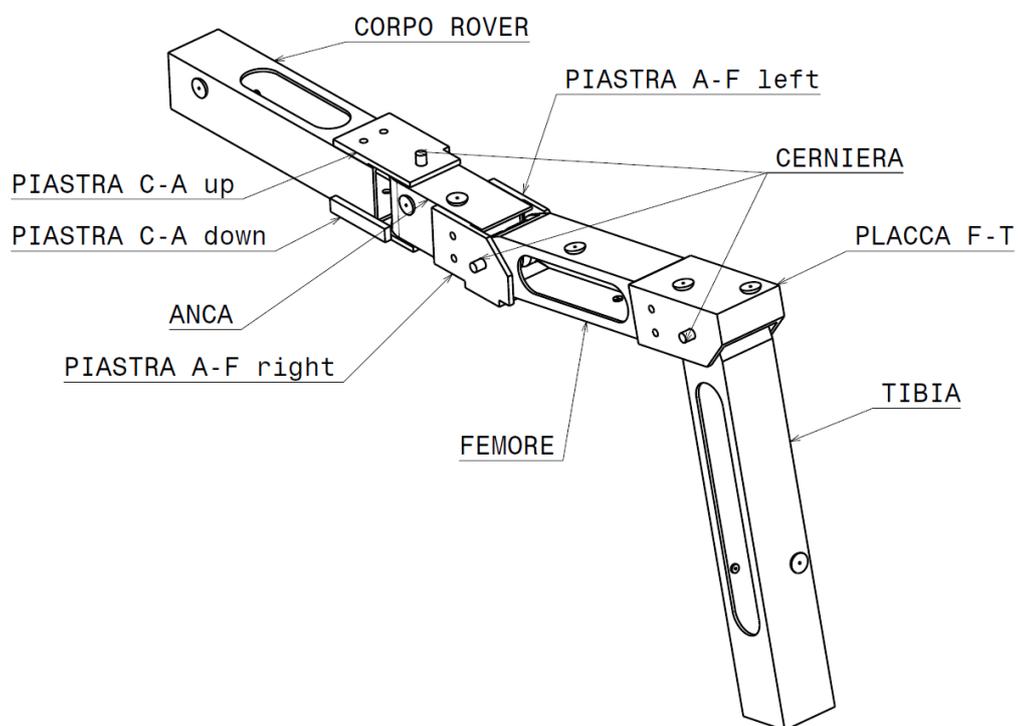
In definitiva, l'applicazione merita ulteriori indagini se inserita in un contesto di utilizzo in campo spaziale: al livello attuale occorre valutare più adeguatamente i problemi derivanti dall'ambiente operativo (temperature esterne, tempi di raffreddamento, metodi di diffusione del calore).

Il dimostratore progettato infatti deve essere inteso come un primo spunto per la successiva ridefinizione una volta nota la missione: in questa circostanza si renderanno necessarie nuove e differenti prove di caratterizzazione dell'antagonismo, ed in tal senso le questioni aperte illustrate nel paragrafo 4.5 richiedono un maggior approfondimento, specialmente per ciò che riguarda l'autosostentamento del rover.

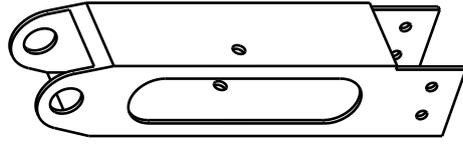
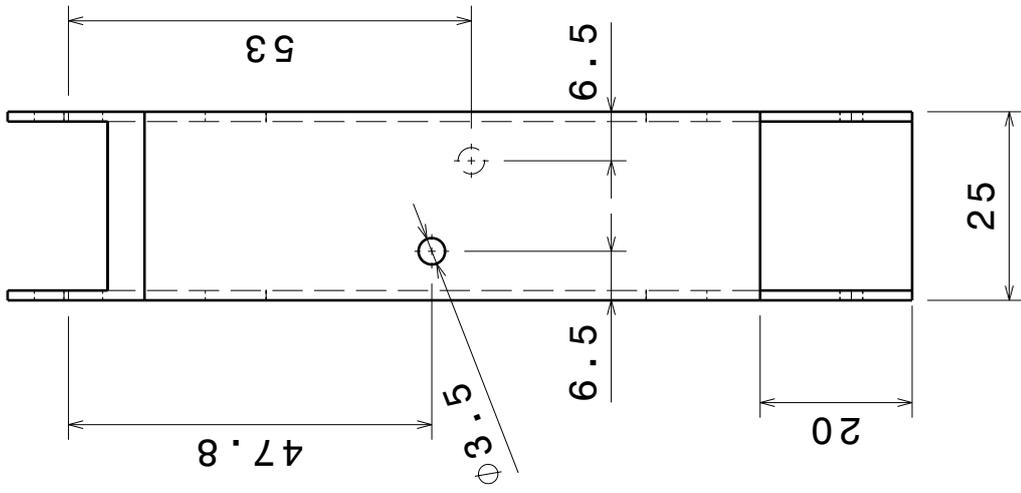
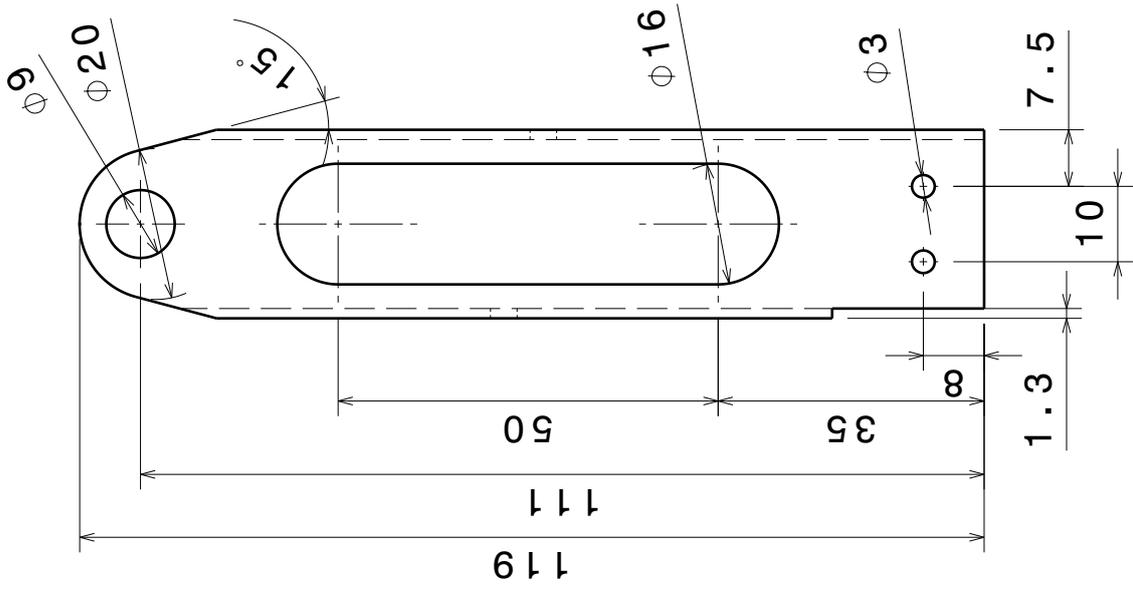
Ciò che è si desidera sottolineare però è l'esser riusciti a dimostrare la fattibilità dell'attuazione tramite le leghe a memoria di forma anche quando si è in assenza di forzanti esterne. Il comportamento antagonista mostra infatti l'efficacia di questi attuatori persino in questa configurazione, garantendo la ripetibilità del movimento e la ciclicità dei risultati.

Appendice

Disegni costruttivi



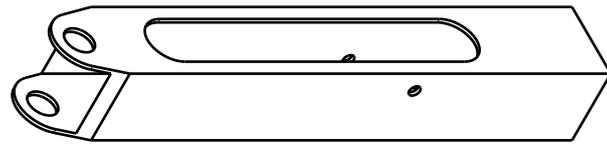
Zampa Nemesys: visione d'insieme con specifica componenti principali



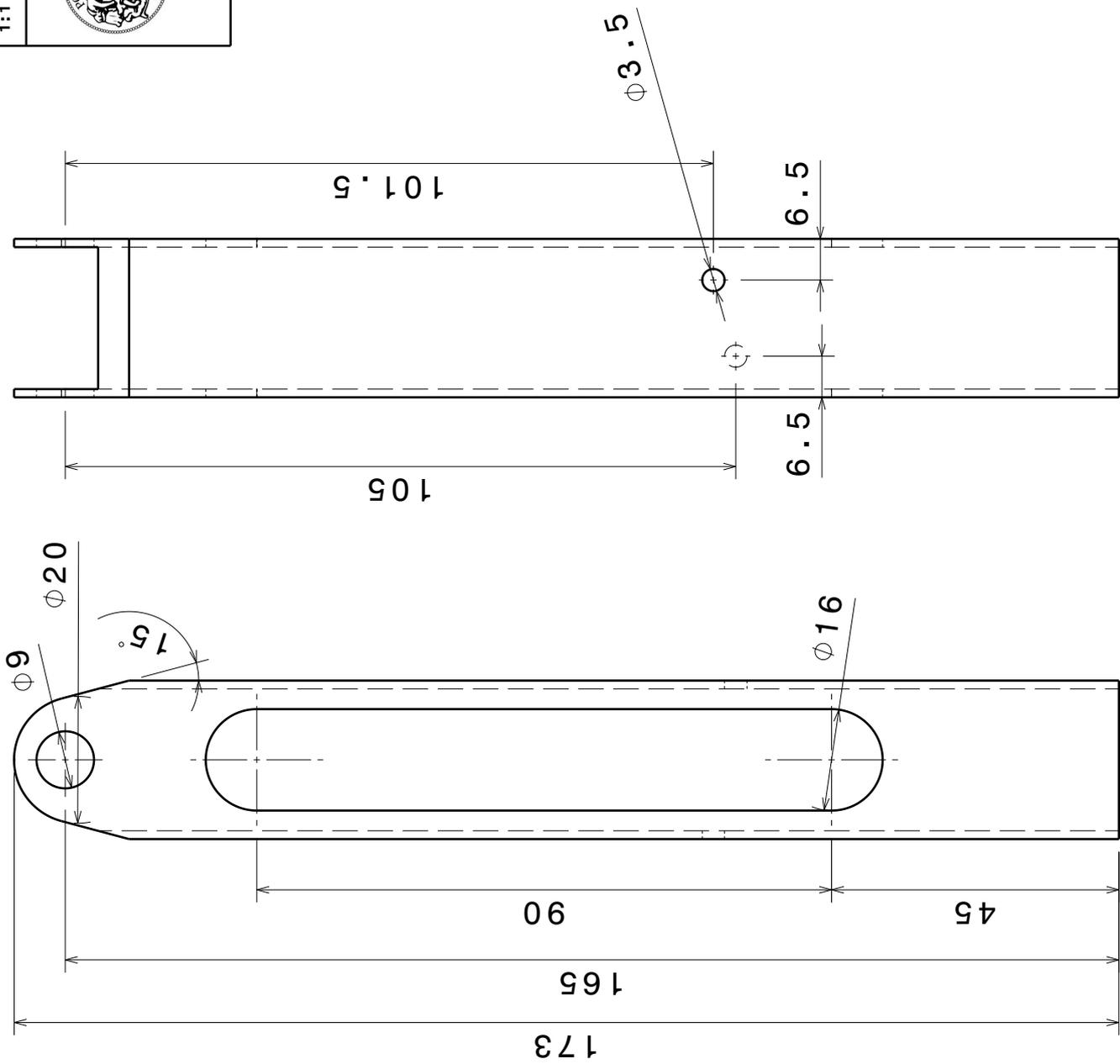
Vista isometrica
Scala 1:2

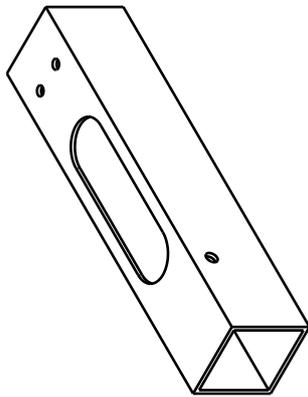
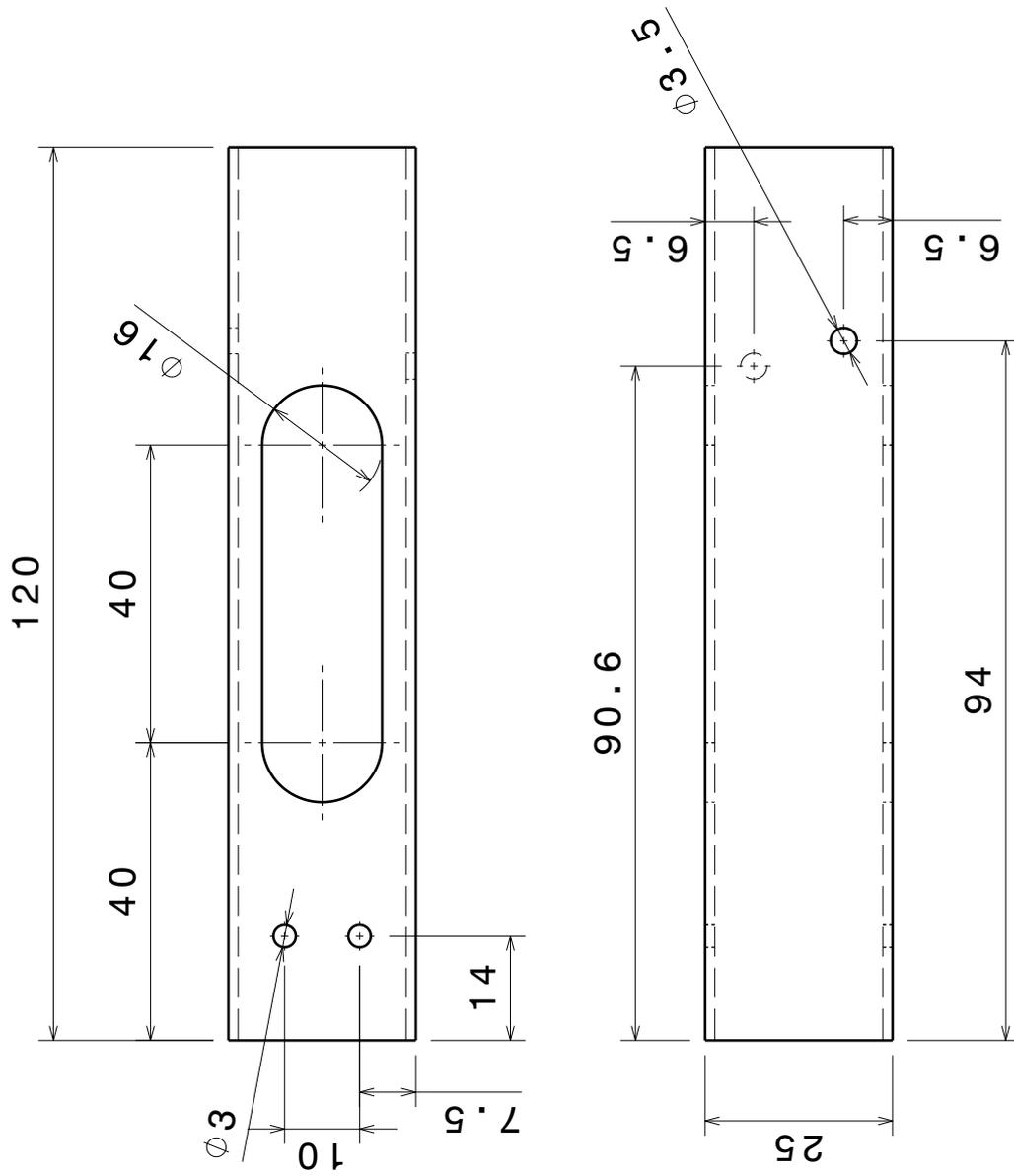
Scala 1:1		FEMORE
		Materiale: Tubolare 25x25x1.3 mm - Al 6063 T5 N° pz. 1
		Moschetti Manuele

Scala 1:1	TIBIA	
	Materiale: Tubolare 25x25x1.3 mm - Al 6063 T5 N° pz. 1	
	Moschetti Manuele	



Vista isometrica
Scala 1:2





Vista isometrica
Scala 1:2

Scala
1:1

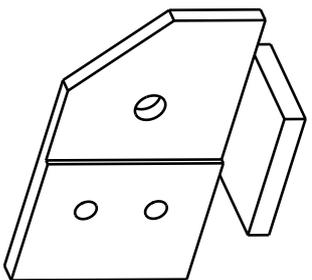


CORPO ROVER

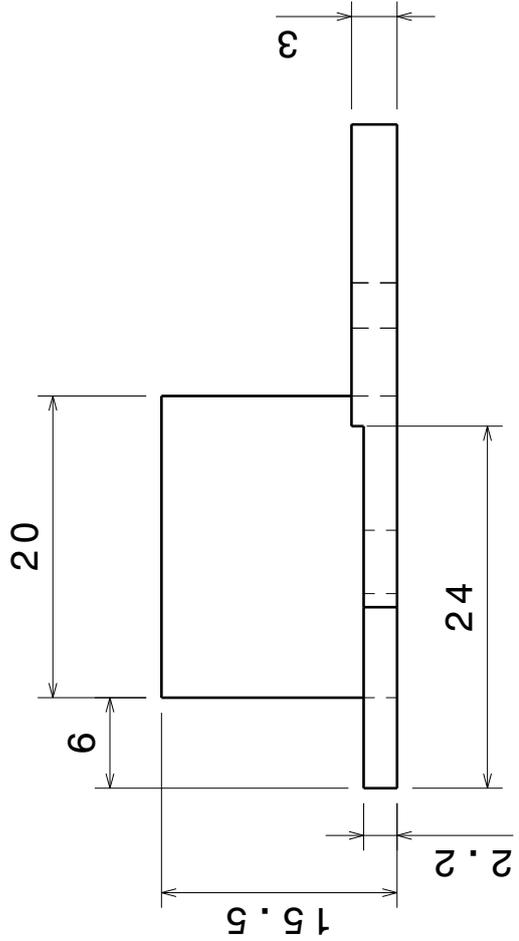
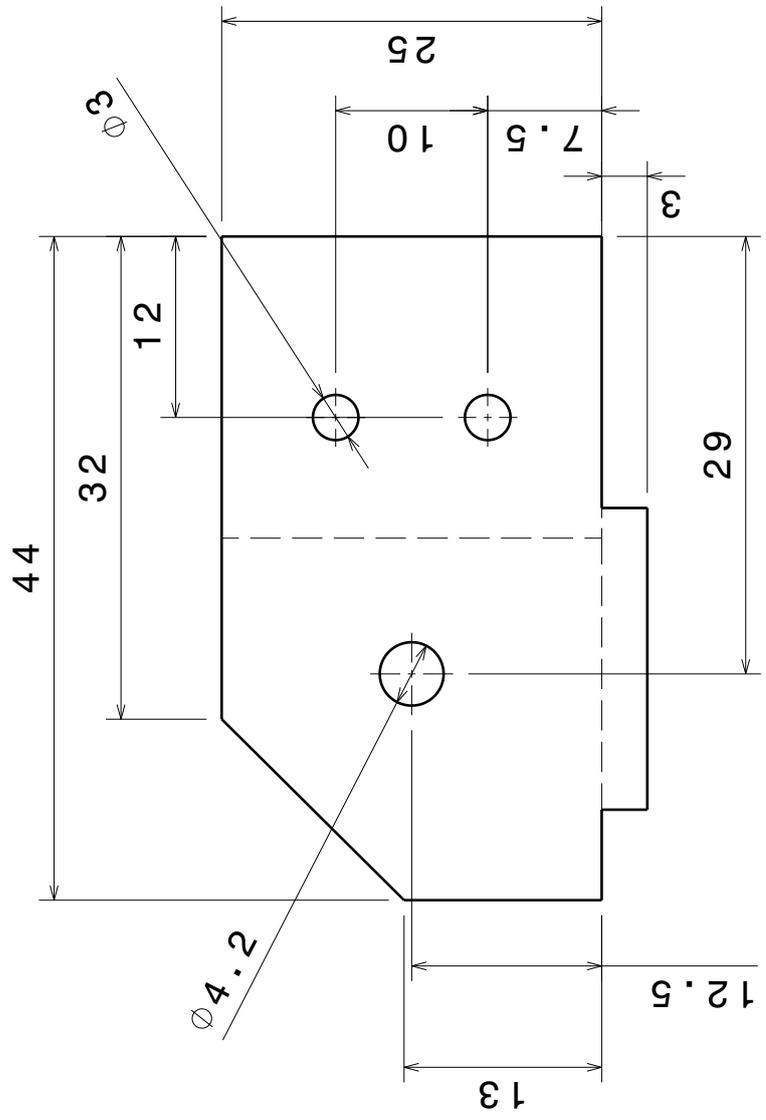
Materiale: Tubolare
25x25x1.3 mm - Al 6063 T5
N° pz. 1; Scala 1:1

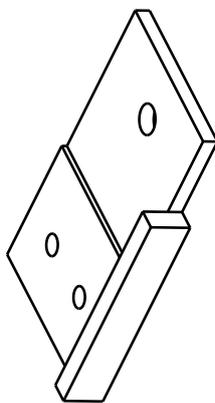
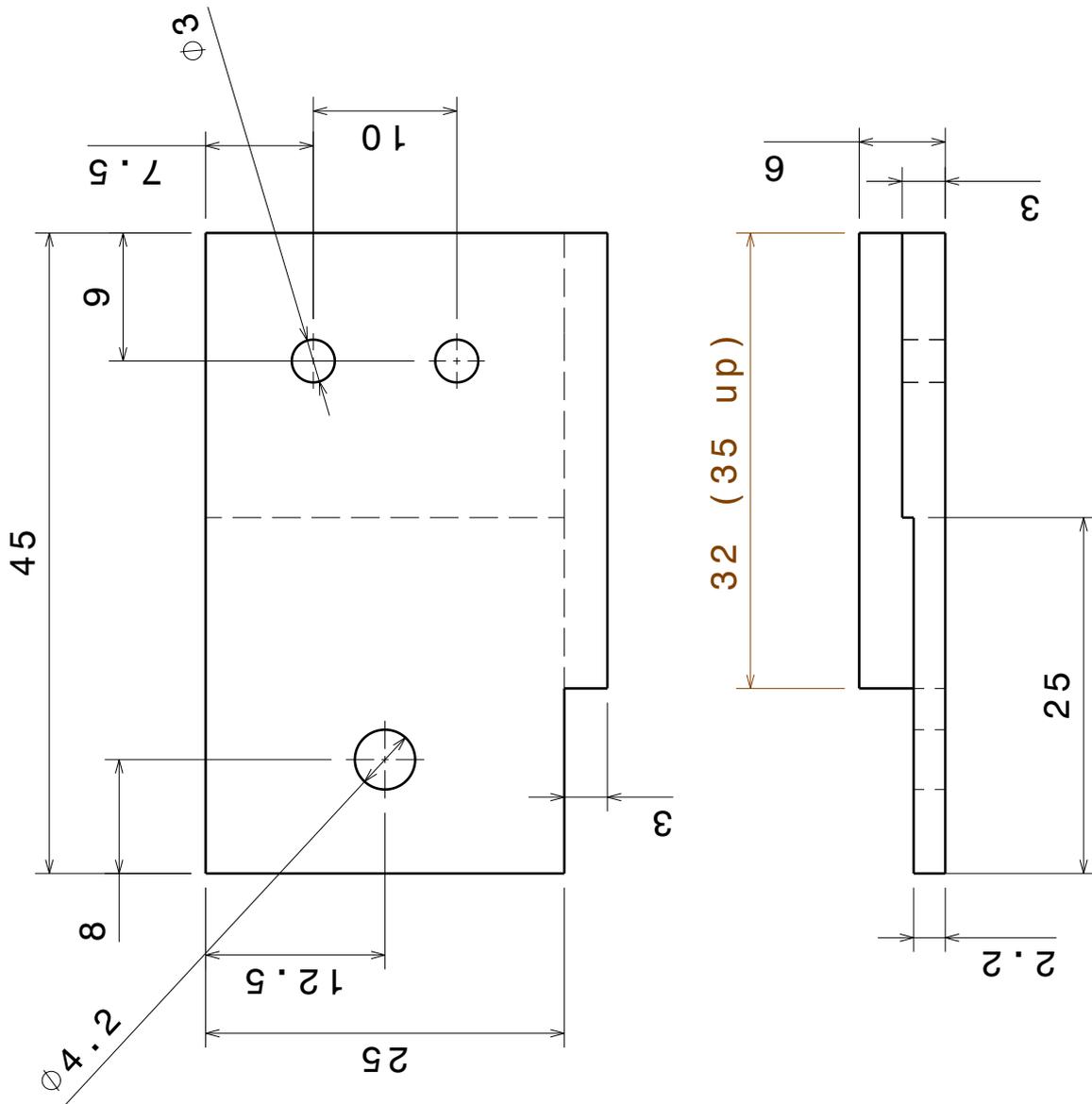
Moschetti Manuele

<p>Scala 2:1</p>	<p>PIASTRA A-F</p> <p>Materiale: Al 7075 Piastra A-F Left: come da disegno (N° pz. 1) Piastra A-F Right: speculare al disegno (N° pz. 1)</p>
	<p>Moschetti Manuele</p>



Vista isometrica
Scala 1:1





Vista isometrica
Scala 1:1

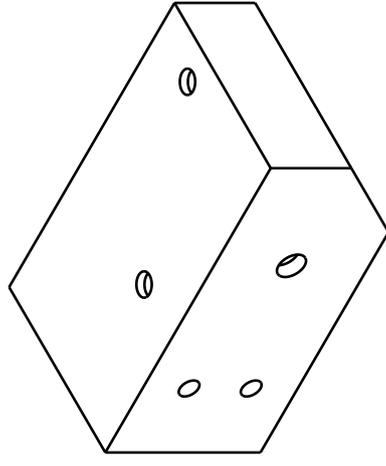
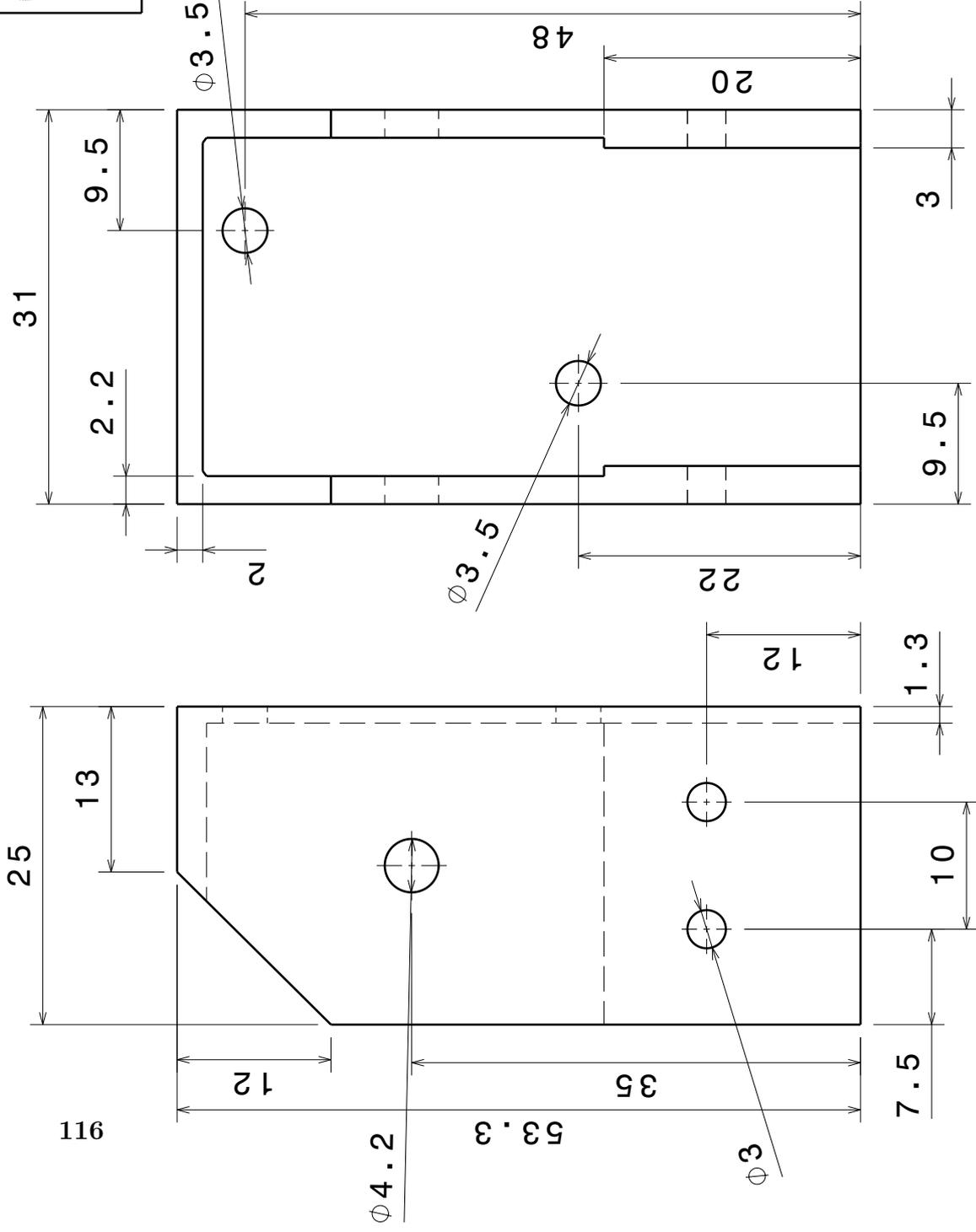
Scala 2:1		PIASTRA C-A
		Materiale: Al 7075 Piastra C-A down: come da disegno Piastra C-A up: spalla 35 mm
		Moschetti Manuale

PLACCA F-T

Scala
2:1

Materiale: Al 7075
N° pz. 1

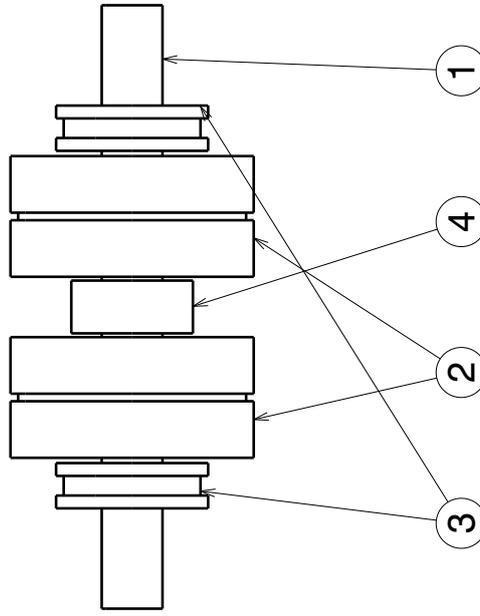
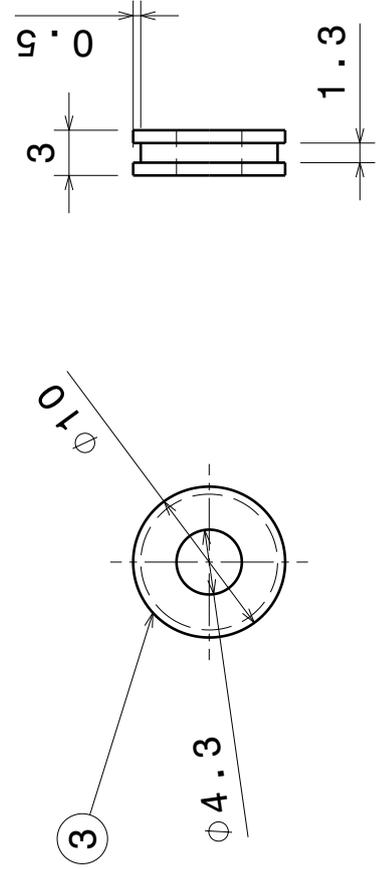
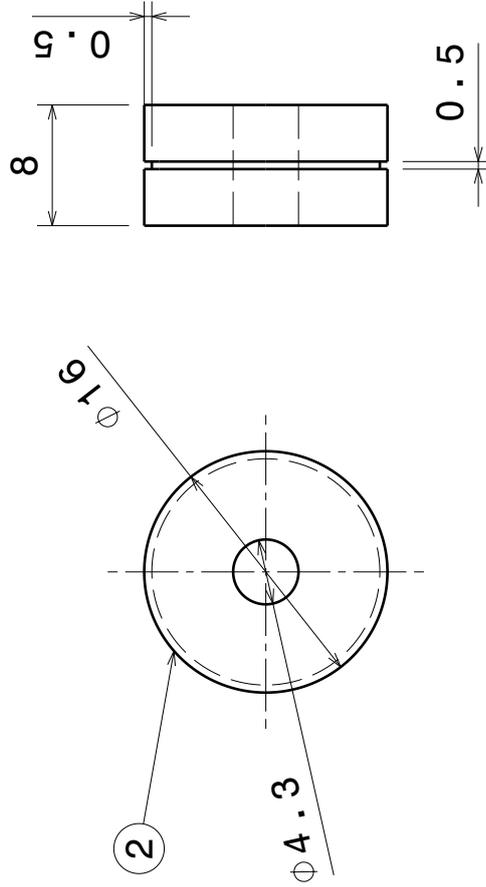
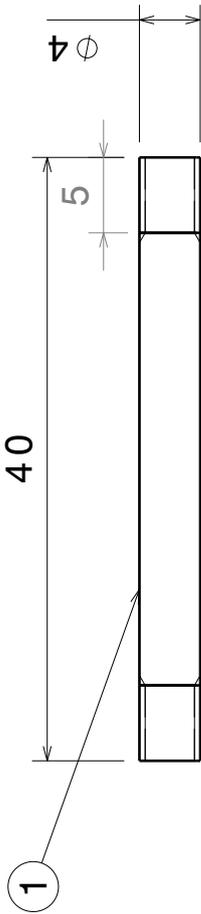
Moschetti Manuele



Vista isometrica
Scala 1:1



Vista isometrica
Scala 1:1



Scala
2:1

CERNIERA (N° pz. 3)

- 1- Perno: Materiale: Acciaio; N°pz.3
- 2- Puleggia: Materiale: Teflon; N°pz.6
- 3- Boccia: Materiale: Teflon; N°pz.6;
- 4- Distanziale: serie di rondelle in acciaio (diam. interno 4.3 mm)



Moschetti Manuale

Bibliografia

- [1] D. Burcu e O. Bülent. «Design and Control of a Shape Memory Alloy Actuator for Flap Type Aerodynamic Surfaces». In: *IFAC* (2011).
- [2] A. Bursi e M. Di Perna. «Controllo di un robot a zampe per esplorazione planetaria con l'utilizzo di reti neurali dinamiche ed algoritmi evolutivi». Tesi di laurea. Politecnico di Milano, 2004.
- [3] C. Cismasiu. *Shape Memory Alloys*. A cura di Sciyo. 2010.
- [4] T. Georges, V. Brailovski e P. Terriault. «Characterization and design of antagonistic shape memory alloy actuators». In: *IOPScience* (2012).
- [5] SAES Getters. *Smartflex Ni-Ti wires and springs*. 2013 (ultima consultazione). URL: <http://www.saesgetters.com>.
- [6] T. Ho e S. Lee. «Design of an SMA-Actuated Jumping Robot». In: *IEEE* (2010).
- [7] W. Huang. «On the selection of shape memory alloys for actuators». In: *Elsevier* (2002).
- [8] S. Jung et al. «Design of Robotic Hand with Tendon-driven Three Fingers». In: *International Conference on Control, Automation and Systems* (2007).
- [9] C.S. Loh, H. Yokoi e T. Arai. «New Shape Memory Alloy Actuator: Design and Application in the Prosthetic Hand». In: *IEEE* (2005).
- [10] M. Massari, G. Sangiovanni e F. Bernelli Zazzera. «N.E.Me.Sys: a planetary legged rover controlled with dynamical artificial neural networks». In: *AutoSoft* (2008).
- [11] P. Massioni. *N.E.Me.Sys, Neural Ento-Mechanic System*. 2013 (ultima consultazione). URL: <http://nemesyspolimi.altervista.org/>.

- [12] P. Massioni e S. Nebuloni. «Progetto e sperimentazione di sistemi di controllo per un prototipo di robot esapode per esplorazione planetaria». Tesi di laurea. Politecnico di Milano, 2004.
- [13] C. Mavroidis. «Development of Advanced Actuators Using Shape Memory Alloys and Electrorheological Fluids». In: *Springer-Verlag* (2002).
- [14] F. Ortalli e A. Spalla. «Decentralized control system for a hexapod robot by using neural networks». Tesi di laurea. Politecnico di Milano, 2010.
- [15] G. Sala et al. *Tecnologie e materiali aerospaziali*. 2012. Cap. 52 - Materiali Intelligenti.
- [16] B. Selden, K. Cho e H. Asada. «Segmented Binary Control of Shape Memory Alloy Actuator Systems Using the Peltier Effect». In: *IEEE* (2004).
- [17] K. Singh, J. Sirohi e I. Chopra. «An Improved Shape Memory Alloy Actuator for Rotor Blade Tracking». In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (2003).
- [18] A.Y.N. Sofla, D.M. Elzey e H.N.G. Wadley. «Two-way Antagonistic Shape Actuation Based on the One-way Shape Memory Effect». In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (2008).
- [19] P. Tenti. «Sviluppo di un attuatore SMA per la movimentazione di un robot esapode per esplorazione planetaria». Tesi di laurea. Politecnico di Milano, 2012.
- [20] M. Thirumaleshwar. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. A cura di Dorling Kindersley. 2006.
- [21] T. Wang et al. «An Accurately Controlled Antagonistic Shape Memory Alloy Actuator with Self-Sensing». In: *Sensors* (2012).
- [22] C. Zanotti, P. Giuliani e A. Chrysanthou. «Martensitic - Austenitic phase transformation of Ni-Ti SMAs: Thermal properties». In: *Elsevier* (2012).