

POLITECNICO DI MILANO
Facoltà di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Spaziale



**SVILUPPO DI UN ATTUATORE SMA PER LA
MOVIMENTAZIONE DI UN ROBOT ESAPODE PER
ESPLORAZIONE PLANETARIA**

Relatore : Prof. Giuseppe SALA
Correlatori : Ing. Paolo BETTINI
Dott.ssa. Elena VILLA

Tesi di laurea di :

Patrizia TENTI Matr: 735671

Anno Accademico 2011-2012

Indice

Sommario	11
Abstract	13
Introduzione	15
1 Stato dell'arte	17
1.1 L'esplorazione planetaria	17
1.2 I rover	18
1.3 Il sistema di locomozione	20
2 NEMeSys	27
2.1 Il progetto NEMeSys	27
2.2 Scelta del dimostratore: la zampa	28
3 Leghe a memoria di forma: caratterizzazione sperimentale	39
3.1 Richiami teorici	39
3.1.1 Comportamento delle leghe a memoria di forma	39
3.1.2 Memoria di forma ad una via	47
3.2 Caratterizzazione del materiale	50
3.2.1 Analisi DSC	51
3.2.2 Analisi DMA: curve di <i>Strain Recovery</i>	56
3.2.3 Analisi DMA: curve di Stress Strain	62
4 Progettazione del sistema di attuazione	67
4.1 Soluzioni cinematiche proposte	70
4.1.1 Configurazione di vincolo ibrido	77
4.1.2 Configurazione di vincolo variabile	79
4.2 Sistemi di rinvio del filo di Ni Ti	89
4.2.1 Sistema di rinvio per il Femur	89
4.2.2 Sistema di rinvio per la Tibia	92
4.3 Analisi del ritorno nella configurazione iniziale della zampa	95
4.4 Utilizzo di molle per l'attuazione della zampa ed il ritorno	97
5 Realizzazione del dimostratore e validazione sperimentale	101

5.1	Realizzazione della zampa attuata	101
5.1.1	Istallazione del sistema di attuazione	110
5.2	Prova di validazione sperimentale	116
5.2.1	Setup sperimentale.....	116
5.2.2	Esecuzione della prova	118
	Conclusioni e sviluppi futuri	123
	Bibliografia	127

Indice delle Figure

Figura 1.1 : Sojourner	18
Figura 1.2 : Spirit e Opportunity	19
Figura 1.3 : Curiosity	19
Figura 1.4 : Urbie	22
Figura 1.5 : Carausius Morosus	23
Figura 1.6 : Schema movimento zampa.....	23
Figura 1.7 Walkie 6.....	24
Figura 1.8 Whegs robot.....	24
Figura 1.9 Genghis	25
Figura 1.10 Sprawl robot.....	25
Figura 1.12 Scorpion.....	26
Figura 1.13 Attila	26
Figura 2.1 : NEMeSys.....	27
Figura 2.2 : Geometria della zampa	29
Figura 2.3 : Schema camminata ed appoggio	29
Figura 2.4 : Parametri geometrici del passo.....	30
Figura 2.5 : Misure zampa NEMeSys	32
Figura 2.6 : Vista laterale della zampa NEMeSys	33
Figura 2.7 : Vista dall'alto della zampa NEMeSys	33
Figura 2.8 : Particolare sulla disposizione dei motori.....	35
Figura 2.9 : Particolare del motore montato su FT	36
Figura 3.1 : Differenza comportamento leghe a memoria di forma (b) e leghe metalliche (a).....	40
Figura 3.2 : (a) Struttura cubica a corpo centrato B2 (b) Struttura monoclina B19' (c) Struttura romboedrica	42
Figura 3.3 : Trasformazioni possibili tra le varie fasi delle leghe a memoria di forma	42
Figura 3.4 : Orientazione ideale del reticolo durante la trasformazione martensitica	43
Figura 3.5 : Orientazione reale del reticolo cristallino durante la trasformazione martensitica secondo il processo (a)slip o (b) twinning.....	43
Figura 3.6 : Trasformazione martensitica diretta ed inversa e conseguente aumento/diminuzione della frazione martensitica	45
Figura 3.7 : Diagramma di trasformazione di fase : cicli termici a sforzo costante	46
Figura 3.8 : Comportamento macroscopico materiale ad una via.....	47
Figura 3.9 : Diagramma sforzo, deformazione, temperatura	47
Figura 3.10 : Diagramma comportamento materiale ad una via in funzione di sforzo - deformazione - temperatura	48

Figura 3.11 : Diagrammi esempi di recupero totale della deformazioni per leghe a memoria di forma ad una via	49
Figura 3.12 : Forme in cui si può presentare il NiTi (a) Fili (b) Nastri (c) Tubi	50
Figura 3.13 : Analisi DSC sul filo di NiTi Diametro 0.200 mm	52
Figura 3.14 : Rilevamento temperature caratteristiche della fase romboedrica rilevate su analisi DSC effettuata	53
Figura 3.15 : Rilevamento temperature caratteristiche della fase martensite rilevate su analisi DSC effettuata	54
Figura 3.16 : Rilevamento temperature caratteristiche della fase austenite rilevate su analisi DSC effettuata	55
Figura 3.17 : Rilevamento temperature picco della varie fasi rilevate su analisi DSC effettuata	56
Figura 3.18 : Analisi DMA sul filo di NiTi Diametro 0.200 mm.....	58
Figura 3.19 : Andamento del recupero percentuale in funzione del carico applicato.....	59
Figura 3.20 : Variazione della temperatura A_F in funzione dello sforzo applicato	61
Figura 3.21 : Variazione della temperatura M_S in funzione dello sforzo applicato	61
Figura 3.22 : Analisi DMA per verificare la pseudo - elasticità.....	65
Figura 4.1 : Dimensioni sezione tubolare	70
Figura 4.2 : Schema utilizzato per lo studio preliminare della cinematica.....	71
Figura 4.3 : Andamento del valore di elevazione in funzione di attuazione multipla degli angoli α e β	74
Figura 4.4 : Schema di posizionamento supporti.....	75
Figura 4.5 : Esempio di movimentazione	76
Figura 4.6 : Andamento dell'angolo β_{finale} in funzione del punto di attacco sul supporto	78
Figura 4.7 : Andamento dell'angolo α_{finale} in funzione del punto di attacco sul supporto	79
Figura 4.8 : Studio dell'andamento dell'angolo β_{finale} in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Femur	80
Figura 4.9 : Studio dell'andamento dell'angolo α_{finale} in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Tibia	85
Figura 4.10 : Miglioramento del valore dell'angolo β_{finale} in funzione dell'accrescimento della lunghezza del filo in NiTi.....	90
Figura 4.11 : Avvolgimento filo sulle carrucole di rimando	91
Figura 4.12 : Miglioramento del valore dell'angolo α_{finale} in funzione dell'accrescimento della lunghezza del filo in NiTi.....	93
Figura 4.13 : Analisi DMA ciclica nella condizione di carico 50 MPa.....	97
Figura 4.14 : Schematizzazione possibile sistema di ritorno.....	98
Figura 4.15 : Unione molla in lega a memoria di forma e molla di ritorno.....	99
Figura 5.1 : Corpo Femur	102

Figura 5.2 : Corpo Tibia.....	102
Figura 5.3 : Piede	103
Figura 5.4 : Assemblaggio Zampa	103
Figura 5.5 : Cilindro doppio rimando	104
Figura 5.6 : Cilindro singolo rimando.....	104
Figura 5.7 : Struttura completa.....	105
Figura 5.8 : Struttura completa vista dall'alto	106
Figura 5.9 : Accorgimenti sugli attacchi	107
Figura 5.10 : Configurazione iniziale – Verifica dei blocchi.....	108
Figura 5.11 : Blocchi.....	108
Figura 5.12 : Configurazione finale - Verifica blocchi.....	109
Figura 5.13 : Particolare del blocco (c).....	110
Figura 5.14 : Sistema di crimpaggio	111
Figura 5.15 : Crimpaggio filo all'estremità inferiore	111
Figura 5.16 : Crimpaggio filo all'estremità superiore.....	112
Figura 5.17 : Percorso del filo all'interno della Tibia.....	112
Figura 5.18 : Percorso del filo all'altezza del ginocchio	113
Figura 5.19 : Percorso del filo lungo il corpo Femur – Vista dall'alto	113
Figura 5.20 : Percorso del filo all'uscita del corpo Femur.....	114
Figura 5.21 : Alimentatore utilizzato - GW-INSTEK SPS-3610.....	115
Figura 5.22 : Set up sperimentale.....	115
Figura 6.1 : Set up sperimentale.....	117
Figura 6.2 : Rilevamento posizione iniziale.....	117
Figura 6.3 : Configurazione intermedia per $\alpha=\alpha_{\text{finale}}$ teorico.....	119
Figura 6.4 : Configurazione finale	120

Indice delle Tabelle

Tabella 1.1 : Riassunto caratteristiche varie configurazioni.....	21
Tabella 2.1 : GA Parameters for the static swing net training.....	31
Tabella 2.2 : GA Parameters for the dynamic swing net training	31
Tabella 2.3 : Configurazione degli angoli nella posizione zero di riferimento ..	34
Tabella 2.4 : Pesi delle principali parti di NEMeSys.....	35
Tabella 2.5 : Caratteristiche dei motori montati su NEMeSys	36
Tabella 2.6 : Comparazione delle masse delle diverse versioni di NEMeSys....	36
Tabella 3.1 : Recupero percentuale della deformazione in funzione del carico applicato.....	60
Tabella 3.2 : Andamento delle temperature A_F e M_S in funzione del carico applicato.....	60
Tabella 4.1 : Valori di elevazione attualmente realizzabili su NEMeSys	71
Tabella 4.2 : Variazione degli angoli α e β nel caso di attuazione singola.....	72
Tabella 4.3 : Variazione degli angoli α e β nel caso di attuazione multipla.....	73
Tabella 4.4 : Valori di elevazione realizzabili con l'attuazione di entrambi gli angoli α e β	74
Tabella 4.5 : Valori andamento dell'angolo β_{finale} in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Femur. $\beta:[19^\circ-71^\circ]$	81
Tabella 4.6 : Valori andamento dell'angolo β_{finale} in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Femur. $\beta:[71^\circ-74^\circ]$	82
Tabella 4.7 : Valori andamento lunghezza di filo in NiTi necessaria in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Femur. $\beta:[19^\circ-71^\circ]$.	84
Tabella 4.8 : Valori andamento lunghezza di filo in NiTi necessaria in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Femur. $\beta:[71^\circ-74^\circ]$.	85
Tabella 4.9 : Valori andamento dell'angolo α_{finale} in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Tibia. $\alpha:[147^\circ-103^\circ]$	87
Tabella 4.10 . Valori andame dell'elevazione H nel caso di attuazione multipla . Considerazioni sull'angolo β in funzione di α	88
Tabella 4.11 : Valori andamento lunghezza di filo in NiTi necessaria in funzione della variazione del punto di attacco lungo Tibia ed attacco al supporto a 8mm.. $\alpha:[147^\circ-121^\circ]$	88
Tabella 4.12 : Scelta valore punto di fissaggio lungo il supporto	90
Tabella 4.13: Valori andamento lunghezza di filo in NiTi necessaria in funzione di β_{finale} nel caso di rimandi. $\beta:[53^\circ-3^\circ]$	92
Tabella 4.14 : Lunghezza di filo in NiTi necessaria nel caso di utilizzo di 3 5 rimandi.....	95
Tabella 4.15 : Pesi dei componenti della zampa.....	96
Tabella 5.1 : Proprietà meccaniche Al 6061-0	101
Tabella 6.1 : Configurazione finale – Valori TEORICI	118

Tabella 6.2 : Configurazione finale – Comparazione valori TEORICI e PRATICI120

Sommario

Questo lavoro di tesi si propone di essere l'avvio di un percorso che comporterà l'evoluzione nell'attuazione dei rover per esplorazione planetaria se non addirittura della morfologia stessa attraverso l'utilizzo degli SMA.

Partendo da ciò che attualmente rappresenta lo stato dell'arte nei rover, ovvero, robot zoomorfi in cui il sistema di locomozione è attuato attraverso motori elettrici, si volge lo sguardo ad un futuro in cui è possibile l'impiego di attuatori a memoria di forma.

Nel particolare viene modificata l'attuazione di una delle zampe del rover zoomorfo preesistente NEMeSys (Neural Ento-Mechanic System) e progettato un dimostratore tecnologico che confermi l'effettiva valenza dell'impiego degli SMA per questa applicazione.

Dopo una prima parte teorica e di ricerca si passa all'attuazione in laboratorio con l'impiego di leghe a memoria di forma ottenendo dei risultati che, oltre a confermare le idee iniziali, danno ottime speranze per un'evoluzione futura.

Parole chiave : fili in NiTi , leghe a memoria di forma, rover zoomorfi

Abstract

This thesis aims to be the beginning of a process that will see the evaluation in the implementation of a rover for planetary exploration and even the morphology of the rover itself through the use SMA.

Then, we refer to that which is currently the innovation, specifically, to legged robots in which the system of locomotion is effected by means of electric motors by looking to a future in which there might be the use of a shape memory alloy actuators.

One of the legs of the existing legged robot NEMeSys (Neural Ento-Mechanic System) is changed and, instead of it, smart materials technology is used. A prototype is set up to confirm the real value of the use of SMA for this application.

After a first part of theoretical research, is passed to the implementation in the laboratory with the use of shape memory alloys to obtain the results that, in addition to confirm the initial ideas, give excellent hopes for future evolution.

Keywords : NiTi wire , shape memory alloy, legged rover,

Introduzione

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di illustrare i vantaggi che si hanno attraverso l'utilizzo delle leghe a memoria di forma nell'attuazione di un rover per esplorazione planetaria.

Questa tecnologia risulta, oltre che innovativa, vantaggiosa per una serie di motivi. E' possibile avere un sistema più semplice, leggero e meno dispendioso dal punto di vista energetico.

L'utilizzo delle leghe a memoria di forma in sostituzione totale o parziale dei motori elettrici, porta all'eliminazione di tutti i problemi derivanti dalla componentistica meccanica come ad esempio la presenza di polvere. Si riscontra una migliore resistenza alla corrosione, alla fatica e lo sviluppo di forze nella fase di recupero adeguate all'applicazione.

Per dimostrare l'efficienza degli attuatori in lega a memoria di forma, si realizza un dimostratore tecnologico su cui vengono effettuate le prove di validazione nelle condizioni ambientali terrestri.

Nello specifico si decide di realizzare il dimostratore riferendosi al sistema di locomozione del progetto di ricerca NEMeSys (Neural Ento-Mechanic System), attualmente in corso presso il Dipartimento Di Ingegneria Aerospaziale e riguardante la realizzazione, l'attuazione e il controllo di un robot per l'esplorazione planetaria.

La prima parte del lavoro consiste nello studio del progetto NEMeSys, delle sue peculiarità e dei miglioramenti attuabili, seguito dall'analisi del materiale scelto per l'attuazione ovvero fili di Nickel Titanio Smartflex.

Nella seconda parte si studia il movimento da attuare svolgendo un'analisi di fattibilità delle soluzioni considerate. Si parte da un cinematismo piuttosto semplice complicando poi il sistema introducendo delle carrucole di rimando al fine di aumentare l'efficienza dell'applicazione.

Segue l'intera realizzazione della zampa, dai disegni sviluppati con l'ausilio del programma di modellazione CATIA V5 al successivo sviluppo in officina, illustrando gli eventuali accorgimenti presi a fronte delle varie difficoltà incontrate nella realizzazione o nella attività sperimentale.

Viene poi discussa la validazione attraverso prove di attivazione del filo montato sul dimostratore in sede di laboratorio attraverso un alimentatore in corrente continua.

Il lavoro di tesi si conclude con le opportune osservazioni sui risultati finali, proponendo un ventaglio di soluzioni per migliorare il risultato ottenuto e suggerendo inoltre una serie di sviluppi futuri.

1 Stato dell'arte

1.1 L'esplorazione planetaria

La messa in orbita nel 1957 del primo satellite artificiale Sputnik intorno alla terra segna l'inizio della conquista dello spazio da parte dell'uomo.

Gran parte delle missioni realizzate si rivolgono all'esplorazione interplanetaria ed una delle prima è il programma Voyager iniziato nel 1977 con Voyager 1 e Voyager 2, due sonde volte inizialmente all'osservazione di Giove e Saturno e che hanno poi continuato la loro operatività raggiungendo Urano e Nettuno e tutt'ora si trovano all'altezza dell'eliosfera. Oltre a queste, la più recente missione Cassini-Huygens destinata allo studio di Saturno e del più grande dei suoi satelliti Titano, ci hanno dato e continuano a darci un contributo enorme per quanto riguarda la conoscenza dello spazio.

In seguito la conquista dello spazio ha portato a quella che viene identificata come esplorazione planetaria a fianco di una campagna di missioni interplanetarie ne abbiamo una serie il cui interesse è lo studio del pianeta.

Per esplorazione planetaria si intende infatti l'insieme di azioni volte al raccoglimento della maggior quantità di informazioni riguardanti la situazione chimica e fisica del pianeta che stiamo esplorando, come per esempio la composizione del terreno e dell'aria piuttosto che della presenza di ghiaccio o microfossili sulla superficie.

Momentaneamente l'esplorazione planetaria si concentra sull'esplorazione della Luna e di Marte, purtroppo con un alto quantitativo di fallimenti (due terzi delle missioni volte all'esplorazione di Marte non sono arrivate a conclusione). Un ruolo fondamentale in questo tipo di esplorazione la svolge il rover, che altro non è che una sonda automatica semimovente alimentata a batterie, con l'aiuto del lander, ovvero un modulo per la discesa sulla superficie dei pianeti che effettua sia l'analisi del suolo che degli strati dell'atmosfera più bassi oltre a riprendere alcune immagini e con la possibilità di affiancare il rover per quanto riguarda il collegamento con la base terrestre..

1.2 I rover

Esplorare i pianeti significa esplorare un ambiente, oltre che sconosciuto, tutt'altro che facile, in cui le condizioni del terreno e dell'atmosfera presente sono generalmente sfavorevoli all'esplorazione stessa. Per questo motivo è necessario implementare sistemi innovativi che possano portare a termine la missione in maniera sicura e, soprattutto, indipendente.

Proprio l'indipendenza del rover fu uno dei primi problemi per cui si dovette trovare una soluzione essendo dispendioso e poco produttivo mantenere un controllo remoto del rover attraverso il lander con il risultato di poter esplorare aree limitate nell'intorno del punto di atterraggio.

La prima missione andata a buon fine fu la missione Mars Pathfinder della NASA del 1996 in cui venne lanciato il rover Sojourner che ha funzionato perfettamente. L'obiettivo era quello di atterrare su Marte e esplorare e fotografare una zona prestabilita. La scelta del percorso era affidata agli operatori di terra che impostavano una traiettoria attraverso una serie di punti guida che segnavano i nodi di una spezzata. L'unico scopo del Sojourner era quello di partire dal punto di partenza e giungere al punto finale superando autonomamente eventuali ostacoli individuati tramite sensori laser ed acquisizione di immagini ma dovendo necessariamente rimanere entro un certo raggio dal lander che, oltre a svolgere il ruolo di antenna, acquisiva delle immagini dell'ambiente circostante e dava una ricostruzione tridimensionale dell'intorno.



Figura 1.1 : Sojourner

Naturale evoluzione del Sojourner fu il rover Rocky 7 in grado di allontanarsi maggiormente dal lander che in questo caso svolgeva solo il ruolo d'antenna.

Il salto evolutivo avvenne però con la missione MER (Mars Exploration Rover) del 2003 in cui venne lanciata la coppia di rover simili composta da Spirit ed Opportunity ancora operativi.



Figura 1.2 : Spirit e Opportunity

Questi due rover esplorano il pianeta scattando una quantità ragguardevole di foto ed analizzando il pianeta in maniera del tutto autonoma in quanto non necessitano della vicinanza del rover potendo loro stessi comunicare con la stazione di terra.

Nel novembre 2011 venne infine lanciato con successo, e con la speranza che non sia un ennesimo fallimento e possa portare a termine la missione, il Mars Science Laboratory (MSL) nominato Curiosity. Questo rover venne progettato sulla base dei due rover precedenti della missione MER e porta con se una serie di strumenti scientifici più avanzata rispetto alle ultime missioni riguardanti Marte allo scopo di analizzare campioni di terreno e roccia investigando sulla capacità di questo pianeta di sostenere la vita.



Figura 1.3 : Curiosity

1.3 Il sistema di locomozione

Il rover durante la missione si trova ad affrontare vari problemi tra cui il quello energetico, ovvero, il fatto che l'energia che può essere immagazzinata è limitata e che l'efficienza dei pannelli solari decresce a causa della presenza delle polveri ed il problema dell'accessibilità da terra che non permette di controllare con facilità il rover quando si trova sul pianeta per cui è preferibile utilizzare un sistema di controllo passivo; il problema di cui ci si occupa riguarderà prevalentemente l'aspetto locomotivo dovendo il veicolo essere in grado di muoversi su un terreno a tratti sabbioso ed a tratti roccioso e superando o circumnavigando, una volta individuati, i vari ostacoli che incontra

A livello di sistema di locomozione è necessario che il rover sopperisca alla necessità di muoversi in maniera indipendente e sicura nonostante la morfologia del terreno oltre a soddisfare alcuni requisiti quali:

- il mantenimento della stabilità
- la manovrabilità
- la robustezza meccanica
- sostegno del payload

La tecnologia attuale permette di avere movimentazione attraverso

- ruote
- cingoli
- zampe
- soluzioni ibride

Le varie soluzioni, esistenti e future, non sono da vedersi come tra loro in competizione, anzi, forniscono un ventaglio di opzioni tra le quali scegliere a seconda della missione che si vuole portare a termine potendo fronteggiare qualsiasi tipo di asperità.

Ecco perchè negli anni si è stati testimoni di un'evoluzione dai cingoli alle ruote fino ad arrivare alla progettazione di rover zoomorfi ed all'impiego di nuove tecnologie come gli SMA senza dimenticare i requisiti fondamentali tra cui l'efficienza.

Le configurazioni utilizzate fino ad ora per l'esplorazione di Marte utilizzano un sistema di locomozione attraverso ruote essendo questo tipo di tecnologia quello che dà la sicurezza maggiore di essere in grado di affrontare il suolo marziano.

E' un sistema di locomozione semplice che da buoni risultati in termini di indipendenza ed efficienza. Ad esempio, l'utilizzo di ruote permette il superamento di ostacoli di varie dimensioni e conformazione fino a pendenze del 40%.

Le caratteristiche delle ruote sono le variabili su cui si lavora per ottenere un buon sistema di locomozione. Si ottimizza in base alla missione:

- la dimensione delle ruote
- la tipologia delle ruote (gradi di libertà e tipologia del pneumatico)
- la configurazione delle ruote (numero e posizionamento)

Questi accorgimenti permettono di seguire la traiettoria obiettivo senza incorrere in situazioni critiche che possono arrivare fino al bloccaggio del robot ed al conseguente fallimento della missione.

La grandezza delle ruote, ad esempio, permette di superare ostacoli più o meno grandi anche se presuppone una maggiore coppia o l'impiego di marce ridotte. Il numero di ruote utilizzate influisce sulla stabilità del rover.

Inoltre le caratteristiche del sistema locomotivo possono essere migliorate utilizzando eventuali sospensioni.

Di seguito viene presentata una tabella riassuntiva delle varie configurazioni esistenti e dei loro vantaggi e svantaggi.

	<i>Fixed wheels</i>		<i>Steering wheels</i>			
	<i>Skid steering</i>	<i>Articulated chassis</i>	<i>Axle articulated</i>	<i>Ackerman type</i>	<i>Independent explicit</i>	<i>Corner wheels rotation</i>
<i>Manoeuvrability</i>	High	Medium	Medium	Medium	Med/High	Medium
<i>Mechanical complexity</i>	Low	Low	Low	Med/High	Med	Low
<i>Control complexity</i>	Low	Medium	Med/High	Med/Low	Low	Low/Med
<i>Drive power required</i>	High	Medium	Low	Med/Low	Medium	Medium
<i>Number of actuated joints</i>	0	1	0	1	4	4

Tabella 1.1 : Riassunto caratteristiche varie configurazioni

Finora la configurazione a ruote è quella più utilizzata e l'unica che sia stata utilizzata in una missione portata a compimento.

L'utilizzo della configurazione utilizzante cingoli dà una distribuzione del peso del veicolo su un'area maggiore impedendo al veicolo di affondare nel terreno. Si possono realizzare sistemi singoli o multipli ed hanno il vantaggio di essere una tecnologia conosciuta e di semplice realizzazione e controllo. Hanno elevata capacità di trazione e permettono il trasporto di grossi payload. Svantaggio è l'inefficienza dovuta all'attrito, lo slittamento durante la rotazione ed il fatto che i cingoli non si adattano al terreno.

Non è una soluzione utilizzata perché i vantaggi ottenuti non sono comparabili con le difficoltà che apporterebbero se implementati su un rover per esplorazione planetaria delle dimensioni necessarie ed operante su un terreno pieno di asperità.

Un esempio di robot avente questa tecnologia è il rover Urbie mostrato in figura



Figura 1.4 : Urbie

Innovativi e derivanti dall'imitazione del mondo animale sono i rover zoomorfi. Sono stati fatti vari studi come ad esempio sull'insetto *Carausius Morosus* rappresentato in figura:



Figura 1.5 : *Carausius Morosus*

Nascono dei rover esapodi i cui vantaggi principale sono l'enorme incremento di mobilità ottenibile specialmente su un terreno accidentato seguito dall'incremento di sensibilità rispetto alle altre tecnologie. Attraverso dei sensori è possibile individuare gli ostacoli e, grazie al movimento sinusoidale della zampa, superarli facilmente.

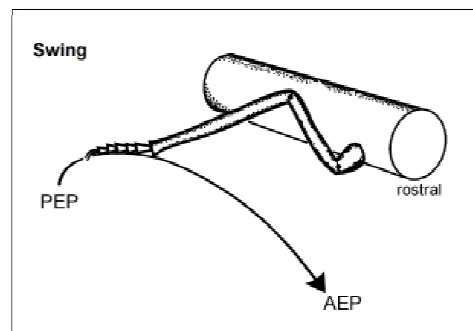


Figura 1.6 : Schema movimento zampa

Non vi è possibilità di slittamento poiché il contatto con il terreno avviene su una piccola superficie per cui questa configurazione si adatta a qualsiasi morfologia di terreno ed elimina quasi completamente la resistenza creatasi durante il movimento tra terreno e veicolo. Inoltre il rover stesso ed il payload sono isolati dal suolo.

Gli svantaggi di questo sistema riguardano le complessità di realizzazione e di controllo. La stabilità statica e dinamica deve essere studiata nei minimi particolari potendo avere movimentazione contemporanea di più arti. Per assicurare stabilità è possibile attuare fino a 3 arti nello stesso momento mettendo così in gioco più gradi di libertà. Inoltre la velocità di movimento delle zampe è limitata a causa della loro interazione col veicolo per cui gli spostamenti richiedono tempi maggiori e si hanno difficoltà di rotazione sul proprio asse.

Nessuno di questi svantaggi è però sufficientemente grande da oscurare i vantaggi di questo sistema di locomozione.

La differenziazione di questo gruppo di rover viene fatta in base al numero di gradi di libertà e si entra nel campo della sperimentazione robotica indipendentemente alla realizzazione di rover con unico scopo l'esplorazione planetaria.

Come esempio robot ad un unico grado di libertà sono rappresentati nelle figure 7 e 8.

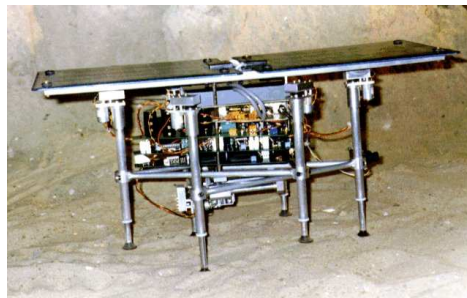


Figura 1.7 Walkie 6



Figura 1.8 Whegs robot

Robot a due gradi di libertà sono ad esempio Genghis studiato dalla stessa NASA e il robot Sprawl.



Figura 1.9 Genghis

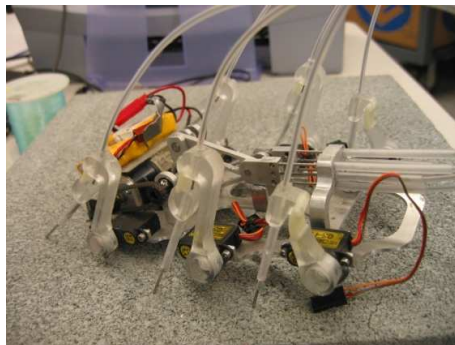


Figura 1.10 Sprawl robot

La parte che interessa di più per questo lavoro di tesi riguarda però i rover zoomorfi aventi tre o più gradi di libertà

Esempi di questo tipo di rover sono Scorpion e Attila.

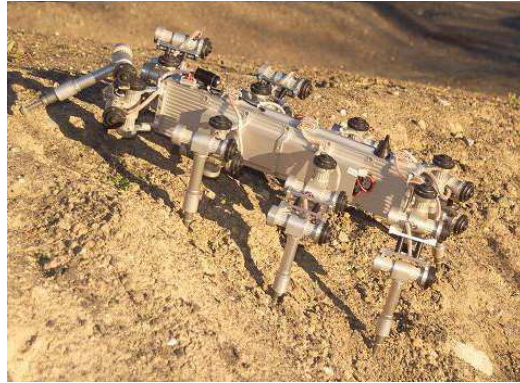


Figura 1.11 Scorpion



Figura 1.12 Attila

Di questo gruppo di robot fa parte il prototipo realizzato presso il Politecnico di Milano da cui ha inizio lo studio effettuato in questo lavoro di tesi riguardante l'attuazione della zampa per la sostituzione dei motori elettrici con leghe a memoria di forma.

2 NEMeSys

2.1 Il progetto NEMeSys

Come accennato alla fine del primo capitolo questo lavoro di tesi si innesta in un progetto di ricerca in corso presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale riguardante la realizzazione, l'attuazione ed il controllo di un robot per esplorazione planetaria: il progetto NEMeSys (Neural Ento-Mechanic System).

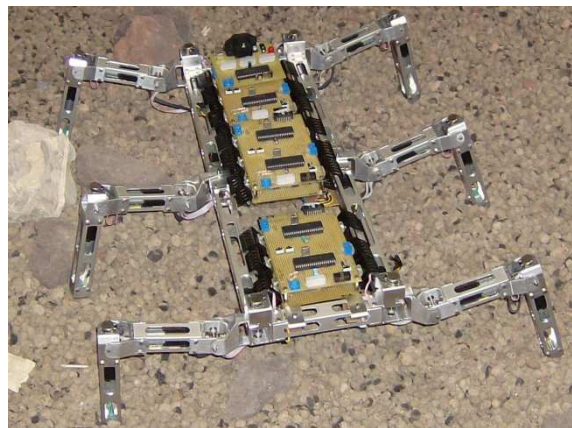


Figura 2.1 : NEMeSys

La figura 2.1 illustra la versione attuale del rover, risultato di più lavori di tesi. In tale versione sono state apportate molteplici migliorie tecnologiche che hanno anche alleggerito la struttura rispetto ai primi prototipi.

Il progetto NEMeSys si occupa di studiare il sistema di locomozione sia a livello propriamente meccanico che a livello di controllo e si rifà a studi affrontati sul sistema di locomozione degli insetti classificati come esapodi. Il riferimento principale è il Dr. Holk Cruse che si è occupato di studiare in tutte le sue peculiarità la camminata degli insetti e specialmente dell'insetto stecco già nominato *Carasius Morosus*.

In effetti il problema più grande da affrontare su un progetto di questo genere è la camminata, in particolare lo studio e la realizzazione di un cinematismo che consenta un movimento efficiente e fluido garantendo nel contempo stabilità per tutta la durata della movimentazione. Di non secondaria importanza sono poi i

requisiti riguardanti la necessità di operare in ogni condizione dell'ambiente esterno e quella di creare un rover che sia completamente autonomo. Infine, il sistema di controllo che vuole essere integrato deve essere il più semplice possibile in grado di rendere il robot abile.

Da questo punto di vista si è pertanto deciso di creare un sistema di controllo decentralizzato formato da un numero distinto di moduli ognuno dei quali si occupa di una specifica funzione. Attraverso questo espediente risulta possibile studiare una serie di facili configurazioni avendo come risultato un modello sufficientemente complicato.

2.2 Scelta del dimostratore: la zampa

La parte che interessa maggiormente il lavoro di progettazione, e da cui si è partiti per lo sviluppo del dimostratore tecnologico finale, è quella che riguarda costruzione ed attuazione del singolo arto e, di conseguenza, le migliorie attuabili tanto quanto le migliorie attuate in passato.

Essendo questo rover di tipo zoomorfo, esso appartiene alla classe di robot per esplorazione spaziale sviluppata a valle di uno studio approfondito sul sistema di locomozione di alcuni insetti sfruttando tutti i pregi di un sistema di locomozione che in natura funziona perfettamente. Ciò consente in linea di principio di ottenere elevati risultati in termini di agilità, stabilità e sicurezza uniti ad una libertà di movimento più ampia rispetto ad altre tecnologie quali robot muniti di cingoli o ruote.

Nello specifico NEMeSys è composto da 6 arti ognuno dei quali posto in una determinata posizione del corpo e costituito da 3 segmenti mobili:

1.Coxa

2.Femur o Trochanter

3.Tibia

Ogni singola parte si muove secondo due gradi di libertà (alzata della stessa ed avanzamento) ad eccezione della 'coxa' che può essere considerata praticamente ferma.

Di seguito viene presentato uno schema della conformazione della zampa e degli angoli rispetto ai quali viene effettuata la rotazione e conseguentemente movimento.

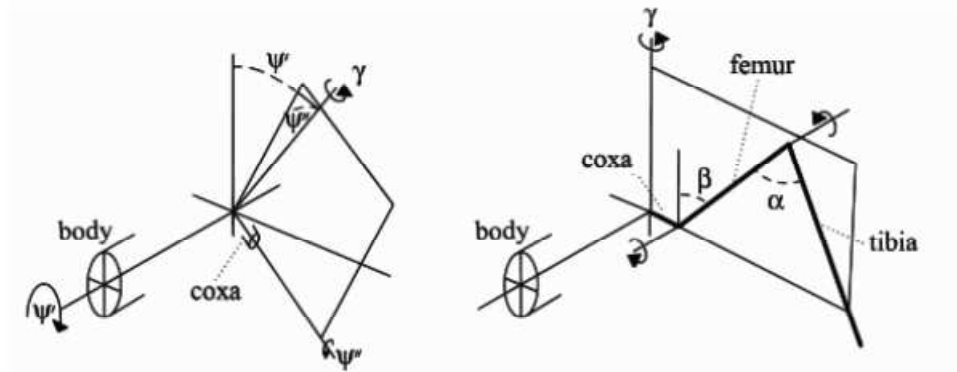


Figura 2.2 : Geometria della zampa

Nella figura si possono notare i punti di unione, articolazioni, in cui si ha la rotazione rispetto ai 3 angoli γ , β , α e queste vengono identificate come BC(γ) (Body-Coxa), CT(β) (Coxa-Trochanter), FT(α) (Femur-Tibia)

Considerando accettabile l'ipotesi di ritenere la parte Coxa praticamente ferma si può ridurre lo schema alla sola unione di Tibia e Femore ed ai rispettivi gradi di libertà che sono gli angoli di rotazione α e β e l'angolo di rotazione ψ che ci permette l'avanzamento dell'arto.

Il movimento sinusoidale che si rifà alla camminata degli insetti viene schematizzato di seguito

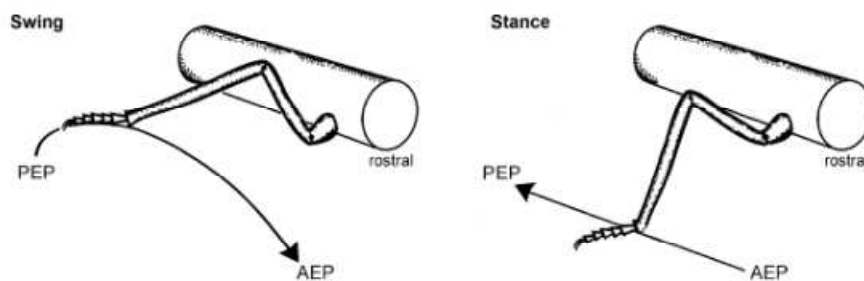


Figura 2.3 : Schema camminata ed appoggio

Nello schema si nota la presenza, e quindi la necessità di esserne a conoscenza, di più parametri quali AEP e PEP che rappresentano il punto di partenza e di arrivo, oltre ai punti di altezza massima (SEP), di altezza minima e lo zero che determinano l'elevazione o ampiezza della sinusoide meglio vista come *swing height*.

Quest'ultima è rappresentata nella figura seguente:

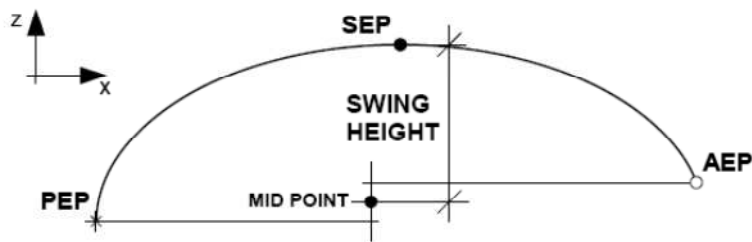


Figura 2.4 : Parametri geometrici del passo

AEP : Anterior Extreme Position

SEP: Superior Extreme Position

PEP: Posterior Extreme Position

Il SEP, che sarà uno dei parametri più importante nello sviluppo del progetto, viene definito obbligatoriamente maggiore di un certo valore minimo per non avere problemi durante la camminata. A volte questo valore potrebbe essere sovradimensionato ma risulta impossibile stabilire un valore di elevazione con più efficienza se non si è perfettamente a conoscenza del percorso che dovrà effettuare il rover e quindi degli ostacoli che potrebbe incontrare sia in termini di convessità che concavità.

La soluzione ottenuta con l'ultimo progetto NEMeSys permette di superare ostacoli pari a circa il 60% della sua altezza ovvero ottenere un SEP massimo di circa 70 mm e si viene considerato come minimo risultato accettabile un SEP di 30 mm.

Questi risultati cambiano leggermente a seconda che si decida di utilizzare un approccio di tipo statico o dinamico come mostrato nelle tabelle qui di seguito.

N° of variables	7
Population size	500
Generation number	50
Elite count	10
Mutation	Adaptive
Crossover fraction	0.8
Threshold score (ψ)	5
Error level of angles [%]	5
Minimum SEP [mm]	$Z_{AEP}+30$

Tabella 2.1 : GA Parameters for the static swing net training

	BC + CT	FT
N° of variables	18	4
Population size	10000	100
Generation number	50	50
Elite count	40	10
Mutation type	Gaussian	Gaussian
Mutation scale	20	20
Mutation shrink	1	1
Crossover fraction	0.8	0.8
Threshold score (ψ)	5	5
Error level of angles [%]	5	1
Minimum SEP [mm]	$(Z_{PEP}+Z_{AEP})/2+30$	$(Z_{PEP}+Z_{AEP})/2+30$

Tabella 2.2 : GA Parameters for the dynamic swing net training

Per quello che riguarda invece la coordinazione delle zampe e quindi la definizione dei punti AEP e SEP vengono date le seguenti relazioni ottenute attraverso il modello di Cruse H.

$$x_{AEP} = x_{ant} - \Delta_{AEP}$$

$$y_{AEP} = y_{ant}$$

$$z_{AEP} = z_{ant}$$

Nel progetto NEMeSys questo modello viene utilizzato riferendosi unicamente alla movimentazione lungo la variabile x.

Come accennato questo schema è identico per ognuno dei 6 arti e viene controllato attraverso un sistema che tiene conto del fatto che per avere stabilità è necessario l'appoggio di almeno 3 dei 6 arti e che ci sono varie possibilità in

cui la posizione del singolo arto non sia quella ottimale. Nasce allora il problema di sapere quando e se si ha contatto zampa-terreno oltre al fatto che il movimento di tutti gli arti avviene contemporaneamente e non vi deve essere interferenza fra essi. Per evitare proprio l'interferenza fra gli arti dovuta alla sovrapposizioni di due o più di essi durante la camminata viene imposto un Δ_{AEP} di 60mm.

Altro problema che si pone è che il rover deve essere in grado di affrontare qualsiasi asperità che possa incontrare lungo il suo cammino ed in qualsiasi momento. Nonostante la velocità non sia un requisito fondamentale, anzi la lentezza della camminata può aiutare ad evitare fenomeni di shock sul payload, è di vitale importanza che il robot non interrompa la sua avanzata a causa di problemi esterni portando così al fallimento della missione. Se difficile è riuscire ad ottenere la movimentazione ancora più difficile è uscire da situazioni difficili in cui gli arti sono incastrati tra le rocce oppure affondati nella sabbia.

Al momento su NEMeSys sono installati un potenziometro lineare per essere a conoscenza dello scostamento angolare in atto per controllare il movimento ed un sensore di forza che permette di sapere quando si ha contatto con il suolo.

A questo si aggiunge il fatto che spesso non è possibile raggiungere la posizione ottimale nel momento in cui il rover debba spegnersi per ricaricare le batterie o per preservarsi dalle condizioni climatiche esterne (calo di temperatura durante la fase notturna), per questo motivo sarà costretto a consumare potenza poiché attualmente NEMeSys non è in grado di autosostenersi e vi è un consumo costante di energia anche se l'obiettivo è quello di raggiungere la posizione meno dispendiosa sia in movimento che in standby.

Si mostra di seguito il disegno in scala dell'arto attualmente installato su NEMeSys.

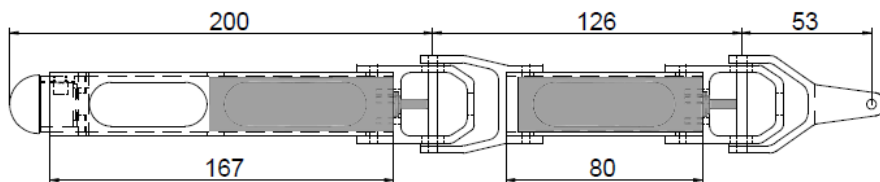


Figura 2.5 : Misure zampa NEMeSys

La zampa è interamente in lega di alluminio Al 6061-0 e composta da due tubolari a sezione quadrata di 26 mm che costituiscono il corpo di femur e tibia e da quattro macchinati rappresentanti le articolazioni oltre all'apposizione di un piedino su ognuno dei quali viene montato il sensori di posizione.



Figura 2.6 : Vista laterale della zampa NEMeSys



Figura 2.7 : Vista dall'alto della zampa NEMeSys

Dal disegno possono essere ricavati due parametri molto importanti che hanno guidato sia la progettazione di NEMeSys in passato, sia il lavoro di tesi qui presentato: la lunghezza di femur e tibia. I valori di tali lunghezze, valutati come

la distanza dai rispettivi centri di rotazione, sono rispettivamente di 126mm e 167 mm.. La coxa ha un'estensione minore di soli 53 mm.

L'arto deve essere progettato tenendo in conto che bisogna evitare eventuali conflitti che potrebbero essere presenti durante la camminata essendo necessario un perfetto movimento. Ciò implica che il corpo del rover debba essere posizionato ad una certa distanza dal terreno e questo dipende dalla lunghezza di femore e tibia e dal valore degli angoli α e β .

In fase di riposo si considera la seguente configurazione

γ	30°
β	80°
α	90°

Tabella 2.3 : Configurazione degli angoli nella posizione zero di riferimento

Per cui la cerniera rappresentante l'anca si troverà ad un'altezza rispetto al terreno approssimativamente di 143 mm.

Viene imposto anche un limite sulla massima coppia applicabile sulle giunture. Il maggiore stress è sopportato dall'articolazione tra coxa e femur e dipende dalla lunghezza della parte femur oltre che dall'angolo β . Minore è la distanza tra la giuntura CT e FT e minore è la coppia che pesa sulla prima giuntura. Per questo la misura di femur viene ridotta il più possibile nei limiti in cui sia comunque garantita la stabilità. Il rover deve avere una struttura sufficientemente robusta volta a sostenere l'intera strumentazione e gli arti devono essere progettati di conseguenza.

Come già accennato, è importante che le zampe siano disposte lungo il corpo del rover in modo tale che, per evitare un contatto tra le stesse durante la camminata, la distanza tra gli estremi liberi non risulti mai inferiore ai 60 mm.

Per quanto riguarda i valori di massa del rover ottenuti si presenta tabella 2.4

Part	Number	CAD weight [g]	Real weight	Error [%]
Coxa	6	28	28	0
Femur	6	264	277	+4.9
Tibia	6	258	257	-0.4
Body	1	1574	1538	-2.3
Boards	4	1050	1030	-1.9
Wires	—	300	210	-30
TOTAL	—	6224	6150	-1.2

Tabella 2.4 : Pesì delle principali parti di NEMeSys

Attualmente NEMeSys monta 18 motori in corrente continua ognuno dei quali tratta un solo grado di libertà. Sono tutti montati all'interno dello scheletro in linea con le cerniere per cercare di guadagnare spazio e per interferire il meno possibile. Attualmente è possibile ottenere una velocità massima dipendente dagli attuatori di 91 deg s^{-1} .



Figura 2.8 : Particolare sulla disposizione dei motori



Figura 2.9 : Particolare del motore montato su FT

Le caratteristiche dei motori installati sono mostrati nella seguente tabella

Producer	Maxon
Product code	A-max 22
Input Voltage [V]	12
Maximum power [W]	6
Maximum continuous torque [mNm]	7.425
Stall torque [mNm]	22
Maximum speed [RPM]	10500
Torque constant [mNm/A]	10.9
Speed constant [RPM/V]	875

Tabella 2.5 : Caratteristiche dei motori montati su NEMeSys

Il progetto di NEMeSys si conclude ottenendo un rover bilanciato e su cui viene fatta un'attenta analisi attraverso vari modelli che tengono conto dell'ambiente circostante, del problema gravitazionale ed affrontano sia la cinematica che la dinamica del sistema.

Il risultato è un robot che rispetto al precedente può vantare:

- Riduzione peso rispetto al precedente di circa il 10%

Model	Year	Weight[g]
Mk I	2005	~7500
Mk II	2008	~8300
Mk III	2010	6150

Tabella 2.6 : Comparazione delle masse delle diverse versioni di NEMeSys

- Riduzione del costo (utilizzati pezzi del vecchio rover)
- Riduzione dimensioni e conseguente aumento dell'agilità
- Accessibilità del robot (importante essendo una piattaforma test)

Dopo aver studiato il progetto NEMeSys allo stato attuale si è concluso che, per quello che riguarda il sistema di locomozione, le migliorie attuabili possibili sono volte a:

- Garantire l'autosostentamento e diminuzione potenza necessaria di utilizzo

Si vorrebbe cercare di sopperire al problema di utilizzo di potenza costante da parte del rover sia in condizione di riposo, specialmente durante la notte, che nel movimento diminuendo così il consumo di energia. Ciò, come spiegato prima, è dovuto al fatto che il robot non è in grado di autosostenersi e, se non alimentato, si accascia su sé stesso. Questo non è sempre una scelta attuabile poiché la maggior parte delle volte è necessario mantenere la posizione.

- Alleggerimento della struttura

I motori elettrici e le articolazioni costituite da puri macchinati sono fonte di peso non indifferente e ridurlo nella struttura porterebbe ad avere la possibilità di poterne aumentare invece la parte dedicata al payload. Anche in questo caso si avrebbe una riduzione della potenza necessaria.

- Eliminazione totale o parziale dei motori

I motori elettrici installati possono essere fonte di problemi dovuti all'usura delle parti meccaniche od anche alla presenza di fastidi quali sabbia ed umidità che potrebbero rovinare gli ingranaggi posti nelle giunture. Sono altresì elementi che subiscono danni se non adeguatamente schermati a causa degli alti gradienti di temperatura. E' possibile eliminare completamente la presenza dei motori od utilizzare una configurazione ibrida.

- Miglioria sensore di appoggio

Potrebbe essere necessario migliorare la modalità con cui ci si ha la conferma dell'avvenuto contatto zampa-terreno installando un sensore di appoggio più adeguato e preciso.

3 Leghe a memoria di forma: caratterizzazione sperimentale

3.1 Richiami teorici

Le leghe a memoria di forma sono leghe molto particolari dotate di caratteristiche che le distinguono fortemente dalle altre leghe.

Hanno un comportamento poco prevedibile ed anzi, spesso, nonostante venga fatto un attento studio teorico, ne conseguono comportamenti nelle applicazioni pratiche diversi da quelli aspettati. Ciò è dovuto al fatto che le proprietà termomeccaniche di queste leghe dipendono fortemente dalla loro composizione chimica e dai trattamenti termomeccanici subiti durante la loro lavorazione.

Questi materiali fanno parte di una particolare famiglia di materiali metallici la cui peculiarità sta nel recupero della forma originaria partendo da uno stato deformato di entità più o meno importante a seguito di una variazione di temperatura. Tale proprietà deriva da una particolare trasformazione cristallina solido-solido denominata Trasformazione Martensistica Termoelastica.

La diffusione di queste leghe ha raggiunto livelli abbastanza elevati. Grazie alla compatibilità biomedica di alcune di esse se ne ha un ampio utilizzo nel campo medico e odontoiatrico, ma anche nella produzione di valvole e interruttori di sicurezza, nella realizzazione di dispositivi antisismici oltre che nel settore aerospaziale come parte integrante di strutture intelligenti. Recentemente si stanno effettuando parecchi progressi nell'impiego di tali materiali come parte attiva di tessuti utilizzabili sia nei settori industriali, medici e ingegneristici, sia nel campo della moda ricercando caratteristiche sempre più innovative.

3.1.1 Comportamento delle leghe a memoria di forma

Attraverso la variazione di temperatura e l'applicazione di uno sforzo le leghe a memoria di forma cambiano fase subendo quella che viene chiamata trasformazione martensitica termoelastica che coincide con il passaggio dalla fase genitrice austenitica alla fase martensitica.

Le principali caratteristiche a livello microscopico che differenziano questi materiali da quelli comunemente utilizzati sono:

- Le trasformazioni martensitiche sono associate a deformazioni non elastiche del reticolo cristallino e non coinvolgono processi diffusivi mantenendo costante la composizione chimica della lega.
- Vi è la possibile coesistenza della fase genitrice e della fase prodotto essendo questa una transizione del primo ordine ed essendo caratterizzata da un piano invariante che separa le due fasi. A seconda della natura della lega i vettori del reticolo di ogni fase hanno una relazione ben definita
- La trasformazione di un elemento corrispondente a una sola cella produce deformazioni volumetriche e di taglio lungo piani ben definiti con accomodamento con struttura a twins che dà origine alla reversibilità della trasformazione. La deformazione a taglio è più grande della distorsione elastica della sola cella. Questa trasformazione è reversibile a livello cristallografico.
- E' possibile che dalla stessa fase genitrice possano formarsi più varianti di martensite essendo il reticolo cristallino della fase martensitica con simmetria minore della fase austenitica
-

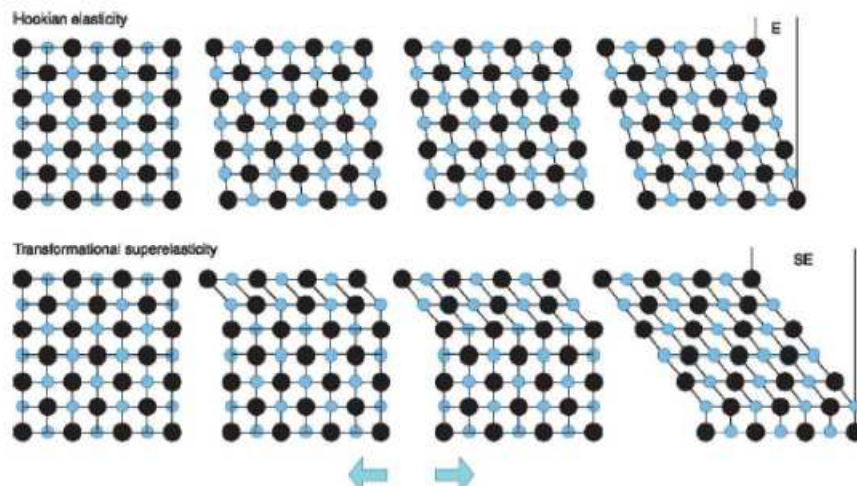


Figura 3.1 : Differenza comportamento leghe a memoria di forma (b) e leghe metalliche (a)

Tra le leghe disponibili si decide di utilizzare per il progetto le leghe di NiTi.

Peculiarità che portate alla scelta di questa lega sono

- Buona resistenza a corrosione
- Buona resistenza a fatica
- Forze sviluppate nella fase di recupero adeguate all'applicazione

Il NiTi è una delle leghe più utilizzate e presenta un quantitativo variabile di Nickel e Titanio. Nel progetto vengono utilizzati fili Smartflex con composizione quasi equiatomica di Ni - Ti.

Questa lega è caratterizzata da un effetto di memoria di forma corrispondente ad un range di temperature piuttosto alto. Normalmente è possibile avere deformazioni di recupero massime intorno a valori dell'8% ed, anche quando si incorre in plasticità, è possibile recuperare gran parte della deformazione avvenuta. Le temperature di attivazione riportate in letteratura variano tra i -30°C ed i 110°C per filo libero.

Un contenuto maggiore di Titanio porta ad un notevole incremento delle temperature di trasformazione mentre l'arricchimento di Nickel, nonostante la temperatura di trasformazione si abbassi, permette di sfruttare la caratteristica pseudo-elastica di questo materiale.

Come accennato il comportamento delle leghe a memoria di forma è fortemente dipendente dalla struttura cristallina. Caratteristica di queste leghe è il recupero della deformazione imposta tramite il cambio di fase del materiale guidato da un gradiente di temperatura. Questo accade perché tali leghe possono essere costituite da due fasi stabili della struttura cristallina; austenite, che è la fase genitrice, e martensite. L'austenite è lo stato stabile ad alta temperatura ed è caratterizzata da una struttura cubica a corpo centrato B2 ad elevata simmetria mentre la martensite o fase prodotto è lo stato stabile a bassa temperatura ed ha una struttura monoclinica B19' a cui corrisponde un modulo elastico più basso. Nel passaggio tra le due fasi è possibile la creazione della fase intermedia romboedrica dovuta alla presenza di difetti dovuti alla lavorazione.

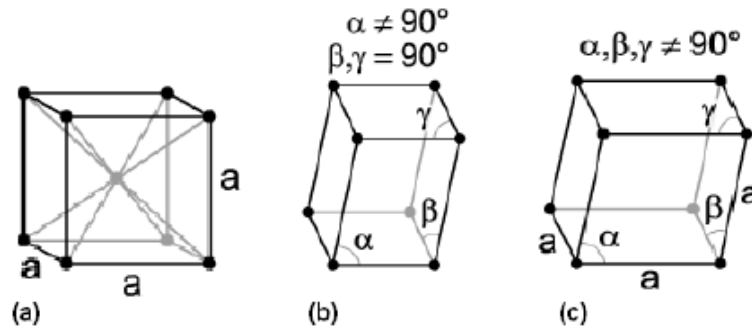


Figura 3.2 : (a) Struttura cubica a corpo centrato B2 (b) Struttura monoclina B19' (c) Struttura romboedrica

Le transizioni tra austenite e martensite sono reversibili. Si parla di trasformazione diretta quando si passa da austenite a martensite ed inversa o trasformazione austenitica quando si passa da martensite ad austenite.

Nella trasformazione inversa il prodotto finale è sempre austenite mentre nella trasformazione martensitica è possibile ottenere martensite twinned o detwinned a seconda che venga indotta applicando solo un gradiente di temperatura od anche uno sforzo.

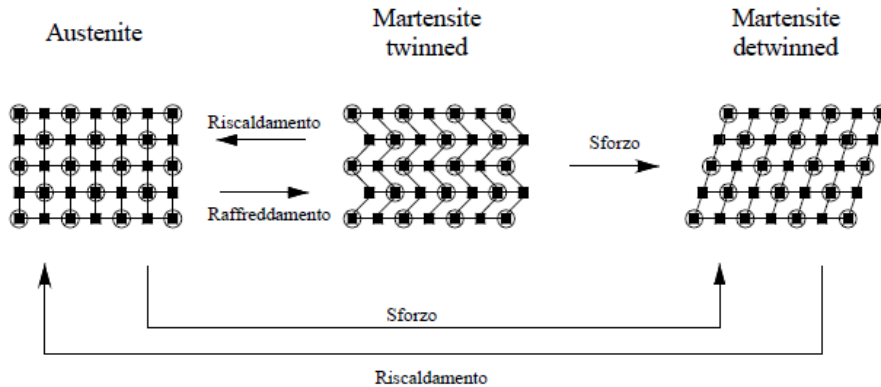


Figura 3.3 : Trasformazioni possibili tra le varie fasi delle leghe a memoria di forma

Le trasformazioni dipendono dal riordino della reticolo cristallino. Quest'ultimo però non deforma la conformazione macroscopica passando dalla configurazione (a) alla (d) mostrate nella figura seguente perché la matrice

austenite vincola la deformazione costringendo il reticolo a mantenere la geometria originale del cristallo generando così uno stato di sforzo che porta ad una deformazione locale secondo due tipi di meccanismo che sono scorrimento o slip e geminazione o twinning.

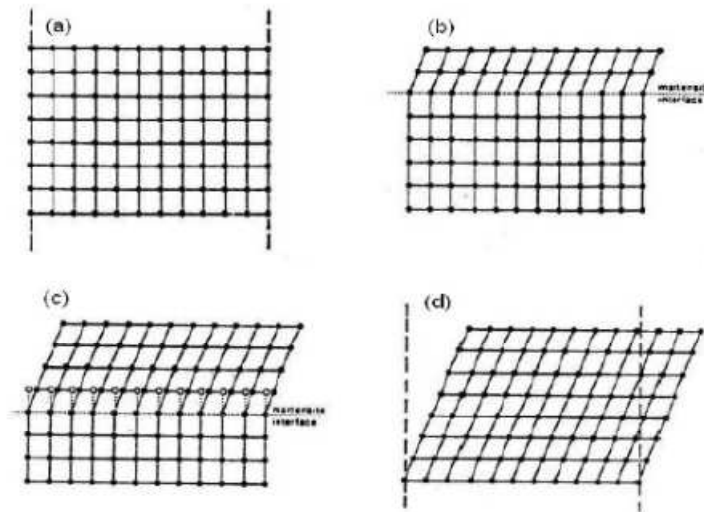


Figura 3.4 : Orientazione ideale del reticolo durante la trasformazione martensitica

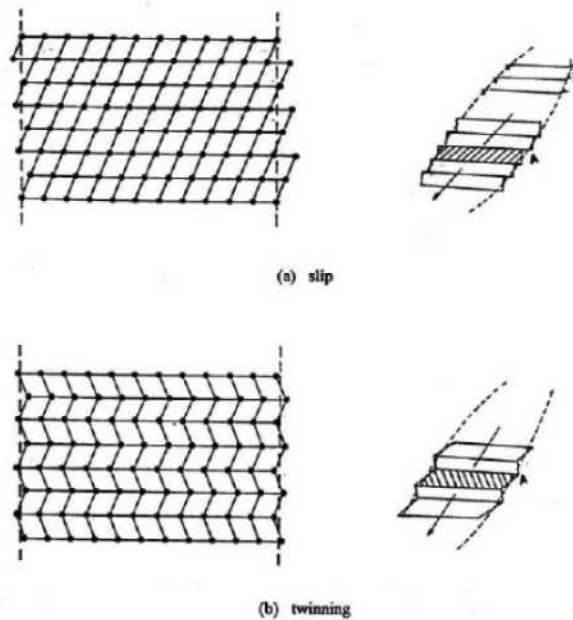


Figura 3.5 : Orientazione reale del reticolo cristallino durante la trasformazione martensitica secondo il processo (a) slip o (b) twinning

Con lo scorrimento si ha deformazione plastica per moto delle dislocazioni che è irreversibile, mentre con la geminazione si ha formazione di placchette con orientazione diversa rispetto alla matrice e poichè non si ha rottura di legami atomici la deformazione è reversibile. Applicando uno sforzo di taglio alla martensite ottenuta per geminazione si può far scorrere il bordo dei geminati ottenendo una netta variazione di forma che porta ad avere martensite allineata in un'unica direzione.

La trasformazione inversa che rappresenta il recupero di forma ha luogo perchè i cristalli tornano a orientarsi secondo la configurazione originale grazie alla trasformazione martensitica termoelastica inversa che riporta lo stato cristallografico a quello austenico corrispondente macroscopicamente alla forma originale di partenza

La driving force che guida la trasformazione martensitica è il salto energetico da superare per avere il passaggio da fase genitrice a fase prodotto, cioè la differenza tra l'energia libera di Gibbs delle due fasi che può essere fornita al materiale tramite la variazione di temperatura o mediante energia meccanica durante l'applicazione di uno sforzo.

Dal punto di vista macroscopico quello che succede è che si ha un passaggio da austenite a martensite e viceversa le quali hanno caratteristiche meccaniche nettamente diverse e ciò avviene a seconda della temperatura e dello sforzo che vengono applicati.

Per quanto riguarda l'applicazione della temperatura questa permette di passare da martensite ad austenite imponendo un certo gradiente termico che è funzione della composizione del materiale. Al variare della temperatura si ha passaggio di fase come mostrato in figura

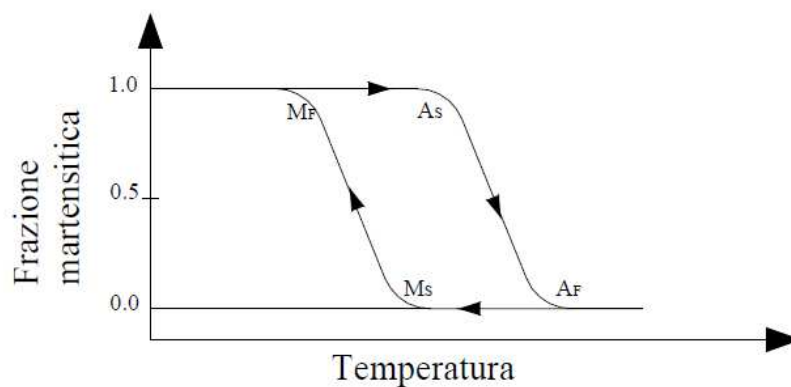


Figura 3.6 : Trasformazione martensitica diretta ed inversa e conseguente aumento/diminuzione della frazione martensitica

Si individuano quattro temperature associabili ai punti cruciali della trasformazione martensitica

- M_s Temperatura di inizio martensite in cui parte la trasformazione martensitica
- M_f Temperatura di fine martensite in cui si conclude la trasformazione martensitica ed ho interamente fase martensite
- A_s Temperatura di inizio austenite in cui ha inizio il passaggio da martensite ad austenite
- A_f Temperatura di fine austenite in cui si conclude la trasformazione martensitica all'indietro ed ho unicamente fase austenite

Nel caso in cui sia presente sforzo allora le temperature di inizio e fine trasformazione dipenderanno dallo stato di sforzo presente nel materiale secondo le leggi:

$$A_S(\sigma) = A_{S0} + \frac{\sigma}{C_A} \quad ; \quad A_F(\sigma) = A_{F0} + \frac{\sigma}{C_A}$$

$$M_S(\sigma) = M_{S0} + \frac{\sigma}{C_M} \quad ; \quad M_F(\sigma) = M_{F0} + \frac{\sigma}{C_M}$$

Dove

$A_{S0}, A_{F0}, M_{S0}, M_{F0}$ sono le temperature di trasformazione a sforzo nullo

σ è lo sforzo applicato

C_M e C_A sono i coefficienti che per il NiTi possono variare rispettivamente tra 4,5 e 13,8 MPa/°C e 7 e 11.3 Mpa/°C

Nella seguente figura si può invece vedere come reagisce il materiale se sottoposto a sforzi e venga modificata la temperatura.

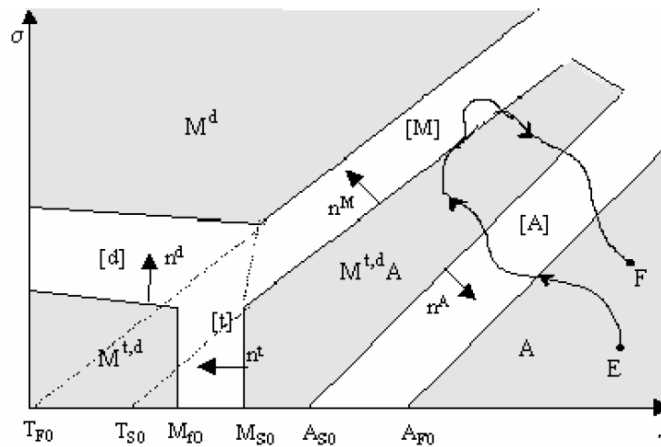


Figura 3.7 : Diagramma di trasformazione di fase : cicli termici a sforzo costante

Nel diagramma sono facilmente individuabili quattro regioni in grigio chiamate zone morte e due aree in bianco definite strisce di trasformazione, in bianco. Nelle zone morte non può avvenire alcuna trasformazione e sono divise in zona A, in cui ho 100% austenite, zona M^d in cui è presente martensite detwinned, allineata in direzione dello sforzo, zona $M^{t,d}$ in cui possono coesistere martensite non allineata, twinned, e martensite detwinned, e zona $M^{t,d,A}$ in cui coesistono martensite twinned, detwinned e austenite. Nelle strisce di trasformazione possono avvenire o la trasformazione martensitica o la riorientazione della martensite esclusivamente seguendo i versi indicati dalle

freccie n^A, n^M, n^t, n^d . Come si può notare l'andamento di M_S, M_F, A_S, A_F è lineare per valori di sforzo bassi o alti, mentre risulta essere irregolare nel tratto intermedio. Ciò è dovuto al fatto che in base al livello di sforzo applicato si possono avere diverse configurazioni di martensite. Esiste poi una temperatura al di sopra della quale, continuando ad applicare sforzo, non è più possibile ottenere la SIM.

3.1.2 Memoria di forma ad una via

Come detto le proprietà di queste leghe sono la

- Memoria di forma
- Pseudoelasticità

Si decide di sfruttarne la memoria di forma e nello specifico l'effetto di memoria di forma ad una via. Ciò implica che il materiale possa recuperare la deformazione subita in condizione 100% martensite attraverso l'aumento della temperatura fino ad una temperatura maggiore uguale a quella di inizio austenite.

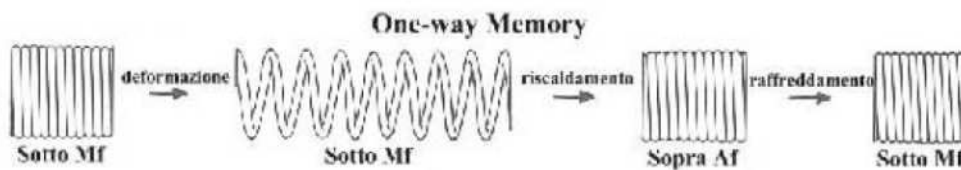


Figura 3.8 : Comportamento macroscopico materiale ad una via

Una volta che il materiale ha recuperato la forma originaria è possibile raffreddare il materiale senza che vi sia cambiamento a livello macroscopico della forma. A livello cristallografico il comportamento è visualizzabile così

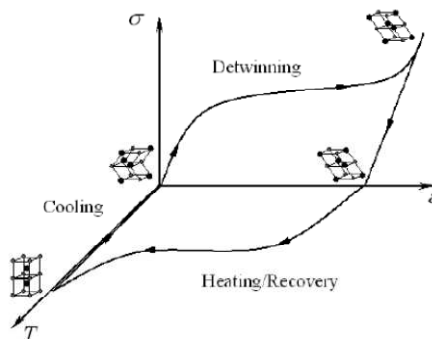


Figura 3.9 : Diagramma sforzo, deformazione, temperatura

E' possibile ottenere martensite detwinned o parzialmente detwinned applicando un carico di tipo meccanico isotermicamente. Una volta raggiunta la configurazione 100% martensite e raffreddato poi il materiale questo recupera totalmente la deformazione riportandosi alla configurazione iniziale. Ciò è sempre possibile sotto l'ipotesi di rimanere in campo elastico. In caso di passaggio in campo plastico la deformazione verrà comunque recuperata dal materiale ma solo in percentuale più o meno alta a seconda di quanto incida la deformazione plastica.

Per le leghe di NiTi il grafico a cui si fa riferimento, e da cui si può analizzare il comportamento ad una via, è il seguente

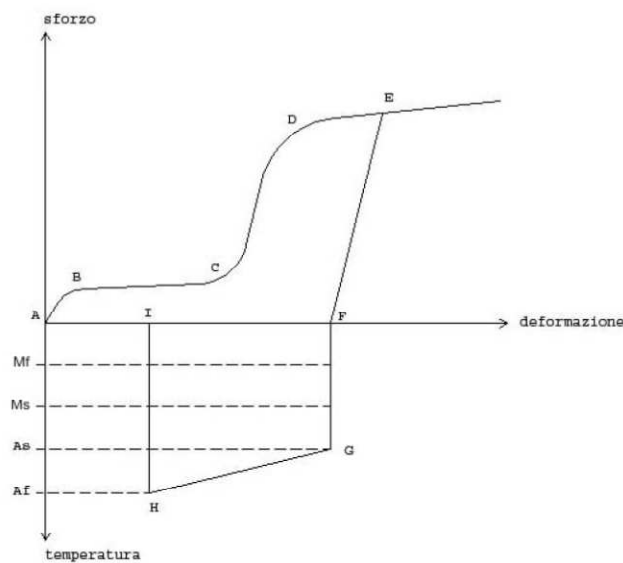


Figura 3.10 : Diagramma comportamento materiale ad una via in funzione di sforzo - deformazione - temperatura

Il punto di partenza è il punto A a temperatura pari a M_F . Si applica uno sforzo crescente ed il materiale percorre da prima il tratto elastico A-B in condizione di martensite twinned finchè ha inizio una riorientazione dei grani in direzione dello stesso sforzo e si ha il passaggio da martensite twinned a detwinned lungo B-C. Se si arriva al punto C si ha martensite 100% detwinned e se lo sforzo applicato non cessa si inizia a percorrere il tratto successivo C-D che altro non è che il tratto elastico della martensite detwinned. Si giunge al punto D e se si ha continua applicazione di sforzo si entra nel campo plastico rappresentato dal tratto D-E con la conseguente generazione di una deformazione che non potrà essere totalmente recuperata rappresentata dal fatto che nella parte di recupero si

arrivi al punto I e non si torni al punto A. Se in D fosse cessata l'applicazione di sforzo si avrebbe totale recupero della deformazione e quindi la figura 3.11 (a).

Arrivati al punto E è necessario cessare l'applicazione dello sforzo e quello che accade è che, una volta scaricato il materiale che si trova nella condizione martensite totalmente detwinned, si torna nella condizione $\sigma = 0$ percorrendo il tratto E-F. A seguito del recupero elastico si giunge nel punto F in cui per recuperare la deformazione è necessario applicare un gradiente di temperatura positivo ed attivare così l'effetto della memoria di forma. Riscaldando il materiale è possibile passare dalla condizione M_F alla condizione A_S in cui inizia a crearsi la fase austenite percorrendo il tratto F-G fino ad avere totale formazione di austenite nel punto H alla temperatura A_F poiché si ha la trasformazione martensitica all'indietro nel tratto G-H. Col raffreddamento successivo del materiale lungo il tratto H-I non si ha nessuna variazione macroscopica di forma.

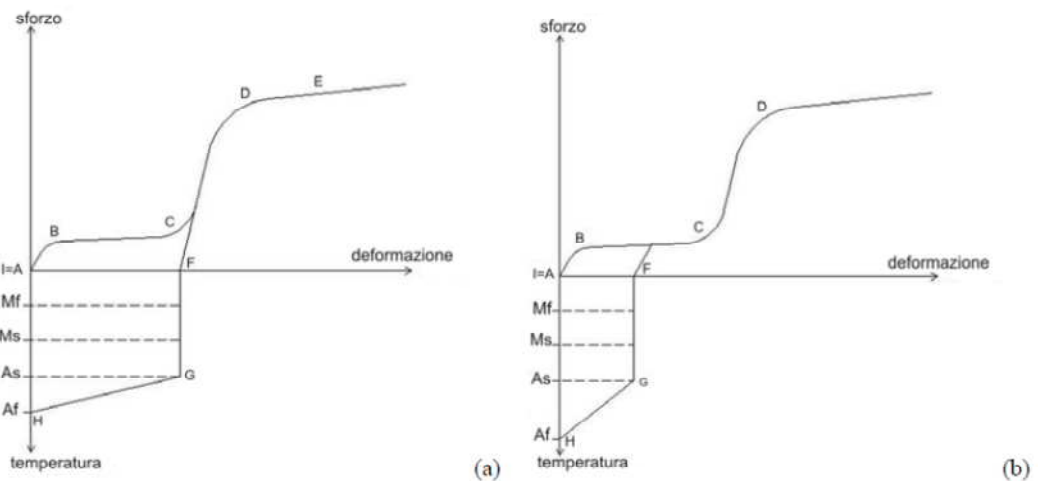


Figura 3.11 : Diagrammi esempi di recupero totale della deformazioni per leghe a memoria di forma ad una via

3.2 Caratterizzazione del materiale

E' possibile trovare le leghe a memoria di forma in NiTi in varie configurazioni

- Fili
- Nastri
- Tubi



Figura 3.12 : Forme in cui si può presentare il NiTi (a) Fili (b) Nastri (c) Tubi

Si decide di utilizzarle sotto forma di fili e tra quelli a disposizioni si decide di utilizzare un filo Smatflex sottile di diametro 0.200 millimetri che che avendo la possibilità di sviluppare fino a circa 300 MPa ha caratteristiche adeguate allo scopo di questa applicazione. Non necessita di alte potenze di alimentazione per essere riscaldato e si raffredda velocemente.

Nominalmente la temperatura di fine austenite A_F è di 90°.

Per valutare le caratteristiche nominali e per valutarne l'uso che se ne può fare si svolgono delle analisi calorimetriche e meccaniche sul filo di NiTi.

3.2.1 Analisi DSC

La prima analisi effettuata è l'analisi DSC acronimo della tecnica della calorimetria a scansione differenziale attraverso cui è possibile ricavare i valori delle temperature di interesse A_S , A_F , M_S , M_F , e riconoscere le differenti trasformazioni di fase non solo martensitica e austenica ma anche la romboedrica se presente.

Il principio di questo strumento è quello di misurare il flusso di calore emesso dal campione analizzato attraverso una misura differenziale con un campione di riferimento inerte sotto le stesse condizioni. Entrambi i campioni si inseriscono, in due crogioli differenti, in una cella di misura in cui si controlla la temperatura. Nel momento in cui si sviluppa una differenza di temperatura tra i due campioni a causa di eventi endotermici o esotermici dovuti al cambio di fase allora l'alimentazione di energia viene regolata per annullare la differenza presente. Il riscaldamento avviene tramite una resistenza mentre il raffreddamento tramite l'utilizzo dell'azoto liquido.

La sequenza a cui si sottopone il campione di filo di NiTi è la seguente

Equilibrate at 120.00 °C

Isothermal for 2.00 min

I primi due passaggi vengono fatti per eliminare eventuali deformazioni presenti

Ramp 10.00 °C/min to -50.00 °C

Isothermal for 2.00 min

Alla fine della rampa si è in fase 100% martensite

Ramp 10.00 °C/min to 120.00 °C

Isothermal for 2.00 min

Alla fine della rampa si è in fase 100% austenite

Repeat segment 3 for 1 times

Nei primi cicli il comportamento per il NiTi subisce una variazione delle temperature dovuta ad una fase di stabilizzazione della trasformazione nel materiale, per cui vengono eseguiti più cicli per verificarne la deriva.

La microstruttura del campione, che corrisponde a delle buone proprietà meccaniche, corrisponde a quella ottenuta con trattamenti termici a temperature intermedie e, quindi, ad una struttura in cui difetti e precipitati della lega danno

il rinforzo meccanico necessario. Pertanto in questo caso c'è la presenza della trasformazione romboedrica intermedia che ci si aspetta di evidenziare nella misura DSC.

Il risultato ottenuto è mostrato in figura

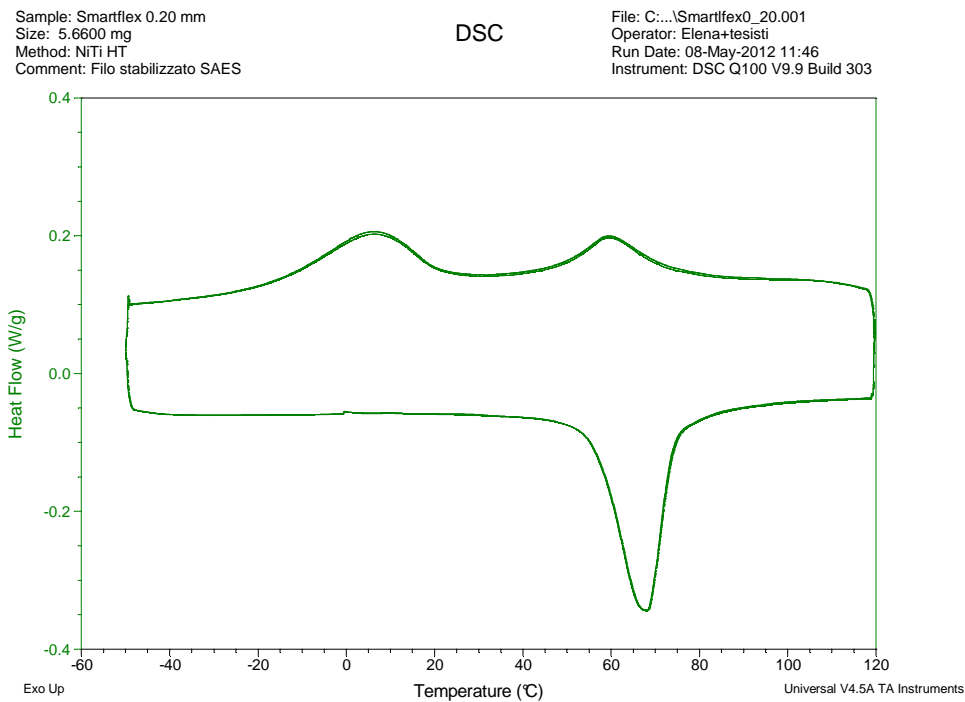


Figura 3.13 : Analisi DSC sul filo di NiTi Diametro 0.200 mm

Come ci si aspettava è possibile riconoscere facilmente i picchi dovuti alle varie trasformazioni. Quelli dovuti alla trasformazione romboedrica ed alla trasformazione martensitica al diminuire della temperatura ed il picco dovuto alla trasformazione in fase austenite durante il riscaldamento visibile nella parte inferiore.

Da questo grafico è possibile ricavare le temperature di inizio e fine trasformazione di fase tracciando le tangenti alle curve ed analizzandone il punto di intersezione.

Si parte dalla prima trasformazione di fase che si incontra durante il raffreddamento. La trasformazione in fase romboedrica.

In figura 3.14 si evidenziano le temperature d'interesse.

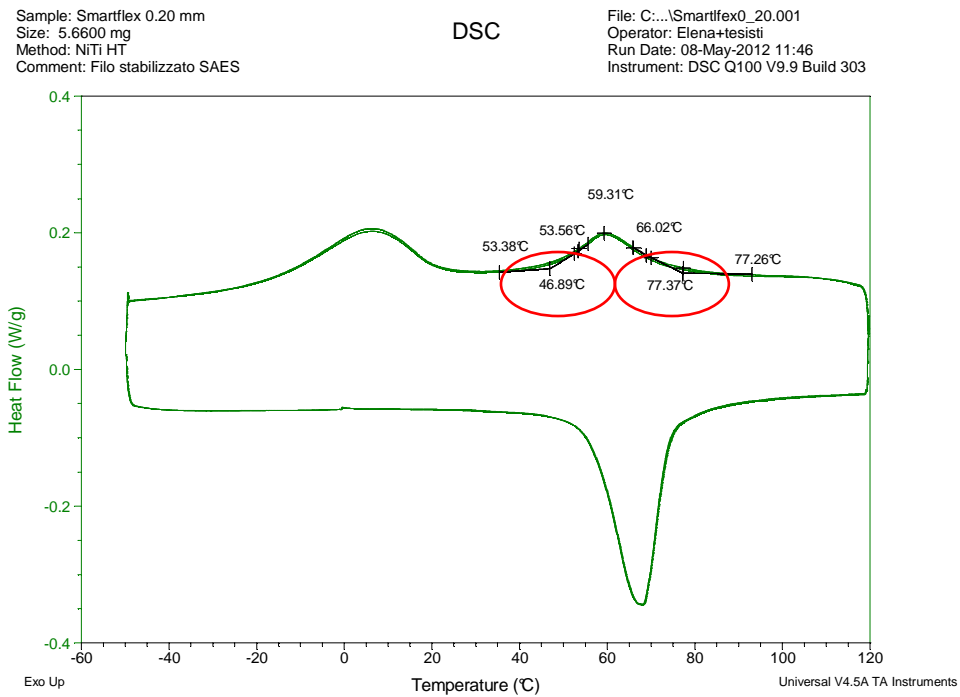


Figura 3.14 : Rilevamento temperature caratteristiche della fase romboedrica rilevate su analisi DSC effettuata

La temperatura di attivazione R_S è di 77.37°C mentre la fine della trasformazione si ha a 46.89°C ed è chiamata R_F .

Nella figura che segue viene evidenziata invece la trasformazione in fase martensite le cui temperature di riferimento sono M_S di 21.43°C e M_F di -15.33°C . Si noti che a temperatura ambiente, considerata pari a 25°C , il materiale non si troverebbe in fase 100% martensitica ma anzi ad una temperatura vicina a M_S .

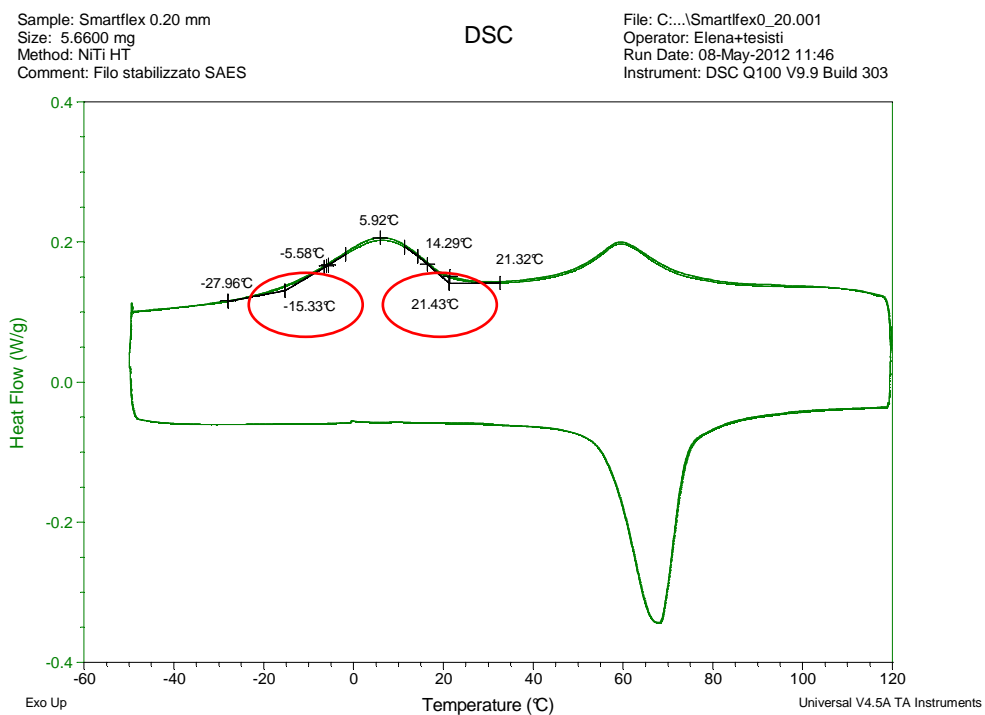


Figura 3.15 : Rilevamento temperature caratteristiche della fase martensite rilevate su analisi DSC effettuata

Nella trasformazione in fase austenitica si ha A_S di 53.66°C e A_F di 78.71°C .

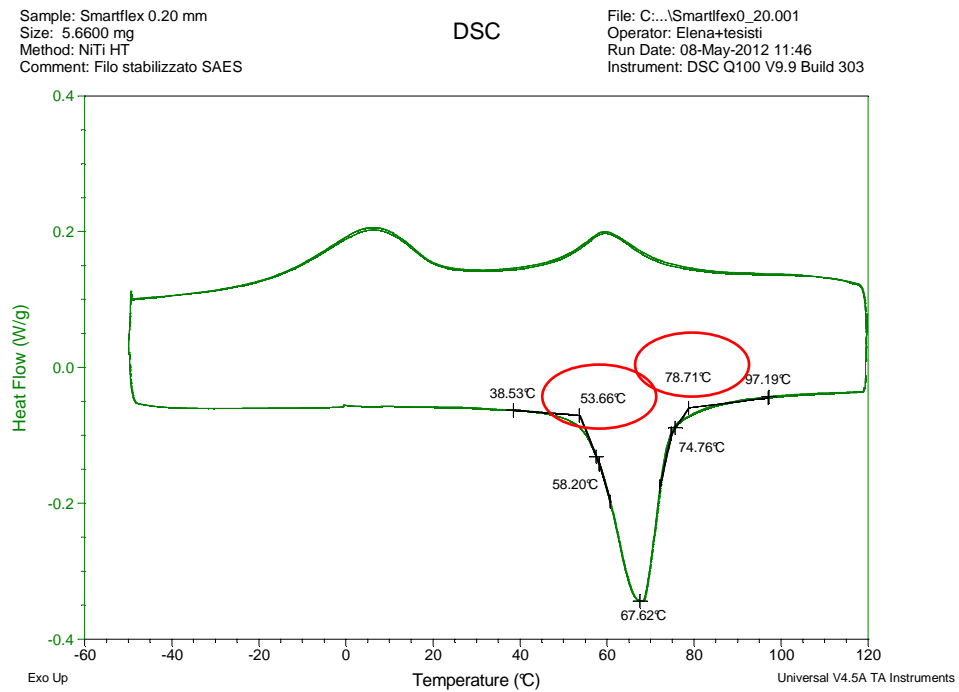


Figura 3.16 : Rilevamento temperature caratteristiche della fase austenite rilevate su analisi DSC effettuata

Per completezza vengono evidenziate anche le temperature dei picchi e la temperatura tra fase romboedrica e martensitica.

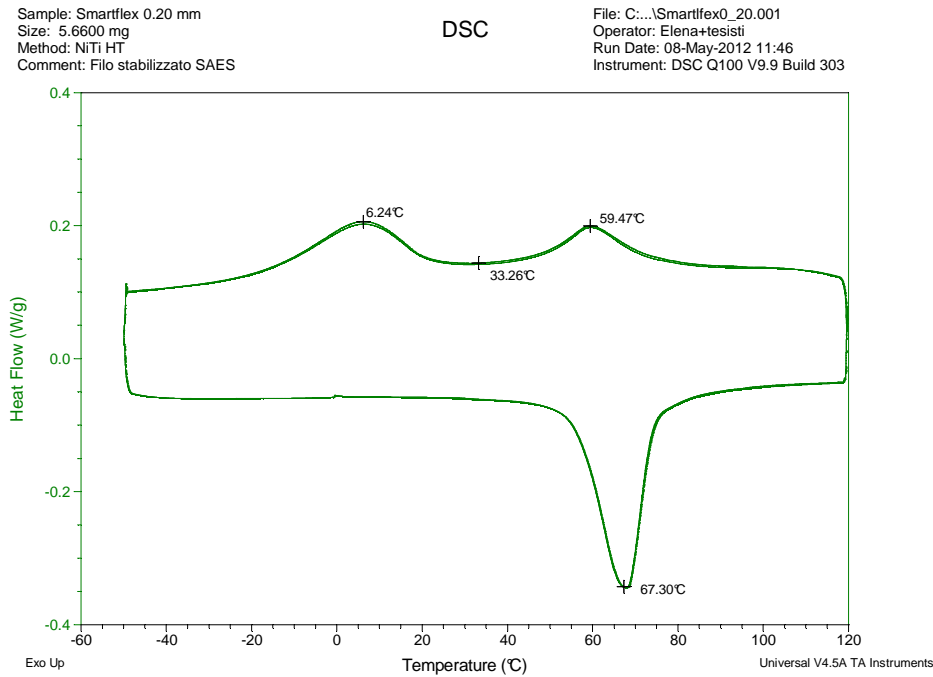


Figura 3.17 : Rilevamento temperature picco della varie fasi rilevate su analisi DSC effettuata

Le temperature ottenute differiscono leggermente rispetto a quelle nominali e ciò è dovuto al fatto che si sta analizzando il materiale completamente libero. Nel caso in cui vi sia sforzo applicato dovuto a carichi o semplicemente vincoli al movimento si noterà un aumento delle temperature di inizio e fine trasformazione secondo le relazioni precedentemente descritte.

3.2.2 Analisi DMA: curve di *Strain Recovery*

L'analisi meccanica prevede misure di *strain recovery* applicando un carico meccanico crescente per ogni ciclo di temperatura con un massimo dipendente dalla cella di carico a disposizione e del carico massimo applicabile nominalmente svolgendo così un'analisi DMA. In questo modo vediamo come il materiale recupera la deformazione subita.

La routine eseguita è la seguente:

Data storage On
Force
Equilibrate at 120.00 °C
Isothermal for 5.00 min

Anche stavolta faccio un riscaldamento iniziale per eliminare deformazioni residue già presenti nel materiale dopo che inizio ad applicare il primo carico

- 1 Stress 50.0000 MPa
 Ramp 5.00 °C/min to -50.00 °C
 Isothermal for 5.00 min
 Ramp 5.00 °C/min to 140.00 °C
 Isothermal for 5.00 min
- 2 Stress 100.0000 MPa
 Ramp 5.00 °C/min to -50.00 °C
 Isothermal for 5.00 min
 Ramp 5.00 °C/min to 160.00 °C
 Isothermal for 5.00 min
- 3 Stress 150.0000 MPa
 Ramp 5.00 °C/min to -50.00 °C
 Isothermal for 5.00 min
 Ramp 5.00 °C/min to 170.00 °C
 Isothermal for 5.00 min
- 4 Stress 200.0000 MPa
 Ramp 5.00 °C/min to -50.00 °C
 Isothermal for 5.00 min
 Ramp 5.00 °C/min to 180.00 °C
 Isothermal for 5.00 min
- 5 Stress 300.0000 MPa

Ramp 5.00 °C/min to -50.00 °C

Isothermal for 5.00 min

Ramp 5.00 °C/min to 200.00 °C

Isothermal for 5.00 min

I risultati possono essere graficati con in ascisse la temperatura in gradi Celsius e in ordinata la deformazione in percentuale.

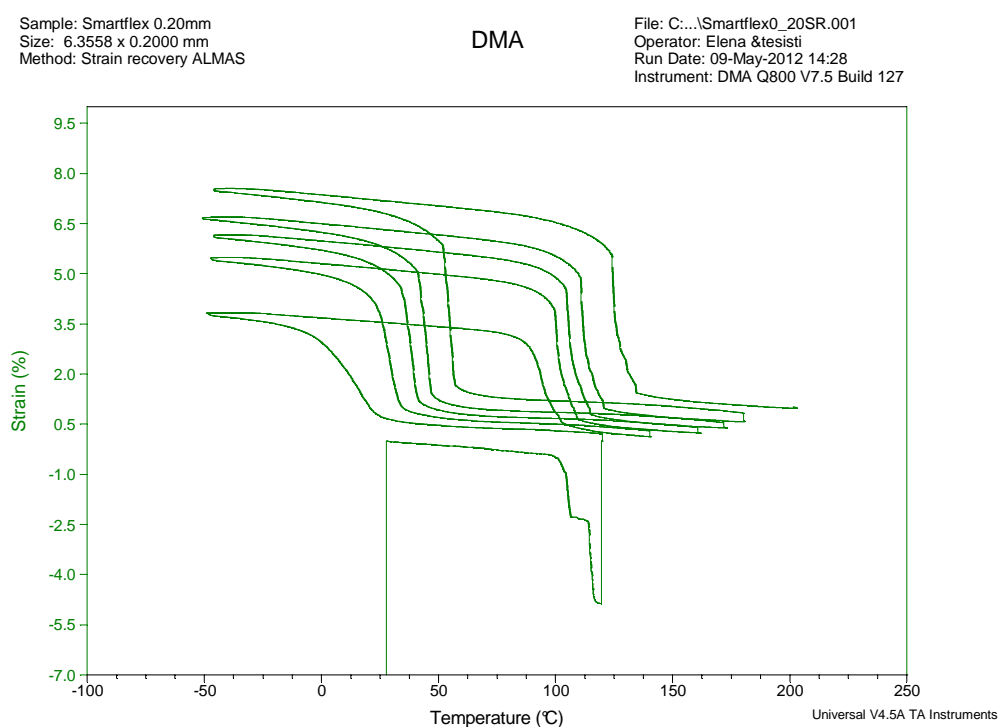


Figura 3.18 : Analisi DMA sul filo di NiTi Diametro 0.200 mm

Si può vedere che a partire dall'applicazione di 50 Mpa non risulta visibile la fase romboedrica. La curva si chiude perfettamente fino ai 300 Mpa il che significa che il materiale recupera tutta la deformazione nel campo di sforzi analizzato.

All'aumento del carico applicato non solo aumenta il recupero percentuale dato dalla presenza di martensite parzialmente detwinned riorientata ma aumentano anche le temperature di inizio-fine trasformazione di fase come previsto.

Anche in questo caso è possibile ricavare le quattro temperature caratterizzanti la trasformazione martensitica tracciando le tangenti alle varie curve e analizzandone l'intersezione.

In figura si mostra il grafico ottenuto tramite analisi DMA.

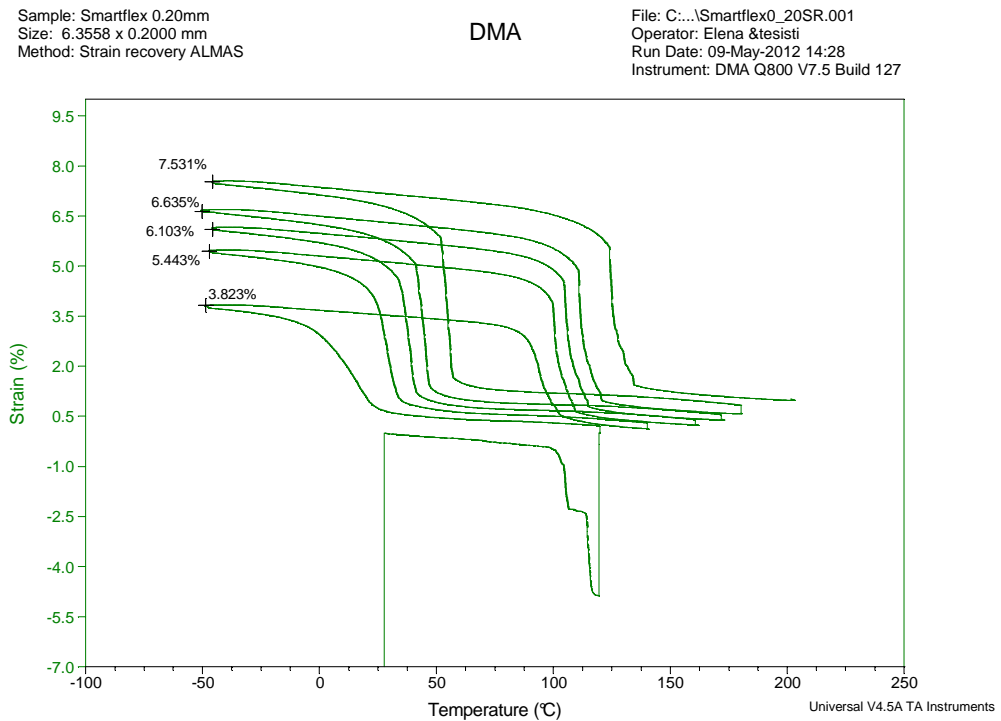


Figura 3.19 : Andamento del recupero percentuale in funzione del carico applicato

Tabuliamo di seguito i valori di recupero di deformazioni che si ottengono

Sforzo applicato [MPa]	Recupero deformazione [%]
50	3.8
100	5.4
150	6.1
200	6.6
300	7.5

Tabella 3.1 : Recupero percentuale della deformazione in funzione del carico applicato

I risultati ottenuti sono molto buoni. Il materiale analizzato ha caratteristiche meccaniche che permettono di recuperare perfettamente una deformazione che si avvicina all'8% come da letteratura. E' un materiale con buona risposta ai carichi applicati ed ottime temperature di utilizzo.

Dai dati ottenuti dall'analisi DMA è possibile costruire la curva che esprime l'andamento della temperatura di inizio fase martensite e di fine austenite a seconda dello sforzo.

Sforzo applicato [Mpa]	A _F [°C]	M _S [°C]
50	99.57	24.83
100	105.61	33.06
150	110.41	41.32
200	115.92	47.04
300	128.73	56.86

Tabella 3.2 : Andamento delle temperature A_F e M_S in funzione del carico applicato

Generalmente questa analisi viene fatta sulla temperatura A_F ed in letteratura si hanno coefficienti di Clausius-Clapeyron di $10 \frac{MPa}{^{\circ}C}$ che son influenzati dal diametro del filo. In questo caso si effettuata l'analisi anche sulla temperatura M_S essendo questa in generale più stabile e meno influenzata dalle condizioni termomeccaniche.

I risultati ottenuti sono compatibili con i valori aspettati dalla letteratura.

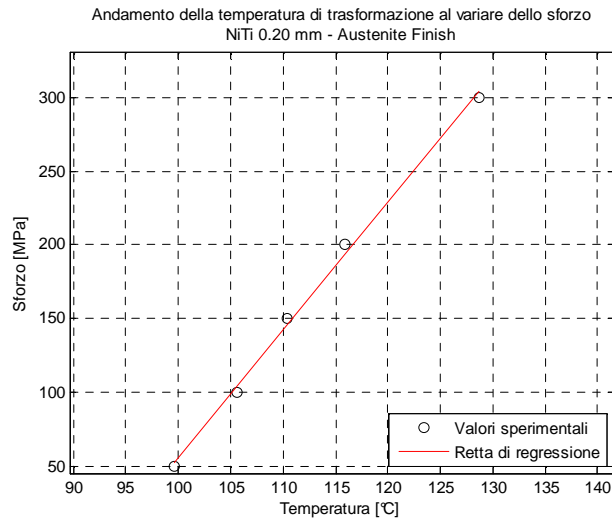


Figura 3.20 : Variazione della temperatura A_F in funzione dello sforzo applicato

$$\frac{d\sigma}{dT} = 8.6591 \frac{MPa}{^\circ C}$$

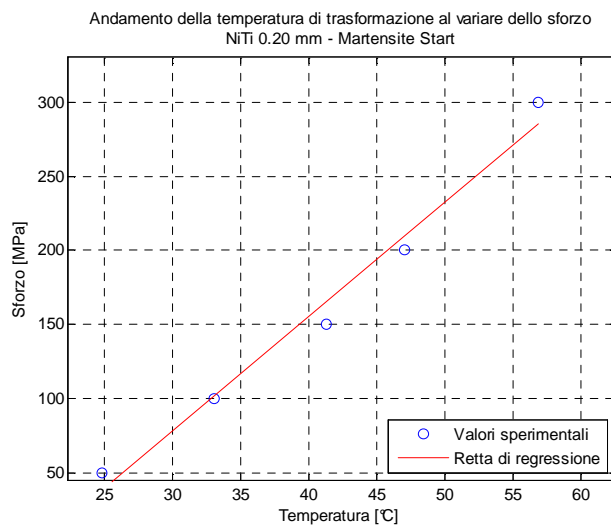


Figura 3.21 : Variazione della temperatura M_S in funzione dello sforzo applicato

$$\frac{d\sigma}{dT} = 7.7041 \frac{MPa}{^\circ C}$$

3.2.3 Analisi DMA: curve di Stress Strain

Un'ultima analisi che si effettua sul materiale è l'analisi *Stress- Strain* che consiste nell'applicare un ciclo di carico e scarico nelle condizioni isoterme per lo studio delle proprietà meccaniche in termini di moduli, sforzi sviluppati nelle due fasi di carico e scarico e strain recuperati.

La routine lanciata in questo caso viene riportata di seguito

```
Data storage On
Force
Equilibrate at 140.00 °C
Isothermal for 5.00 min
```

Come le altre volte si eliminano preventivamente eventuali deformazioni residue

1. Scelgo una temperatura molto minore di M_S ricordando che $M_S \sim 21^\circ\text{C}$

```
Equilibrate at -40.00 °C
Isothermal for 5.00 min
Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 250.0000 MPa
Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 0.0000 MPa
Force
Equilibrate at 140.00 °C
Isothermal for 5.00 min
```

2. Si alza la temperatura rimanendo ad un valore minore di M_S ma praticamente uguale a M_{picco}

```
Equilibrate at 6.00 °C
Isothermal for 5.00 min
Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 250.0000 MPa
Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 0.0000 MPa
Force
Equilibrate at 140.00 °C
```

Isothermal for 5.00 min

3. Si arriva nella condizione di *Temperatura Ambiente*. Questa è la temperatura di utilizzo del dimostratore che si vuole realizzare ed oltretutto coincide con la temperatura tra M_{picco} e R_{picco} che è pari a 33°C.

Equilibrate at 25.00 °C

Isothermal for 5.00 min

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 350.0000 MPa

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 0.0000 MPa

Force

Equilibrate at 140.00 °C

Isothermal for 5.00 min

4. Si sceglie una temperatura vicina ad A_S ricordando che $A_S \sim 54^\circ\text{C}$

Equilibrate at 60.00 °C

Isothermal for 5.00 min

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 450.0000 MPa

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 0.0000 MPa

Force

Equilibrate at 140.00 °C

Isothermal for 5.00 min

5. Si arrivo ad una temperature vicina ad A_F ricordando che $A_F \sim 79^\circ\text{C}$

Equilibrate at 75.00 °C

Isothermal for 5.00 min

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 550.0000 MPa

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 0.0000 MPa

Force

Equilibrate at 150.00 °C

Isothermal for 5.00 min

6. Si supera A_F sempre ricordando che $A_F \sim 79^\circ\text{C}$ per cui ci si trova nella condizione $A_F + 10^\circ\text{C}$

Equilibrate at 85.00 °C

Isothermal for 5.00 min

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 550.0000 MPa

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 0.0000 MPa

Force

Equilibrate at 150.00 °C

Isothermal for 5.00 min

7. $A_F + 20^\circ\text{C}$

Equilibrate at 95.00 °C

Isothermal for 5.00 min

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 550.0000 MPa

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 0.0000 MPa

Force

Equilibrate at 150.00 °C

Isothermal for 5.00 min

8. $A_F + 30^\circ\text{C}$

Equilibrate at 105.00 °C

Isothermal for 5.00 min

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 550.0000 MPa

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 0.0000 MPa

Force

Equilibrate at 150.00 °C

Isothermal for 5.00 min

9. $A_F + 40^\circ\text{C}$

Equilibrate at 115.00 °C

Isothermal for 5.00 min

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 550.0000 MPa

Ramp Stress 30.0000 MPa/min to 0.0000 MPa

A partire dalla condizione $A_F + 10^\circ\text{C}$ dovrebbe iniziare ad essere riconoscibile il recupero a 'bandiera' dato dalla formazione del plateau in fase austenite. In realtà il materiale utilizzato a questa temperatura ha ancora della martensite residua che non riesce a recuperare completamente in maniera pseudoelastica. La caratteristica si presenta invece a temperatura $A_F + 20$.

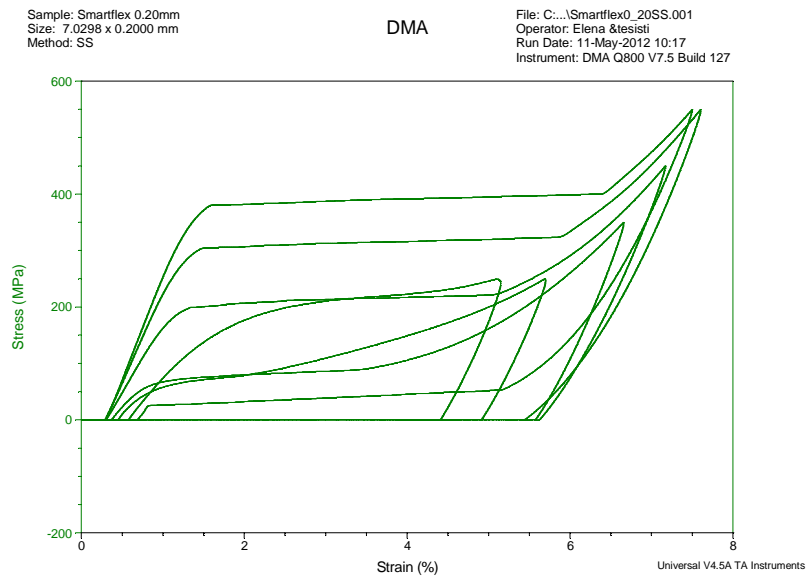


Figura 3.22 : Analisi DMA per verificare la pseudo - elasticità

4 Progettazione del sistema di attuazione

Quello che si propone è di migliorare il sistema di locomozione del progetto NEMeSys sfruttando le potenzialità delle leghe a memoria di forma.

Gli smart materials hanno varie qualità. In primis permettono di ridurre considerevolmente il peso rendendo il rover più leggero ed agile aumentandone la mobilità. Si riduce inoltre la complicatezza di realizzazione ed il consumo energetico per cui l'unica necessità diventa quella di alimentare gli SMA utilizzando pochi ampere. Oltre ad essere più leggere non necessitano di particolare manutenzione ed una volta isolate termicamente non vi è il rischio di danneggiamento a causa di polveri o sostanze dannose essendo poco influenzabili da fattori esterni a parte la temperatura. Infine attraverso l'idea di sfruttare il peso del robot per permettere al rover di autosostenersi si potrebbe garantire che il rover una volta spento rimanga nella sua posizione ultima senza dover mantenere accesa l'alimentazione.

Nel capitolo precedente vengono menzionate alcune migliorie:

- Autosostentamento e diminuzione della potenza necessaria
- Alleggerimento della struttura
- Eliminazione totale o parziale dei motori
- Miglioria sensore di appoggio

Le leghe a memoria di forma permettono di portare a compimento più di una miglioria ma essendo questo lavoro di tesi l'inizio di un progetto, che si spera continui nel tempo, si è deciso di dedicarsi al puro impiego degli SMA analizzandone vantaggi e svantaggi e concentrandosi su un'unica caratteristica della camminata. Gli attuatori a leghe a memoria di forma vengono impiegati in sostituzione dei motori elettrici concentrandosi sull'unico movimento dell'alzata creandone un successivo dimostratore tecnologico.

Dovendo migliorare un robot da impiegare per esplorazioni planetarie non si hanno vincoli sulla velocità di movimento purchè venga soddisfatto l'obiettivo di missione e ciò porta a volere un movimento ampio che permetta di coprire grandi distanze. Come spiegato precedentemente l'ottimizzazione avviene a valle di ripetuti studi considerando il movimento di tipo sinusoidale assimilabile alla camminata di insetti.

Il movimento dell'alzata e dell'avanzata sono movimenti assimilabili per cui lo studio del primo permetterà poi di costruire un sistema simile per il secondo.

Elemento di particolare importanza diventa allora il valore di SEP - superior end point - rispetto al quale ci si riferisce e si trascurano invece AEP - anterior end point - e PEP -posterior end point- e risultato minimo che ci si pone è di riuscire ad ottenere un valore di SEP competitivo col SEP attuale che varia dai 30 ai 70 mm rispetto alla posizione di riposo iniziale.

Gli aspetti di cui è necessario tener conto sono:

- Influenza ambiente esterno

Il modello che si vuole studiare non è un modello che tiene conto dell'effettiva operatività del rover in un ambiente spaziale anche perché ogni missione interplanetaria ha dei requisiti specifici da seguire tra cui la conformazione del terreno e la durata della missione e, fattori più importanti, la microgravità e, soprattutto, temperatura in cui dovrebbe operare il rover che influisce sulla scelta della lega a memoria di forma da utilizzare e sulla successiva schermatura da realizzare. Verrà infatti in seguito proposta la creazione di un sistema di schermaggio per evitare che la lega si attivi indipendentemente dalle esigenze di progetto per cui la strumentazione possa venire inglobata ma tenendo presente che questo tipo di leghe necessitano di essere riscaldate ma anche di poter essere raffreddate tornando così alla configurazione iniziale. Altra idea per sopperire al problema dell'alto gradiente termico è l'utilizzo delle super leghe che, sebbene ancora in fase di sperimentazione e con caratteristiche meccaniche minori rispetto alle leghe in commercio e operanti a temperature 'standard' potrebbero essere la soluzione all'alto gradiente termico che vi è su alcuni pianeti.

E' comunque fondamentale chiarire che viene studiato un problema ridotto a cui viene richiesto come primo risultato di essere in grado di operare nell'ambito terrestre nelle condizioni di aria tipo con risultati apprezzabili.

- Semplicità del problema

Come più volte chiarito si ha la necessità di creare un modello che sia il più possibile semplice e attuabile. Vengono allora scelte configurazioni cinematiche di facile integrazione che sfruttano principi base e che siano il meno invasivi possibile oltre a garantire facile riscaldamento e

raffreddamento per i motivi spiegati in precedenza. La scelta di utilizzare fili che siano il più possibile inglobati nella struttura si deve a questo requisito così come la scelta di utilizzare leghe a memoria di forma ad una via.

- Ridondanza

E' necessario che il sistema funzioni in qualsiasi condizione e per tutta la durata della missione. Per sistema si intende la camminata dell'intero rover che non può permettersi di fermarsi causando così il successivo fallimento della missione. Oltre a mantenere la configurazione di NEMeSys costituita da 6 arti che permette, oltre alla stabilità, di poter attuare il movimento pur avendo 4 zampe funzionanti (la stabilità a terra è assicurata con l'appoggio di almeno 3 arti) viene pensata l'apposizione di più fili applicabili sia per un discorso di ridondanza del sistema che della possibilità di alzata con posizioni intermedie.

- Autonomia

Per lo stesso motivo presentato nel punto precedente è impensabile che il rover fallisca la missione e tra i motivi di fallimento vi è anche la mancanza di autonomia. E' necessario che il robot sia in grado di svolgere l'intera missione senza l'ausilio da terra e che sia dotato di un sistema di controllo che permetta di fare il percorso deciso e superare eventuali ostacoli.

Nella progetto non ci si occupa del sistema di controllo ma attraverso l'impiego di SMA si garantisce una semplicità di movimento tale per cui non dovrebbero esserci grossi problemi nel momento in cui si decida di implementare una rete neurale che controlli la camminata. Inoltre rimanendo fedeli al progetto originale per quanto riguarda tipologia di camminata e configurazione dell'arto si assicura un'ottima risposta nel caso di incontro di ostacoli e terreno sabbioso o pieno di asperità

4.1 Soluzioni cinematiche proposte

Obiettivi preposti sono quelli di creare un sistema semplice, autonomo ed il meno ingombrante possibile rifacendosi al progetto originale per quello che riguardano le dimensioni e la tipologia di movimento. Si vuole creare un dimostratore tecnologico funzionante in prima battuta nell'ambiente del laboratorio per confermare l'idea che l'utilizzo degli SMA sia vantaggioso oltre che tecnologicamente avanzato.

A valle della decisione di utilizzare fili di NiTi di diametro pari a 0.200 mm cold worked per l'attuazione si studiano più soluzioni che tengano conto dei requisiti tra cui ricordarsi che è necessario predisporre un sistema che possa essere facilmente alimentato per portare il filo alla temperatura necessaria.

Rimanendo fedeli al progetto originale si utilizza la stessa tipologia di struttura utilizzando un tubolare a sezione quadrata di lato pari a 26 mm che riduce lo spazio a disposizione all'interno.

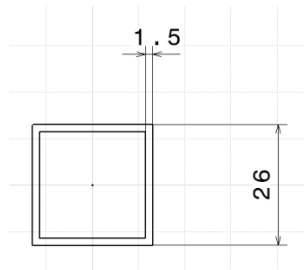


Figura 4.1 : Dimensioni sezione tubolare

Si parte dallo studio di uno schema rappresentante la situazione iniziale come schematizzato in figura avente le misure di lunghezza delle parti e gli angoli pari a quelli che si hanno nella condizione iniziale di riferimento secondo quanto spiegato nei capitoli precedenti.

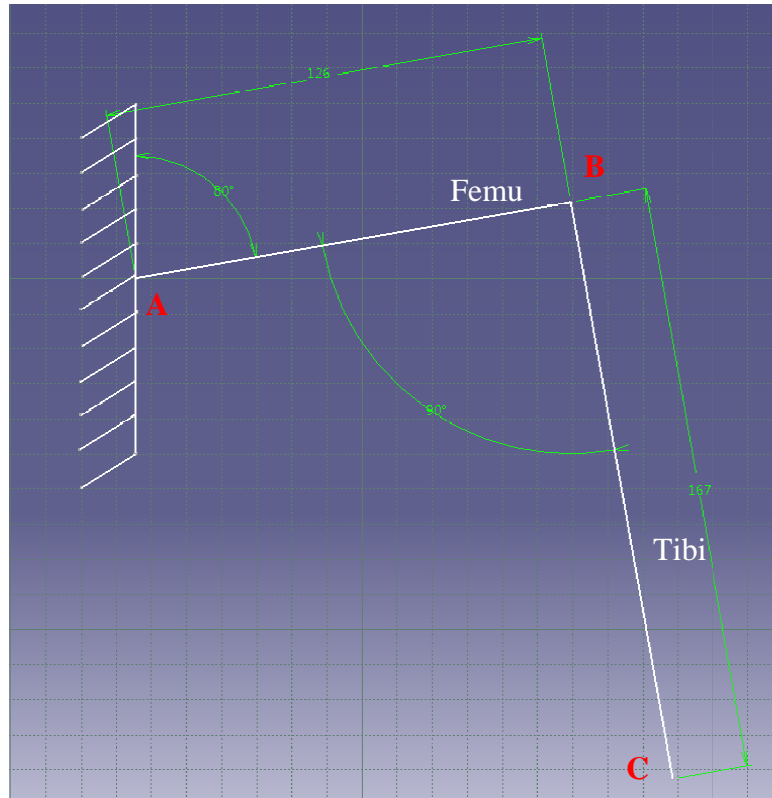


Figura 4.2 : Schema utilizzato per lo studio preliminare della cinematica

I punti A e B indicano la posizione degli assi di rotazione, e quindi, delle cerniere intorno a cui ruotano rispettivamente Femur e Tibia. Il punto B coincide ancora con la giuntura FT. Il punto C indica invece l'estremità ultima dell'arto. Il valore a cui si farà riferimento sarà la distanza A-C che nella posizione di riferimento è di 143 mm e viene definita come H. A causa delle convenzioni prese, H diminuisce se maggiore è la quantità di cui si è riusciti ad alzare la zampa.

I valori di riferimento rispetto cui vogliamo fare delle migliorie rimangono quelli del progetto NEMeSys

	Disatnza AC [mm]	$\Delta_{\text{verticale}}$ [mm]
H_{iniziale}	143	0
H_{minimo}	113	30
H_{massimo}	73	70

Tabella 4.1 : Valori di elevazione attualmente realizzabili su NEMeSys

Il valore di H viene calcolato con la seguente formula

$$H = t \cdot \cos(\alpha - \beta) - f \cdot \cos(\beta)$$

dove

$$t = 167 \text{ mm};$$

$$f = 126 \text{ mm};$$

Come prima cosa si è calcolata tramite Carnot la variazione necessaria degli angoli β tra Femur e Body ed α l'angolo formatasi tra Femur e Tibia prima nel caso in cui venga bloccato uno dei due angoli

	Configurazione 1			Configurazione 2		
	α [°]	β [°]	$\Delta\beta$ [°]	α [°]	β [°]	$\Delta\alpha$ [°]
H minimo	0	65	15	116	0	26
H massimo	0	55	25	135	0	45

Tabella 4.2 : Variazione degli angoli α e β nel caso di attuazione singola

Per ottenere risultati simili a quelli migliori ottenibili ora con l'attuazione attraverso motori elettrici che corrispondono ad H massimo si necessita una variazione su β di 25° oppure su α di 45°.

Si consideri ora l'ipotesi di poter ottenere il risultato voluto modificando entrambi gli angoli.

Il risultato è mostrato in tabella 4.3. Si riportano i valori ottenuti per le configurazioni che portino almeno ad un valore pari ad H_{minimo} e fino ad un'elevazione di circa 60 mm al di sopra della cerniera in A. Raggiungere quest'ultimo risultato sarebbe più che ottimistico visto che significherebbe aumentare le prestazioni di alzata di un valore pari a 3 volte il valore massimo ottenuto al momento.

β [°]	α [°]	H [mm]
74,67	108,00	106,21
69,33	96,00	104,77
69,33	102,00	96,12
74,67	114,00	95,85
64,00	96,00	86,39
69,33	108,00	85,92
74,67	120,00	84,08
64,00	102,00	76,36
69,33	114,00	74,30
74,67	126,00	71,02
58,67	96,00	67,26
64,00	108,00	64,89
69,33	120,00	61,38
74,67	132,00	56,82
58,67	102,00	55,95
64,00	114,00	52,11
53,33	96,00	47,55
69,33	126,00	47,30
58,67	108,00	43,30
74,67	138,00	41,63
64,00	120,00	38,15
53,33	102,00	35,05
69,33	132,00	32,21
58,67	114,00	29,47
48,00	96,00	27,43
74,67	144,00	25,62
64,00	126,00	23,17
53,33	108,00	21,34
69,33	138,00	16,28
58,67	120,00	14,59
48,00	102,00	13,85
74,67	150,00	8,96
64,00	132,00	7,32
42,67	96,00	7,08
53,33	114,00	6,57

β [°]	α [°]	H [mm]
69,33	144,00	-0,31
48,00	108,00	-0,81
58,67	126,00	-1,17
42,67	102,00	-7,47
74,67	156,00	-8,15
53,33	120,00	-9,10
64,00	138,00	-9,20
37,33	96,00	-13,34
48,00	114,00	-16,39
69,33	150,00	-17,39
58,67	132,00	-17,63
42,67	108,00	-22,95
53,33	126,00	-25,49
74,67	162,00	-25,55
64,00	144,00	-26,24
37,33	102,00	-28,73
48,00	120,00	-32,70
32,00	96,00	-33,65
58,67	138,00	-34,61
69,33	156,00	-34,76
42,67	114,00	-39,20
53,33	132,00	-42,42
74,67	168,00	-43,03
64,00	150,00	-43,59
37,33	108,00	-44,90
48,00	126,00	-49,59
32,00	102,00	-49,74
58,67	144,00	-51,94
69,33	162,00	-52,24
26,67	96,00	-53,66
42,67	120,00	-56,03
53,33	138,00	-59,72
74,67	174,00	-60,40
64,00	156,00	-61,06
37,33	114,00	-61,67

Tabella 4.3 : Variazione degli angoli α e β nel caso di attuazione multipla

Vengono evidenziate le configurazioni che permettono di ottenere i due risultati di riferimento ed anche in questo caso la variazione di angolo da attuare non è per nulla proibitiva.

	α [°]	β [°]	$\Delta\beta$ [°]	$\Delta\alpha$ [°]
H_{minimo}	108	75	15	18
H_{massimo}	126	75	15	36

Tabella 4.4 : Valori di elevazione realizzabili con l'attuazione di entrambi gli angoli α e β

Dalla tabella 4.4 e dalla figura di seguito si evince che non sono necessari variazioni angolari enormi per avere risultati competitivi e questo porta a pensare che con un buon cinematismo si possano avere soluzioni che apportino alto miglioramento.

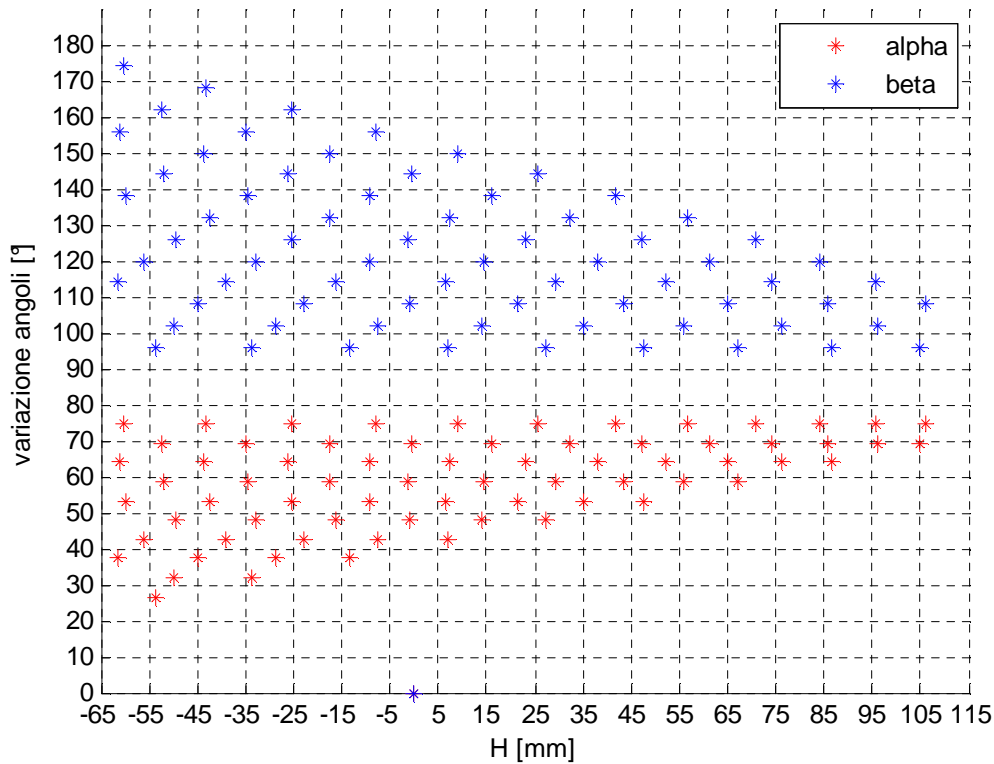


Figura 4.3 : Andamento del valore di elevazione in funzione di attuazione multipla degli angoli α e β

Il passo successivo consiste nel decidere dove fissare i fili all'interno della struttura e come.

Prima idea è quella di creare due supporti di cui uno viene fissato al body stesso e nel caso in cui il risultato dia che le dimensioni del body siano sufficienti non sarà il caso di costruire un ulteriore elemento ma si utilizzeranno gli appigli già presenti; l'altro è un prolungamento uscente dal ginocchio nella direzione del Femur. I fili di NiTi vengono fissati a due estremi che sono uno Femur o Tibia e l'altro il supporto relativo come mostrato in figura.

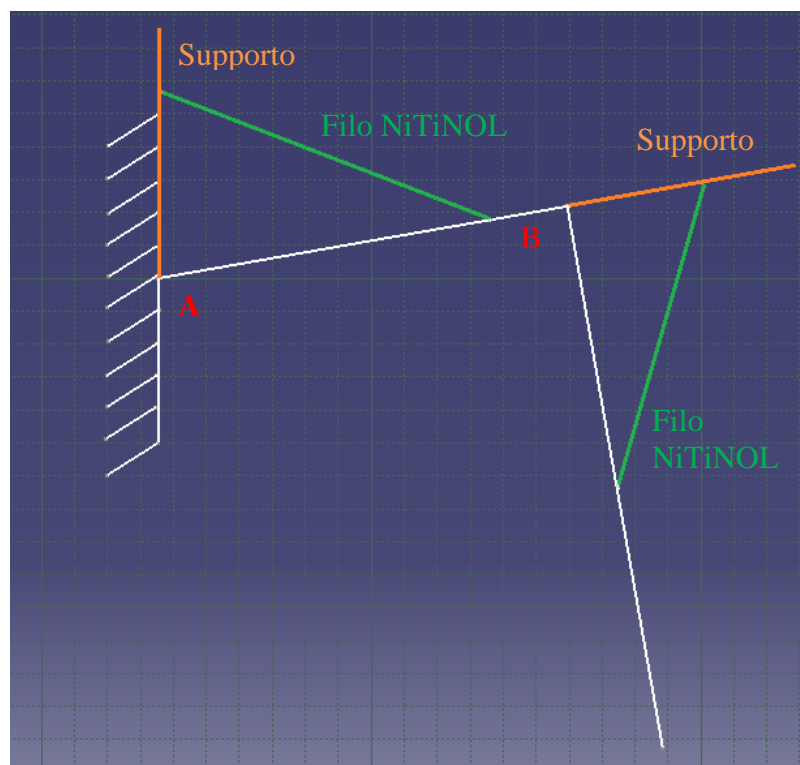


Figura 4.4 : Schema di posizionamento supporti

Ciò che è necessario valutare è la distanza a cui debbano essere fissati gli estremi lungo i supporti e lungo i semiarti affinché si possano avere variazioni angolari che permettano di avere risultati competitivi.

Durante l'alzata entrambi i sistemi di attuazione seguiranno un moto simile ovvero al diminuire della lunghezza del filo di NiTi il punto di attacco sul semiarto si muoverà lungo una traiettoria circolare avente centro in A o B riducendo, o aumentando nel caso di α , l'angolo di riferimento.

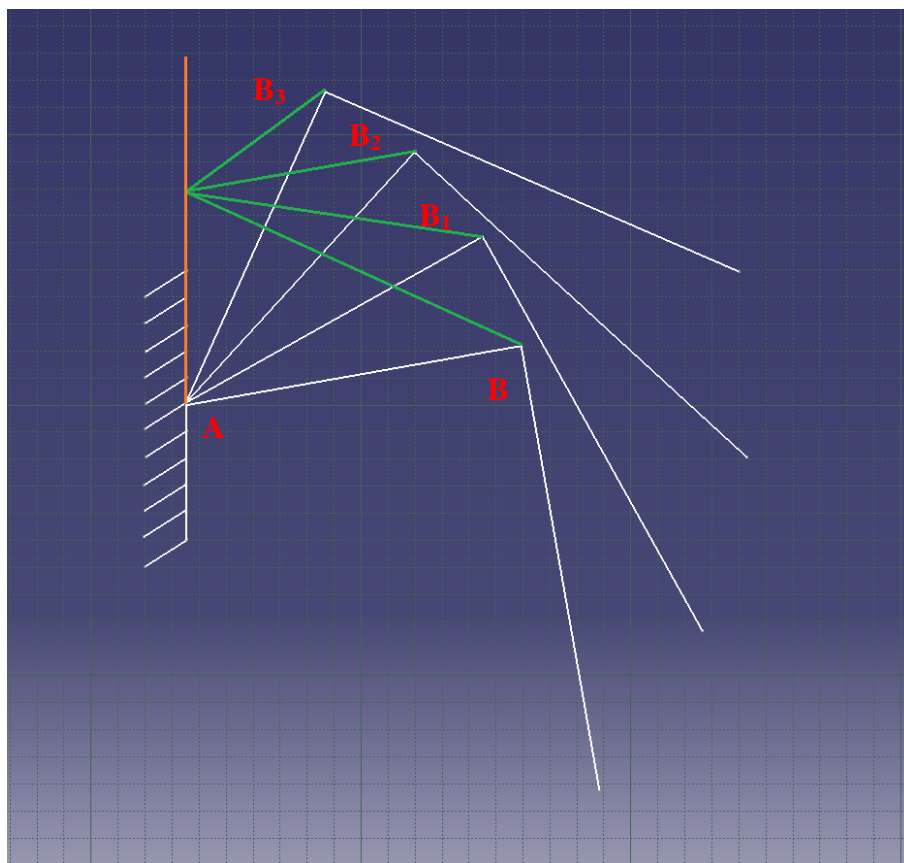


Figura 4.5 : Esempio di movimentazione

Si crea un programma che valuti nelle diverse configurazioni il risultato ottenibile e la quantità di filo necessario.

In prima analisi si considera un accorciamento del filo del 4% valore teorico che, come visto nel capitolo precedente, è perfettamente concorde con le caratteristiche del filo utilizzato.

Relativamente a questa configurazione è necessario porre l'attenzione sui seguenti aspetti:

- Ingombro dei supporti
Per quello che riguarda il supporto nelle vicinanze del body del rover non vi sono particolari problemi essendo, come detto prima e visti risultati, facilmente assimilabile con lo stesso corpo. Abbiamo inoltre

valutato una lunghezza massima che, per le funzioni del rover, non dovrebbe creare problemi poiché non vi sono motivi per cui un supporto uscente possa creare problemi con la camminata o con le azioni di esplorazione.

Il supporto applicato in B in corrispondenza del ginocchio potrebbe invece creare dei problemi prima anche se di piccole dimensioni essendo in una posizione critica. Porre un supporto di questo tipo darebbe luogo a minore compattezza del rover considerando che in una futura applicazione in seguito alla loro installazione sarà necessario schermare i fili.

In prima analisi i supporti vengono analizzati schematizzati come aste rigide ma nel seguito se necessario verranno apportate modifiche come ad esempio una carrucola esterna nel punto B che fa da rimando.

- Attivazione multipla
Avere due diversi fili su due diversi supporti comporta il bisogno di due diverse alimentazioni e questo potrebbe essere un vantaggio perché ci permetterebbe di poter controllare la variazione dei due angoli indipendentemente dandoci così la possibilità di poter ottenere tutte le posizioni intermedie necessarie.

Vengono valutate due configurazioni ripetibili facilmente su entrambi gli angoli essendo il principio lo stesso.

4.1.1 Configurazione di vincolo ibrido

Si considera che il filo in lega a memoria di forma sia fissato all'estremo di Femur e Tibia e che si possa variare il punto di attacco sul supporto. Dovendo limitare gli ingombri si considera una lunghezza massima del supporto di 100 mm che, se possibile, dovrà essere comunque ridotta. D'altro canto aumentare eccessivamente la lunghezza del supporto non solo non sarebbe produttivo per quel che riguarda l'ingombro ma uno studio qualitativo indica che se il punto d'attacco sul supporto supera i 125 mm l'angolo β finale inizia a decrescere ed analogamente per l'attacco che fa lavorare α .

I risultati ottenuti sono mostrati in figura

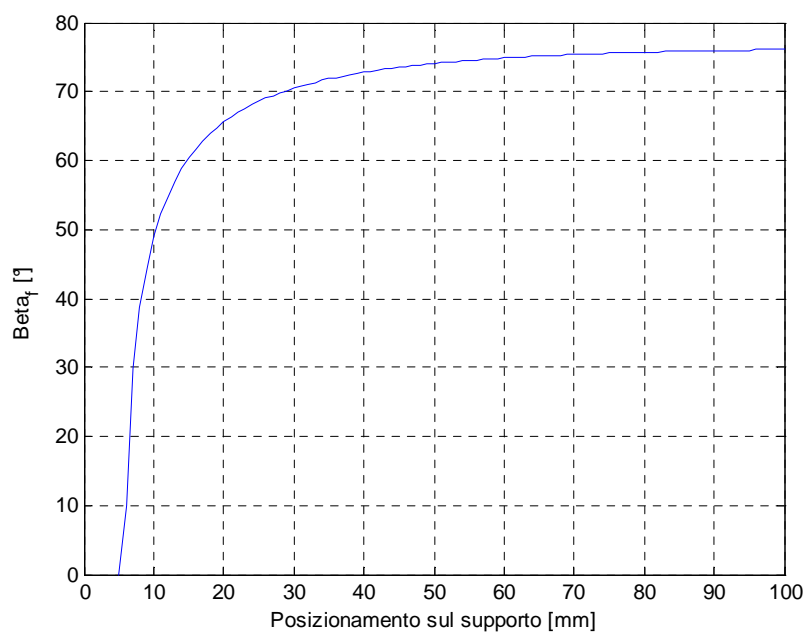


Figura 4.6 : Andamento dell'angolo β_{finale} in funzione del punto di attacco sul supporto

Si nota che dopo un tratto in cui si ha alto gradiente per cui spostando di poco l'attacco si hanno valori dell'angolo finale radicalmente diversi la situazione tende ad omogeneizzarsi per cui dopo i 40 mm il valore ottenibile di β_{finale} è praticamente identico.

Premesso che prima di prendere qualsiasi decisione sul valore ottimale bisogna vedere il comportamento di α possiamo comunque dire che non necessiteremo di un supporto di lunghezza superiore ai 40 mm ed, anzi, probabilmente scenderemo a valori nell'intorno dei 10 mm.

Si studia ora il comportamento dell'angolo α responsabile del movimento della Tibia.

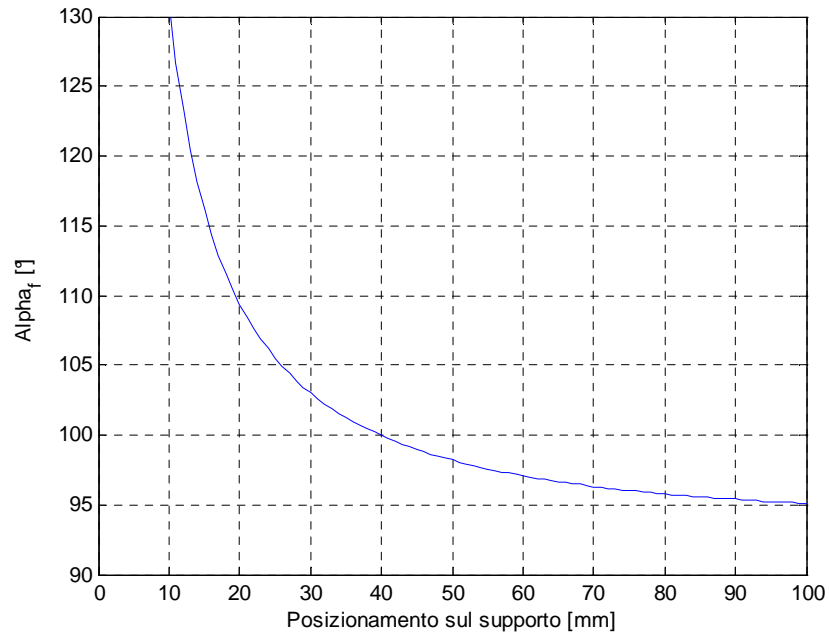


Figura 4.7 : Andamento dell'angolo α_{finale} in funzione del punto di attacco sul supporto

Anche nel caso di α si nota che ad un certo punto diventa inutile aumentare la distanza del punto di applicazione sul supporto allontanandosi dalla cerniera in B. Analogamente si ha un alto gradiente per valori piccoli di distanza sulla verticale e dopo i 60 mm risulta quasi inutile spostare ulteriormente il punto d'attacco. Per la precisione decresce dopo i 165 mm e dopo i 100 mm è costante sul valori di α di 95° .

4.1.2 Configurazione di vincolo variabile

In questo secondo approccio si considerano variabili sia il punto d'attacco sul supporto che sui semiarti. Ovviamente in questo modo avremo un risultato biunivoco ovvero un rapporto tra punto d'applicazione sul supporto e punto di applicazione sul braccio che sono intercambiabili.

Per quanto riguarda β si analizzano le posizioni intermedie per valori del punto di attacco al supporto minore di 60 mm visti i risultati precedenti

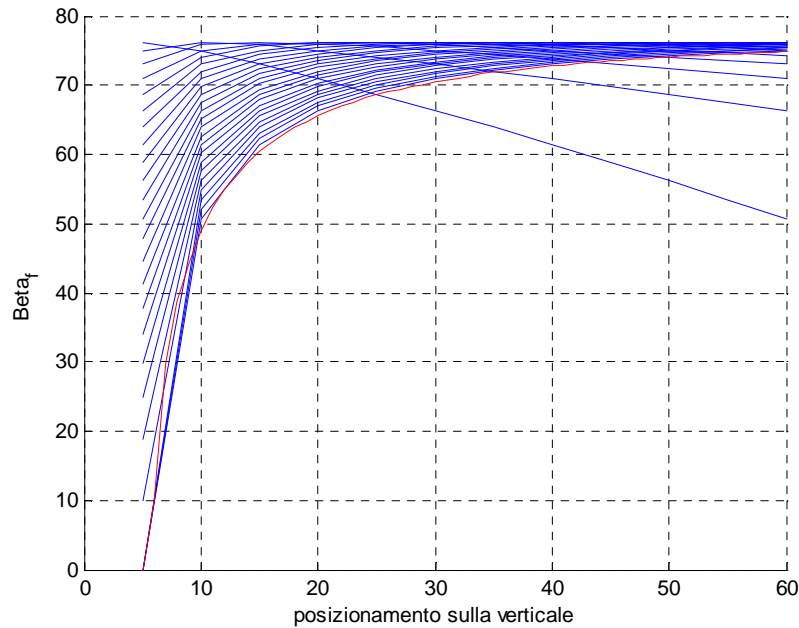


Figura 4.8 : Studio dell'andamento dell'angolo β_{finale} in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Femur

Nella figura si può vedere come, a parità di fissaggio lungo il Femur, variando il punto d'attacco sulla verticale si abbia un angolo β finale differente. La linea rossa è l'andamento ottenuto precedentemente ed indica il caso di fissaggio all'estremo del Femur.

Il valore di fissaggio lungo il Femur è stato fatto variare ad intervalli di 5 mm per cui leggendo il grafico dall'alto a sinistra si parte dalla configurazione in cui l'attacco è esattamente a 5 mm lungo il Femur fino alla condizione di attacco a 126 mm ovvero all'estremità.

Si nota che la configurazione migliore si ha nel caso in cui uno dei due valori sia abbastanza ridotto e tabulando i risultati è possibile ottenere dei valori più specifici. Di seguito vengono riportati i valori in funzione di β fino ad un massimo di 75° che era il valore critico di accoppiamento nel caso in cui si muovano entrambi gli angoli avere un $\Delta\beta$ di 15° è un obiettivo che vogliamo prefissarci.

Posizione lungo Femur [mm]	Posizione lungo il supporto [mm]	β finale [°]
100	5	19
95	5	25
90	5	30
85	5	34
80	5	38
75	5	41
70	5	45
65	5	48
120	10	51
60	5	51
5	60	51
115	10	52
110	10	54
55	5	54
5	55	54
105	10	55
100	10	56
50	5	56
5	50	56
95	10	58
90	10	59
45	5	59
5	45	59
85	10	60
120	15	61
80	10	61
40	5	61
5	40	61
115	15	62
75	10	63
110	15	63
105	15	64
70	10	64
35	5	64

Posizione lungo Femur [mm]	Posizione lungo il supporto [mm]	β finale [°]
100	15	65
65	10	65
95	15	66
120	20	66
90	15	66
60	10	66
30	5	66
10	60	66
5	30	66
115	20	67
85	15	67
110	20	67
55	10	67
10	55	67
80	15	68
105	20	68
100	20	69
75	15	69
50	10	69
25	5	69
10	50	69
5	25	69
120	25	69
95	20	69
70	15	69
115	25	70
90	20	70
45	10	70
10	45	70
110	25	70
65	15	70
85	20	70
105	25	70
120	30	71

Tabella 4.5 : Valori andamento dell'angolo β_{finale} in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Femur. β : [19°-71°]

Posizione lungo Femur [mm]	Posizione lungo il supporto [mm]	β finale [°]
5	35	64
15	60	71
100	25	71
80	20	71
40	10	71
20	5	71
10	40	71
5	20	71
115	30	71
95	25	71
75	20	71
110	30	72
55	15	72
15	55	72
90	25	72
105	30	72
70	20	72
35	10	72
10	35	72
120	35	72
85	25	72
100	30	72
50	15	72
15	50	72
115	35	72
65	20	73
80	25	73
95	30	73
110	35	73
120	40	73
105	35	73
90	30	73
75	25	73
60	20	73

Posizione lungo Femur [mm]	Posizione lungo il supporto [mm]	β finale [°]
60	15	71
20	60	73
15	5	73
15	45	73
10	30	73
5	15	73
115	40	73
100	35	73
85	30	73
70	25	74
110	40	74
55	20	74
20	55	74
95	35	74
120	45	74
80	30	74
40	15	74
15	40	74
105	40	74
65	25	74
90	35	74
115	45	74
100	40	74
75	30	74
50	20	74
25	10	74
20	50	74
10	25	74
110	45	74
85	35	74
120	50	74
60	25	74
25	60	74
95	40	74

Tabella 4.6 : Valori andamento dell'angolo β_{finale} in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Femur. β : [71°-74°]

Si vede che per ottenere ottimi risultati è necessario porre uno dei due attacchi ad una distanza massima dalla cerniera di circa 15 mm. Abbassando ulteriormente il valore si hanno miglioramenti istantanei mentre aumentandolo si va peggiorando ma con minore velocità.

La lunghezza di filo necessaria è invece tabulata nelle tabelle seguenti

β finale [°]	Lunghezza di filo INIZIALE [mm]	Lunghezza di filo FINALE [mm]
19	99,25	95,28
25	94,26	90,49
30	89,27	85,70
34	84,28	80,90
38	79,28	76,11
41	74,30	71,32
45	69,31	66,53
48	64,32	61,75
51	118,67	113,93
51	59,34	56,96
51	59,34	56,96
52	113,69	109,14
54	108,71	104,36
54	54,36	52,18
54	54,36	52,18
54	54,36	52,18
55	103,73	99,58
56	98,76	94,81
56	49,38	47,40
56	49,38	47,40
58	93,78	90,03
59	88,81	85,26
59	44,41	42,63
59	44,41	42,63
60	83,84	80,49
61	118,32	113,59
61	78,88	75,73
61	39,44	37,86

β finale [°]	Lunghezza di filo INIZIALE [mm]	Lunghezza di filo FINALE [mm]
65	98,51	94,57
65	64,03	61,46
66	93,57	89,83
66	118,18	113,45
66	88,63	85,09
66	59,09	56,73
66	29,54	28,36
66	59,09	56,73
66	29,54	28,36
67	113,25	108,72
67	83,71	80,36
67	108,33	104,00
67	54,17	52,00
67	54,17	52,00
68	78,79	75,64
68	103,42	99,28
69	98,52	94,58
69	73,89	70,93
69	49,26	47,29
69	24,63	23,64
69	49,26	47,29
69	24,63	23,64
69	118,25	113,52
69	93,62	89,88
69	69,00	66,24
70	113,36	108,83
70	88,74	85,19

61	39,44	37,86
62	113,36	108,83
63	73,92	70,97
63	108,41	104,07
64	103,46	99,32
64	68,97	66,21
64	34,49	33,11
64	34,49	33,11

70	44,37	42,60
70	44,37	42,60
70	108,49	104,15
70	64,12	61,56
70	83,87	80,52
70	103,63	99,48
71	118,53	113,79
71	59,27	56,90

Tabella 4.7 : Valori andamento lunghezza di filo in NiTi necessaria in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Femur. β : [19°-71°]

β finale [°]	Lunghezza di filo INIZIALE [mm]	Lunghezza di filo FINALE [mm]
71	59,27	56,90
71	98,78	94,83
71	79,02	75,86
71	39,51	37,93
71	19,76	18,97
71	39,51	37,93
71	19,76	18,97
71	113,70	109,15
71	93,94	90,18
71	74,19	71,22
72	108,88	104,52
72	54,44	52,26
72	54,44	52,26
72	89,13	85,56
72	104,07	99,91
72	69,38	66,61
72	34,69	33,30
72	34,69	33,30
72	119,02	114,26
72	84,33	80,96
72	99,29	95,32
72	49,64	47,66
72	49,64	47,66
72	114,25	109,68
73	64,60	62,02

β finale [°]	Lunghezza di filo INIZIALE [mm]	Lunghezza di filo FINALE [mm]
73	59,86	57,47
73	14,97	14,37
73	44,90	43,10
73	29,93	28,73
73	14,97	14,37
73	115,01	110,41
73	100,05	96,05
73	85,08	81,68
74	70,12	67,32
74	110,33	105,91
74	55,16	52,96
74	55,16	52,96
74	95,37	91,55
74	120,62	115,80
74	80,41	77,20
74	40,21	38,60
74	40,21	38,60
74	105,67	101,44
74	65,46	62,85
74	90,72	87,10
74	115,99	111,35
74	101,05	97,01
74	75,79	72,75
74	50,52	48,50
74	25,26	24,25

73	79,56	76,38	74	50,52	48,50
73	94,53	90,75	74	25,26	24,25
73	109,49	105,11	74	111,38	106,93
73	119,72	114,93	74	86,12	82,68
73	104,76	100,57	74	121,72	116,85
73	89,79	86,20	74	60,86	58,43
73	74,83	71,83	74	60,86	58,43
73	59,86	57,47	74	96,46	92,61
73	44,90	43,10	74	106,81	102,54
73	29,93	28,73	74	71,21	68,36

Tabella 4.8 : Valori andamento lunghezza di filo in NiTi necessaria in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Femur. β : [71°-74°]

Viene ripercorso lo stesso procedimento per la visualizzazione dell'andamento dell'angolo α

I risultati ottenuti facendo variare per ogni valore di attacco lungo laTibia il valore di attacco lungo la verticale sono mostrati in figura e sono analoghi, ovviamente, a quelli mostrati per il caso del Femur

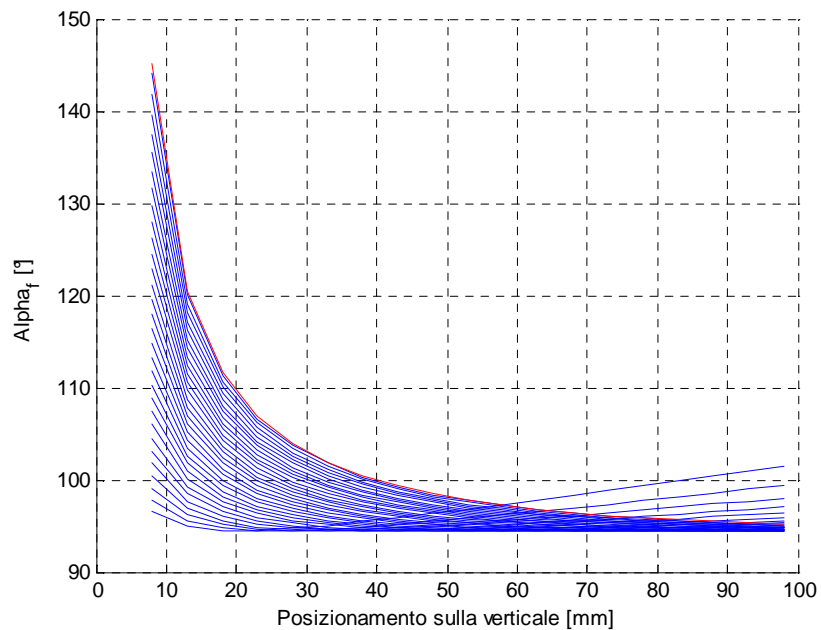


Figura 4.9 : Studio dell'andamento dell'angolo α_{finale} in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Tibia

La linea rossa rappresenta il caso in cui l'attacco sia posizionato all'estremo della Tibia. I questo caso valori di attacco lungo la Tibia minori sono

rappresentati lungo le curve più basse e come prima fissato il valore dell'attacco lungo l'arto viene fatto variare quello sulla verticale. Si ripresenta il problema per cui ad un certo punto è inutile variare i punti d'attacco e si evidenzia come l'ideale sia rimanere in un range minore ai 20 mm; risultato che ci permette di evitare totalmente il problema degli ingombri.

Anche per questa configurazione vengono tabulati i risultati e si può notare come in, analogamente a prima, per avere una buona variazione di angolo si debba posizionare un attacco a poca distanza dalla cerniera ed uno più lontano.

Posizione lungo Tibia [mm]	Posizione lungo il supporto [mm]	α finale [°]
170	8	147
165	8	144
160	8	142
155	8	140
150	8	137
145	8	135
140	8	133
135	8	132
130	8	130
125	8	128
120	8	126
115	8	124
110	8	123
105	8	121
170	13	121
165	13	120
100	8	120
160	13	119
155	13	118
95	8	118
150	13	117
90	8	116
145	13	116
140	13	115
85	8	115

Posizione lungo Tibia [mm]	Posizione lungo il supporto [mm]	α finale [°]
70	8	110
155	18	110
110	13	110
150	18	109
65	8	109
105	13	109
145	18	109
140	18	108
100	13	108
60	8	107
135	18	107
170	23	107
95	13	107
130	18	107
165	23	107
160	23	106
125	18	106
90	13	106
55	8	106
155	23	106
120	18	105
85	13	105
150	23	105
115	18	105
145	23	105

135	13	114	50	8	105
80	8	113	80	13	104
130	13	113	110	18	104
125	13	112	140	23	104
170	18	112	170	28	104
75	8	112	165	28	104
120	13	111	135	23	104
165	18	111	105	18	104
160	18	111	75	13	103
115	13	111	160	28	103

Tabella 4.9 : Valori andamento dell'angolo α_{finale} in funzione della variazione del punto di attacco sul supporto e lungo Tibia. α : [147°-103°]

In questo caso la lunghezza della Tibia di 167 mm ci consente di pensare all'eliminazione del supporto esterno da montarsi sul ginocchio potendo così eliminare il problema dell'ingombro nella sua forma più critica. Quello che accade è infatti che la configurazione migliore si ha per attacco del filo da una parte all'estremità della Tibia e dall'altra a circa 8 mm dalla cerniera posta in B il che può significare utilizzare la struttura stessa del tubolare che, si ricorda, ha sezione quadrata di lato 26 mm oppure inserire un oggetto all'interno che faccia da supporto.

In questo modo si raggiungono valori di α finali maggiori di 120° che significa ottenere una variazione $\Delta\alpha$ di più di 30°.

Considerando l'attuazione contemporanea di α e β se decidiamo di mantenere $\Delta\alpha \sim 30^\circ$ bisogna riconsiderare il $\Delta\beta$ necessario che è di almeno 15° avendo l'accortezza di cercare di rimanere con un valore di H minore a 70 mm.

β [°]	α [°]	H [mm]
74,67	144	25,62
74,67	138	41,63
69,33	138	16,28
74,67	132	56,82
69,33	132	32,21
64,00	132	7,32
74,67	126	71,02
69,33	126	47,30
64,00	126	23,17
74,67	120	84,08

69,33	120	61,38
64,00	120	38,15
58,67	120	14,59

Tabella 4.10 . Valori andame dell'elevazione H nel caso di attuazione multipla . Considerazioni sull'angolo β in funzione di α

Essendo possibile ottenere questo valore di β attraverso il giusto posizionamento lungo il Femur e lungo il supporto in A si decide di considerare attuabile per quanto riguarda la parte della Tibia la soluzione con attacco all'estremo eliminando così ogni tipo di ingobro sulla parte critica composta dalla giunzione FT.

La quantità di filo necessaria in questo caso è compresa tra i 100 mm ed i 170 mm.

Posizione lungo il supporto [mm]	α finale [°]	Lunghezza di filo INIZIALE [mm]	Lunghezza di filo FINALE [mm]
8	147	170,19	163,38
8	144	165,19	158,59
8	142	160,20	153,79
8	140	155,21	149,00
8	137	150,21	144,20
8	135	145,22	139,41
8	133	140,23	134,62
8	132	135,24	129,83
8	130	130,25	125,04
8	128	125,26	120,25
8	126	120,27	115,46
8	124	115,28	110,67
8	123	110,29	105,88
8	121	105,30	101,09

Tabella 4.11 : Valori andamento lunghezza di filo in NiTi necessaria in funzione della variazione del punto di attacco lungo Tibia ed attacco al supporto a 8mm.. α : [147°-121°]

Nonostante il cinematismo presentato dia una variazione di β sufficiente posizionando correttamente gli estremi del filo si decide di migliorare questo

cinematismo avendo in questa parte maggiore libertà di realizzazione di eventuali parti meccaniche.

4.2 Sistemi di rinvio del filo di Ni Ti

4.2.1 Sistema di rinvio per il Femur

Si decide di posizionare delle carrucole lungo il corpo del femore sfruttando così la possibilità di usare una quantità maggiore di filo ed il suo maggiore recupera della deformazione.

In questo tipo di cinematismo si considera ancora l'attacco al corpo del rover ed il centro di rotazione rimane la cerniera in A.

La lunghezza di riferimento è sempre il corpo del Femur di 126 mm ma vengono aggiunti 30 mm che simulano la distanza tra la cerniera e la posizione dell'attacco sul corpo del rover.

Lo studio viene fatto considerando la lunghezza necessaria per avere una riduzione del filo sufficiente a migliorare la soluzione presentata precedentemente. La diminuzione di lunghezza viene valutata come proiezione su un sistema lineare simile a quello nel caso di struttura semplice triangolare con doppio attacco sul supporto e sul semi-arto. Questo può essere fatto sotto l'ipotesi che la maggior parte dell'accorciamento contribuirà sull'accorciamento delle parti dell'avvolgimento lineari che saranno in posizione piuttosto simile a quella ottenibile nel caso di filo teso tra due estremi data la ridotta dimensione degli angoli in gioco.

In conclusione viene svolto un calcolo analogo a quello proposto prima e visto che i risultati precedenti hanno dato dei buoni risultati si cerca di migliorare il tutto partendo dalla condizione in cui si ha un angolo β di 55° con fissaggio all'estremo per cui una lunghezza di filo pari a 124 mm ed il fissaggio nel supporto verticale ad una condizione leggermente in difetto di 14 mm che tiene in considerazione eventuali difetti presenti nella realizzazione del cinematismo rispetto alla soluzione teorica come la realizzazione delle scanalature. Quest'ultima condizione da la possibilità di creare un sistema interamente all'interno della struttura ed in ogni caso compatto.

Posizione lungo il supporto [mm]	β finale [°]	Lunghezza di filo INIZIALE [mm]	Lunghezza di filo FINALE [mm]
10	48,9	124,7	119,7
11	52,2	124,6	119,6
12	54,9	124,5	119,5
13	57,0	124,4	119,4
14	58,9	124,3	119,4
15	60,4	124,3	119,3
16	61,7	124,2	119,3

Tabella 4.12 : Scelta valore punto di fissaggio lungo il supporto

All'aumentare della lunghezza si ottengono risultati via via migliori fino al collasso del sistema ovvero all'arrivo nella condizione $\beta \sim 0^\circ$.

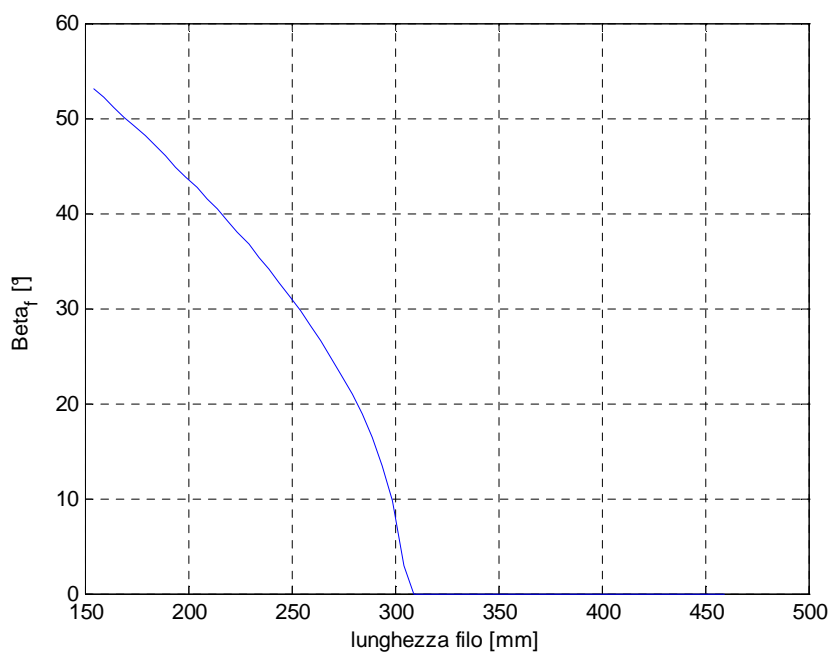


Figura 4.10 : Miglioramento del valore dell'angolo β_{finale} in funzione dell'accrescimento della lunghezza del filo in NiTi

Si considera una lunghezza minore a 300 mm e si valutano le varie configurazioni tenendo presente che il numero di rimandi deve essere dispari dovendo uscire in direzione opposta all'ingresso e decidendo di porre due cilindri perpendicolari all'asse del Femur posti ad una distanza di 40mm per non avere interferenze.

L'avvolgimento avviene come in figura per evitare scarruolamenti.



Figura 4.11 : Avvolgimento filo sulle carrucole di rimando

I risultati sono tabulati di seguito

Posizione lungo il supporto [mm]	β finale [°]	Lunghezza di filo INIZIALE [mm]	Lunghezza di filo FINALE [mm]
14	53	154,19	148,02
14	52	159,19	147,82
14	51	164,19	147,62
14	50	169,19	147,42
14	49	174,19	147,22
14	48	179,19	147,02
14	47	184,19	146,82
14	46	189,19	146,62
14	45	194,19	146,42
14	44	199,19	146,22
14	43	204,19	146,02
14	42	209,19	145,82
14	40	214,19	145,62
14	39	219,19	145,42
14	38	224,19	145,22
14	37	229,19	145,02
14	35	234,19	144,82
14	34	239,19	144,62
14	33	244,19	144,42

14	31	249,19	144,22
14	30	254,19	144,02
14	28	259,19	143,82
14	27	264,19	143,62
14	25	269,19	143,42
14	23	274,19	143,22
14	21	279,19	143,02
14	19	284,19	142,82
14	16	289,19	142,62
14	13	294,19	142,42
14	10	299,19	142,22
14	3	304,19	142,02

Tabella 4.13: Valori andamento lunghezza di filo in NiTi necessaria in funzione di β_{finale} nel caso di rimandi. $\beta: [53^\circ - 3^\circ]$

4.2.2 Sistema di rinvio per la Tibia

Anche se non necessario si fa un breve studio sulla possibilità di inserire dei rimandi nel tratto della Tibia. L'idea viene scartata in quanto i risultati ottenuti non spiegherebbero la complicatezza di realizzazione.

Per completezza viene riportato il grafico ottenuto.

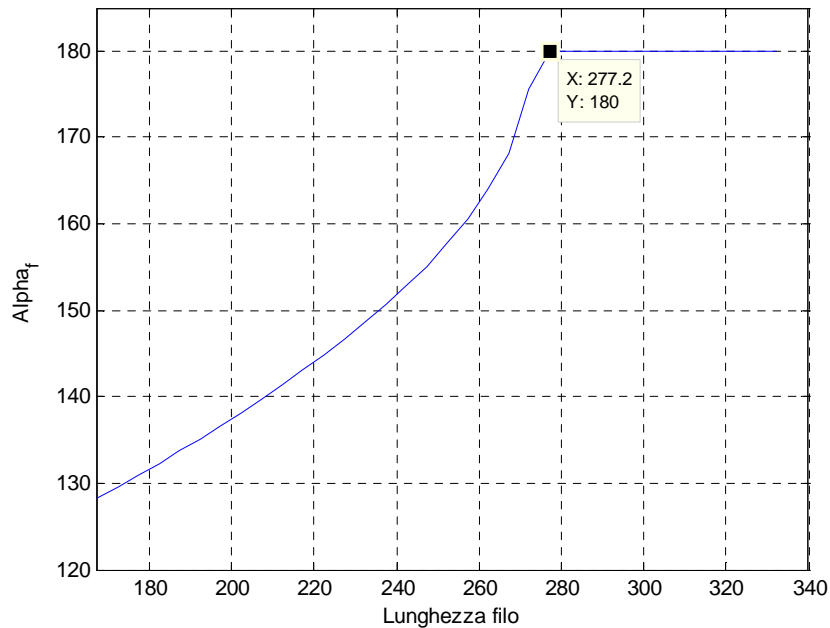


Figura 4.12 : Miglioramento del valore dell'angolo α_{finale} in funzione dell'accrescimento della lunghezza del filo in NiTi

Lo studio è stato fatto partendo dal valore di ~167 che è la lunghezza della Tibia ed aumentando la quantità di filo. L'appiattimento verso il valore di 180° è dovuto al fatto che con una lunghezza del filo a partire da 277 mm l'alzata della zampa sarebbe quasi istantanea e completa. Questo fenomeno può essere sfruttato soprattutto se in via sperimentale i risultati teorici mostrino difetti critici per il successo dell'alzata. Per ora il vantaggio che se ne potrebbe trarre non giustificherebbe la complessità realizzativa.

Prima di calcolare la lunghezza di filo che è possibile installare data la natura dei rimandi è necessario calcolare la grandezza e la disposizione delle carrucole.

Essendo l'obiettivo quello di migliorare il problema è necessario calcolare il diametro dei cilindri che volgono la funzione di carrucole in modo tale che le fibre esterne del filo non siano messe in tensione subendo un allungamento che possa essere critico.

Si considera come allungamento accettabile delle fibre esterne un aumento pari al 7% rispetto a quelle interne per cui dato il diametro del filo di 0.200 mm dobbiamo soddisfare la seguente condizione

$$\frac{R_{filo}}{R_{filo} + R_{cilindro}} \leq 0.07$$

Il che porta a considerare $R_{cilindro} \geq 1.325 \text{ mm}$

Questo è un risultato ottimale perché dovendo noi avere un braccio di 8 mm in corrispondenza del ginocchio la soluzione migliore è quella di considerare un filo unico che si avvolge intorno ad un cilindro di $D_{cilindro} = 8 \text{ mm}$ e che vada a interagire con quelli presenti all'interno del Femur. Se si effettua questa scelta dobbiamo considerare la necessità all'altezza del ginocchio di un aumento del filo necessario di ~16 mm.

All'interno del Femur è necessario mantenere lo stesso valore di diametro dei cilindri per non avere interferenza.

Una volta a conoscenza del diametro dei cilindri e del loro posizionamento è possibile calcolare la lunghezza di filo necessaria per un numero di rimandi che siano applicabili.

Numero rimandi	Lunghezza filo INIZIALE [mm]
3	~291
5	~428

Tabella 4.14 : Lunghezza di filo in NiTi necessaria nel caso di utilizzo di 3 5 rimandi

Viene scelta la soluzione con 3 rimandi che analizzando la tabella ? corrisponde all'ottenimento di un angolo che varia tra i 13° ed i 16° risultatop iù che ottimistico.

In totale si necessita di una quantità di filo pari a ~ 480 mm si dovrebbe raggiungere un valore teorico che permetta di superare H=0 e quindi elevarsi al di sopra della cerniera.

Un calcolo ottimistico che non tiene conto di eventuali difetti di lavorazione, attrito delle carrucole, risposta differente dei fili in NiTi, presenza di criticità non considerate porta ad avere un valore di

$$H = t \cdot \cos(147 - 16) - f \cdot \cos(16) = -230 \text{ mm}$$

4.3 Analisi del ritorno nella configurazione iniziale della zampa

E' stato detto che si sta lavorando sotto l'ipotesi di non avere problemi di microgravità per cui una volta effettuata l'alzata della zampa è necessario vedere se la forza peso a cui è sottoposta è sufficiente a farla ritornare nella posizione iniziale e che, soprattutto, non porti a snervamento il materiale utilizzato anche se quest'ultimo punto è improbabile visti i pesi con cui stiamo lavorando e considerando che i fili utilizzati hanno una buona capacità di recupero.

Nel caso in cui la forza a cui è soggetto non sia sufficiente sarà necessario introdurre un sistema che faccia si che vi sia il ritorno alla posizione di partenza o, in caso di camminata, di appoggio.

Le possibilità eventualmente attuabili sono un sistema di attuatori antagonisti posti sullo stesso piano di quelli già installati oppure posti in posizione speculare col problema però che siano di ingombro durante l'avanzata. Altra soluzione di

cui si parlerà in breve di seguito sono l'apposizione di molle sia torsionali che lineari.

Verifichiamo quindi che il dimostratore tecnologico sia in grado di effettuare l'alzata ed il ritorno senza nessun tipo di problema.

Conclusa la realizzazione in officina del pezzo secondo le modalità presentate nel prossimo capitolo ci ritroviamo con i seguenti pesi

<i>Peso Femur</i>	67.61 g
<i>Peso Tibia</i>	75.08 g
<i>Peso Complementi</i>	45.02 g
<i>Peso Complessivo</i>	187.71 g

Tabella 4.15 : Pesi dei componenti della zampa

Come prima soluzione si utilizza un unico filo non aspettandosi sforzi esagerati a cui dover far fronte per cui l'area che dovrà eventualmente sopportare il carico è pari a 0.0314 mm^2 .

Vista la posizione degli arti e la disposizione del filo si può considerare che la forza agente sia pari a quella dovuta al peso per cui pari a 1.877 N.

Attraverso la formula $\sigma = \frac{F}{A}$ possiamo ricavare il carico teorico equivalente che risulta

$$\sigma = 58.61 \text{MPa} \sim 59 \text{MPa}$$

Effettuiamo allora una serie di cicli di *Strain Recovery* per verificare che il materiale sia stabilizzato sotto le condizioni di carico pari a 50 Mpa e che recuperi l'intera deformazione senza avere problemi di plasticità.

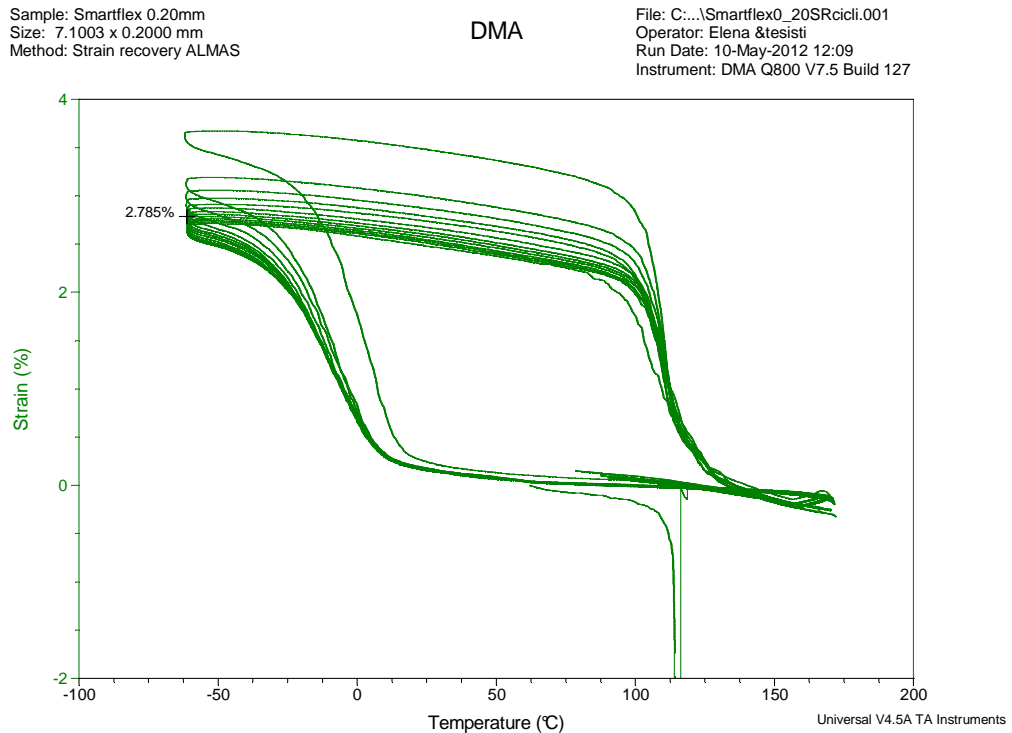


Figura 4.13 : Analisi DMA ciclica nella condizione di carico 50 MPa

Come ci si aspettava il materiale è perfettamente stabilizzato e si stabilizza intorno ad un recupero del 3% descrivendo curve perfettamente chiuse dopo pochi cicli.

Questo significa che non si avranno problemi di nessun tipo per quanto riguarda il ritorno e nemmeno sulla risposta positiva del materiale anche se quest'ultimo punto era già stato verificato nei capitoli precedenti.

4.4 Utilizzo di molle per l'attuazione della zampa ed il ritorno

L'uso delle molle non è stato considerato perché queste hanno caratteristiche meccaniche peggiori rispetto ai fili. Per quanto permettano una deformazione ed un conseguente recupero maggiore non permettono di contrapporsi a grossi sforzi. L'utilizzo eventuale che se ne farebbe sarebbe in qualità di molle volte a risolvere il problema del ritorno in caso di microgravità o nel caso in cui si

vogliamo gestire le posizioni intermedie nel mio attuatore in maniera differente dall'apposizione di più fili o dal controllo della temperatura.

Le molle di tipo torsionale verrebbero inserite in corrispondenza delle due cerniere in A ed in B per cui una volta attuata la zampa queste, causa la variazione degli angoli β ed α , si caricherebbero e poi tenderebbero a tornare nella posizione originale riportando il tutto nella posizione di riferimento. Ovviamente nadrebbero dimensionate per i sistema corrispondente.

Le molle di tipo lineare possono essere invece poste in maniera speculare rispetto agli attuatori al di sotto dell'arto volgendo così un'azione pura di ritorno. Il principio di funzionamento è lo stesso delle molle torsionale e degli attuatori antagonisti nel caso in cui non si pongano molle in lega di alluminio ma molle di NiTi. La configurazione tipo è rappresentata in figura

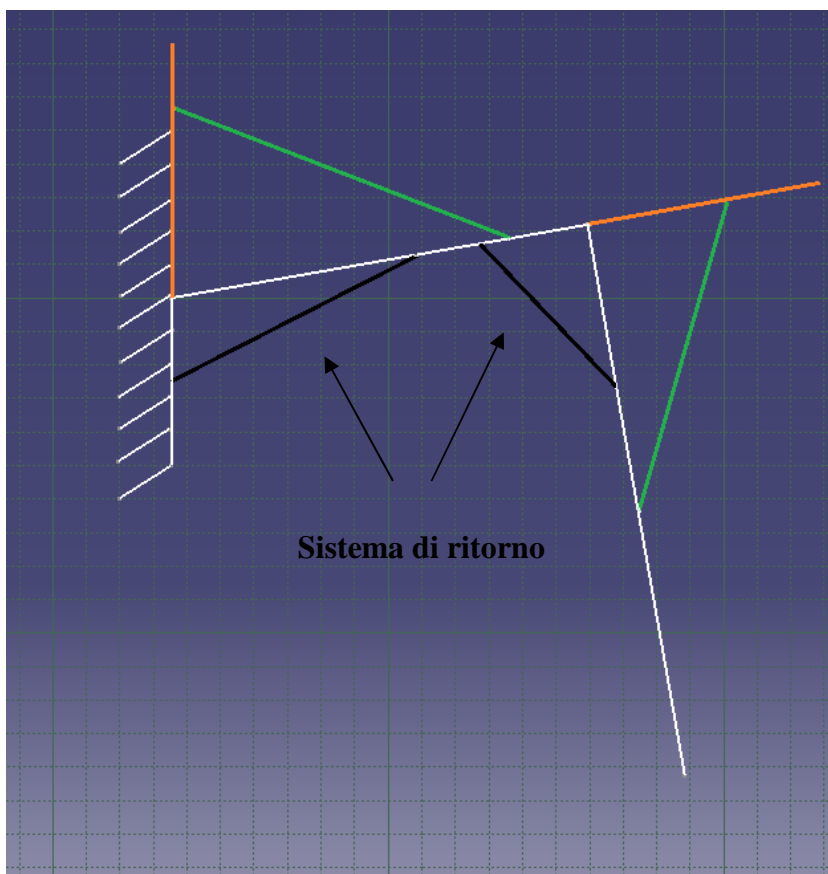


Figura 4.14 : Schematizzazione possibile sistema di ritorno

Se invece si volessero inserire delle molle che lavorano in maniera antagonista all'interno della struttura si utilizzerebbe lo schema posto di seguito in cui una molla è di semplice lega d'alluminio ed una in lega a memoria di forma.

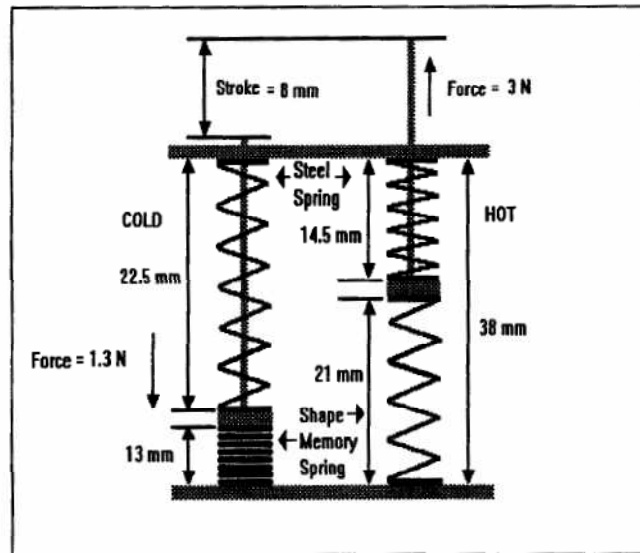


Figura 4.15 : Unione molla in lega a memoria di forma e molla di ritorno

5 Realizzazione del dimostratore e validazione sperimentale

5.1 Realizzazione della zampa attuata

La progettazione e la realizzazione della zampa sono state eseguite cercando di seguire fedelmente il progetto originale di NEMeSys. In particolare sono state replicate le medesime soluzioni strutturali e, per quanto possibile, sono state mantenute sia la geometria che le dimensioni globali dei vari componenti.

Le due misure di riferimento sono la distanza di 126 mm tra le cerniere CT – FT, ovvero la parte riguardante il Femur (in riferimento alla figura 4.2 la distanza tra i punti A e B), e la distanza di 167 mm tra FT e la fine del tubolare, ovvero la parte riguardante la Tibia (in riferimento alla figura 4.2 la distanza tra i punti B e C).

Si utilizza per la realizzazione della struttura lo stesso materiale del precedente robot, una lega di alluminio 6061-0 le cui proprietà meccaniche sono presentate in tabella

Yield stress [MPa]	55
Tensile stress [MPa]	125
Young Module [GPa]	69
Density [Kg/m ³]	2700

Tabella 5.1 : Proprietà meccaniche Al 6061-0

Per alleggerire la struttura si elimina la parte costituita dai macchinati non dovendo questi più svolgere la funzione di alloggiamento dei motori. In sostituzione si applicano delle piastrine che, oltre ad unire le parti, mantengono le distanze volute.

Il corpo Femur ed il corpo Tibia risultano così strutturati:

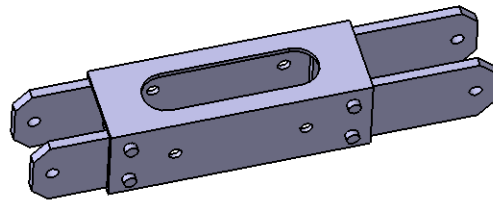


Figura 5.1 : Corpo Femur

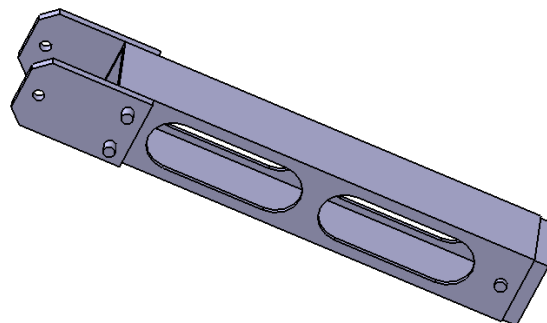


Figura 5.2 : Corpo Tibia

Il particolare del piede all'estremità della Tibia è stato riprodotto sia perché ad esso verrà fissato un estremo del filo di NiTi, sia per una questione di fedeltà al progetto originale ed eventuale sede per un sensore di posizione.

Il filo di NiTi verrà obbligato a scorrere attraverso un foro effettuato al centro della base del piede e crimpato ad un'estremità con una metodologia presentata successivamente.

Dovendo il filo essere riscaldato fino ad alte temperature, il piede deve essere costruito in un materiale che resista a temperature dell'ordine dei 150° (sovradimensioniamo il tutto per questioni di sicurezza) e che sia isolante per limitare ogni possibile dissipazione di potenza.

Il materiale scelto è teflon e sarà lo stesso materiale con cui verranno realizzati i cilindri sui quali verrà avvolto il filo.

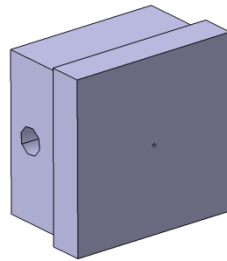


Figura 5.3 : Piede

L'assemblaggio del corpo Femur e corpo Tibia avviene tramite delle cerniere costituite da cilindri pieni in alluminio filettati ai capi così da permetterne la chiusura.

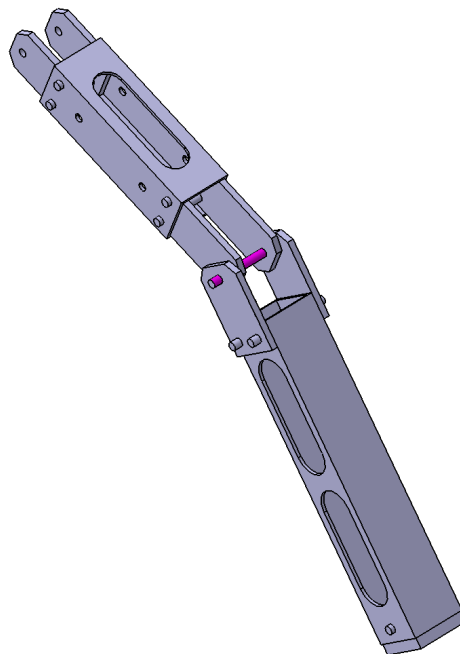


Figura 5.4 : Assemblaggio Zampa

Si noti il particolare degli alleggerimenti realizzati lungo la struttura. Quelli della Tibia rispecchiano quelli esistenti mentre lungo il Femur vengono ricavate delle finestre non più laterali ma sulle superfici superiore ed inferiore. Questa modifica viene fatta per permettere facile accesso al filo posto all'interno che andrà avvolto manualmente sulle carrucole. Infatti lo spazio ricavato dall'eliminazione dei motori lungo la struttura e, nel particolare, lungo il corpo Femur viene sfruttato per l'inserimento dei cilindri che svolgono la funzione di carrucole.

Come detto questi si realizzano in teflon per i motivi già spiegati e su di esse si effettuano delle scanalature in numero variabile a seconda dell'utilizzo; ciò significa avere due scanalature per i cilindri che andranno inseriti nel Femur ed un'unica scanalatura per quello in posizione ginocchio. Entrambe vengono realizzate perpendicolari all'asse di rotazione, anche se, per un futuro miglioramento, è consigliabile dar loro un'inclinazione di $\sim 30^\circ$ così da armonizzare il percorso del filo. Infine, per evitare che il filo esca dalla sede, la gola della scanalatura viene realizzata con un raggio maggiore rispetto al raggio del filo di almeno il 10 %.

I cilindri vengono infine forati ed appoggiano su un cilindro pieno in alluminio fissato alla struttura, su cui devono ruotare. E' necessario minimizzare l'attrito e soluzione ideale sarebbe l'uso di cuscinetti a sfera.

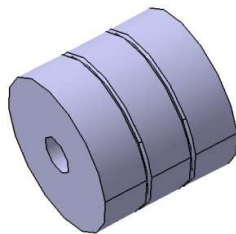


Figura 5.5 : Cilindro doppio rimando

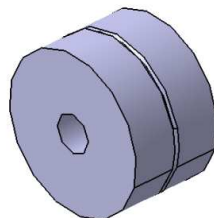


Figura 5.6 : Cilindro singolo rimando

Si fissa il tutto ad una struttura massiccia che simula la rigidità del corpo del rover.

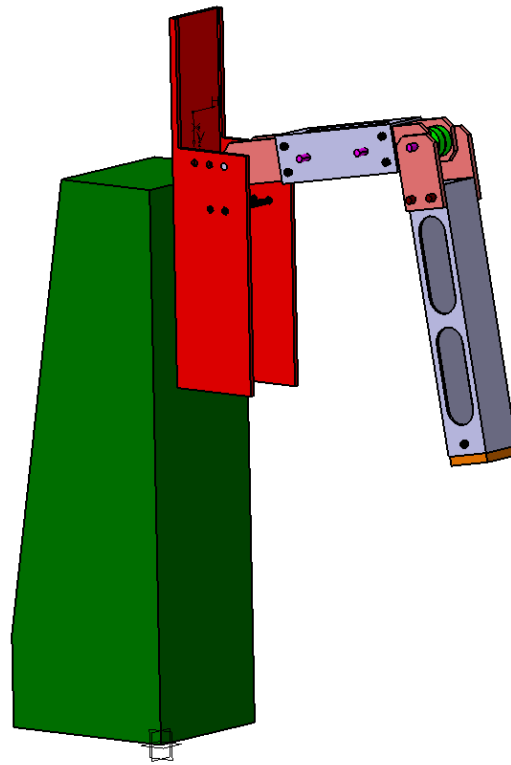


Figura 5.7 : Struttura completa

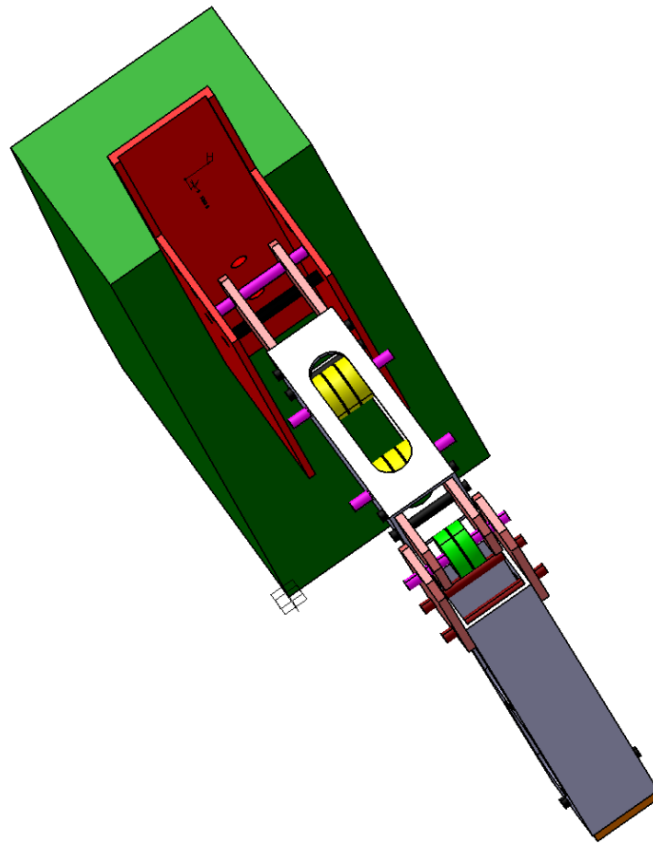


Figura 5.8 : Struttura completa vista dall'alto

Sul supporto che collega la zampa alla base (in rosso nelle figure 5.7 e 5.8) sono stati apportati degli accorgimenti che permetterebbero eventuali modifiche nel caso in cui nascano problemi in fase di sperimentazione.

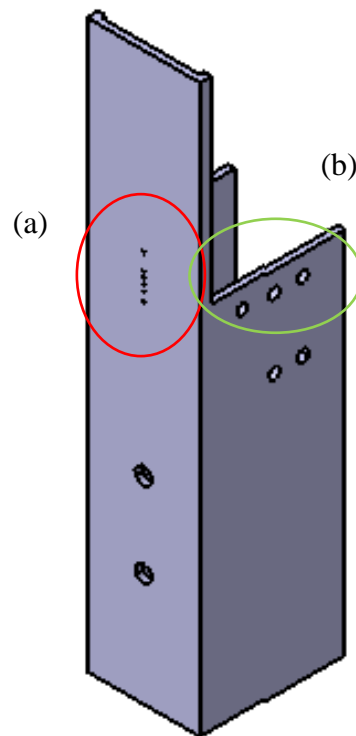


Figura 5.9 : Accorgimenti sugli attacchi

L'accorgimento (a) è necessario nel caso in cui si debba cambiare la posizione dell'attacco sulla verticale. Sono stati fatti più fori in valori di interesse ed, ovviamente, 14 mm.

L'accorgimento (b) permette invece di variare la distanza fra la zampa ed il corpo. La cerniera può essere avvicinata alla struttura da un valore di 30 mm fino ad un valore di 10mm.

L'appoggio della zampa sul terreno è stato simulato ponendo dei vincoli che mantenessero l'arto in posizione corretta ($\beta = 90^\circ$, $\alpha = 80^\circ$), assunta come posizione di riferimento.

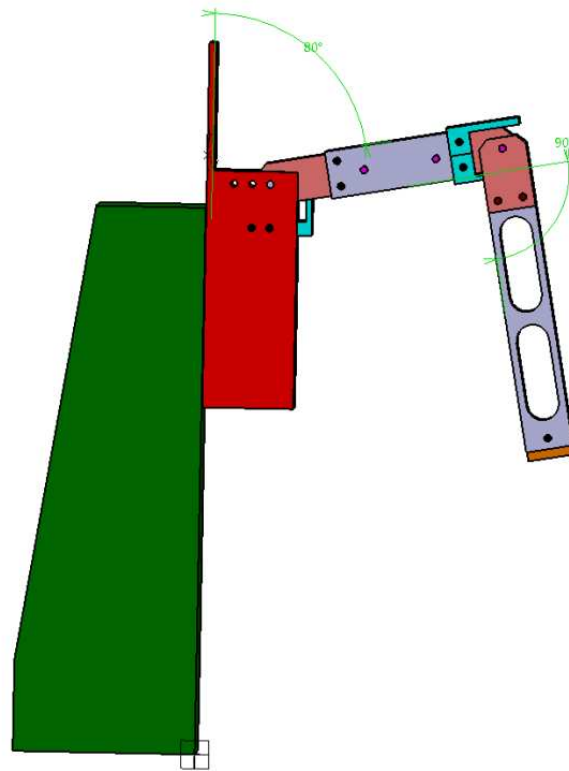


Figura 5.10 : Configurazione iniziale – Verifica dei blocchi

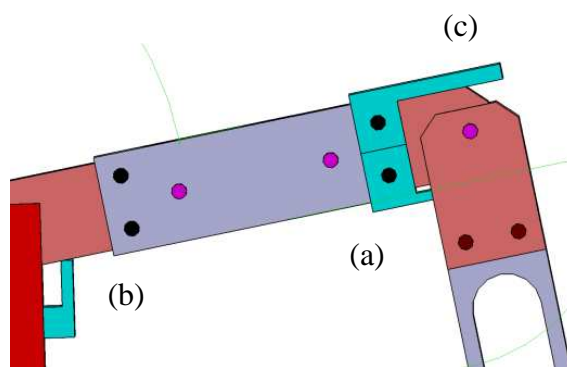


Figura 5.11 : Blocchi

Questi appoggi costituiscono un blocco nella posizione iniziale di riferimento pur lasciando piena libertà nel movimento dell'alzata. Il blocco (c) costituisce invece un fermo nella condizione finale di α ed è costruito in modo che la Tibia si fermi al valore teorico. Quest'ultimo accorgimento viene fatto perché, utilizzando un unico filo, è probabile che l'intero recupero di deformazione lavori al fine di aumentare l'angolo α riducendo la variazione sull'angolo β .

In linea teorica nella posizione finale l'arto di NEMeSys si trova nella seguente configurazione

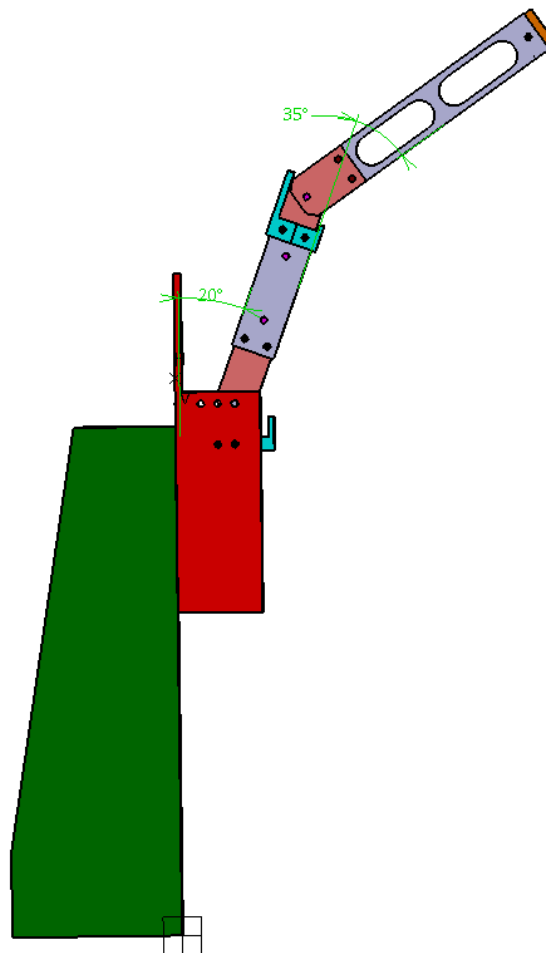


Figura 5.12 : Configurazione finale - Verifica blocchi

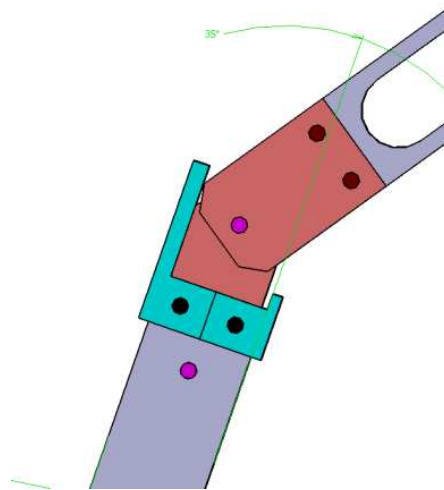


Figura 5.13 : Particolare del blocco (c)

Si noti che i blocchi, come già affermato, non danno nessun tipo di fastidio o problema al movimento voluto.

5.1.1 Installazione del sistema di attuazione

Prima del montaggio il filo viene sottoposto ad un riscaldamento per avere il recupero delle eventuali deformazioni presenti antecedentemente al montaggio.

È necessario poi montare il filo e bloccarlo alle estremità di modo che possa essere facilmente alimentato e che il supporto di alimentazione non interferisca con l'alzata del braccio.

Si utilizza un sistema di crimpaggio attraverso l'utilizzo di capicorda di dimensioni ridotte visto il diametro del filo da utilizzare. Da un lato i capicorda presentano una sede in cui si può far scorrere il filo una o più volte a seconda dell'esigenza e bloccarli mentre, dall'altra, vi è un ancoraggio su cui vengono fissati i cavi di alimentazione.



Figura 5.14 : Sistema di crimpaggio

Nella parte estrema della Tibia vi è il piede in teflon a cui è stato applicato un piccolo foro come spiegato. Nella figura vi è il dettaglio



Figura 5.15 : Crimpaggio filo all'estremità inferiore

Dal lato del supporto il filo passa attraverso uno dei fori realizzati ed in seguito fissato con lo stesso sistema di crimpaggio. Il fissaggio è permanente per cui è necessario fare attenzione che la configurazione della zampa in cui viene serrato il filo sia adeguata a conferire al filo la deformazione voluta portando la zampa nella posizione iniziale di riferimento. Una volta alimentato lo SMA si riscalda e si ha il recupero della deformazione.

Il fissaggio all'estremo del supporto è mostrato in figura 5.16

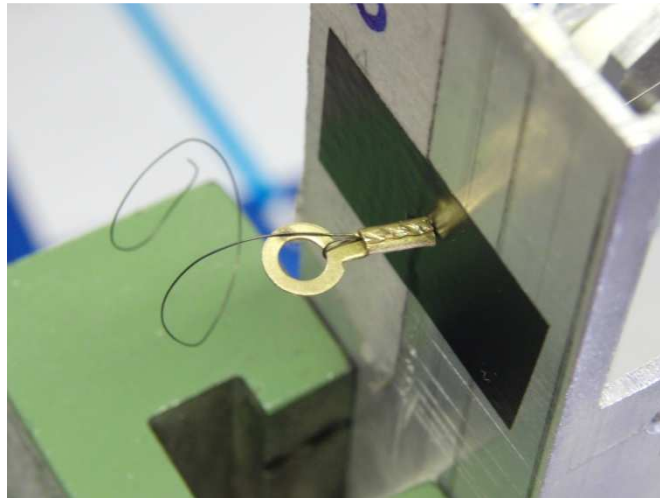


Figura 5.16 : Crimpaggio filo all'estremità superiore

Il filo percorre una traiettoria ben precisa. Partendo dal piede segue l'asse del corpo della Tibia fino al ginocchio dove si avvolge sul primo cilindro

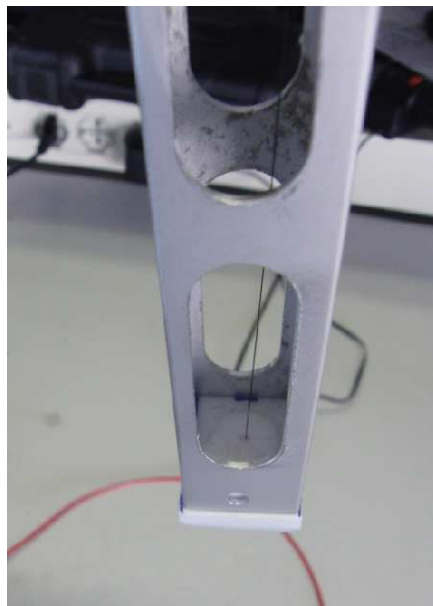


Figura 5.17 : Percorso del filo all'interno della Tibia

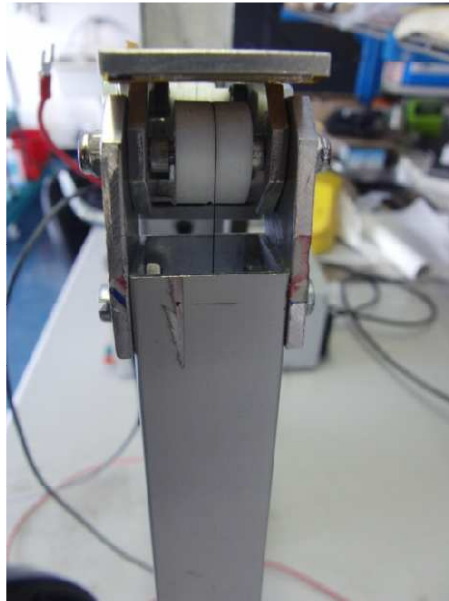


Figura 5.18 : Percorso del filo all'altezza del ginocchio

Superato il ginocchio si avvolge sui due cilindri di teflon all'interno del corpo del Femur con una traiettoria ad otto.



Figura 5.19 : Percorso del filo lungo il corpo Femur – Vista dall'alto

Infine il filo esce dall'ultima scanalatura del secondo cilindro e viene fissato alla struttura

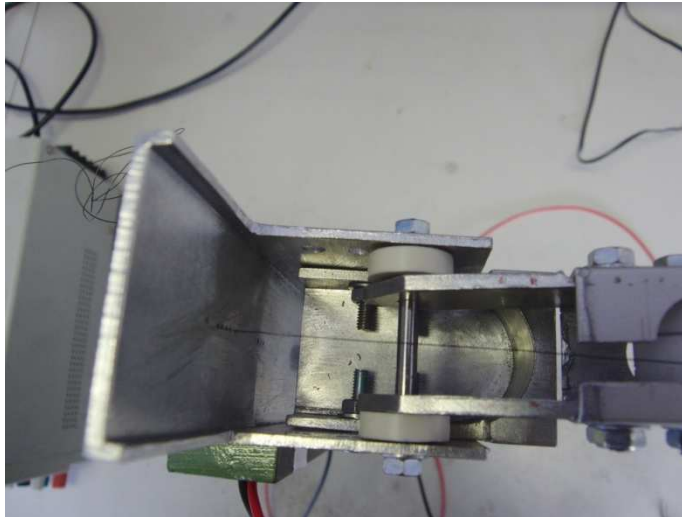


Figura 5.20 : Percorso del filo all'uscita del corpo Femur

Si noti che è stato necessario realizzare una piccola fresatura sul corpo del Femur per evitare interferenza tra filo e tubolare.

E' buona norma usare cautela nell'avvolgere il filo, sia per ridurre eventuali danni sia per evitare che si deformi in maniera eccessiva correndo il rischio che entri nel campo plastico.

Fatto avvolgere correttamente il filo e crimpato dando una pretensione è possibile passare all'alimentazione del sistema.

Necessitiamo un'alimentazione che generi 5 Ampere ed una differenza di potenziale dell'ordine dei 30V. Non sono necessarie alte tensioni ma si vuole poter lavorare con precisione sui valori di tensione. Il controllo sull'uscita deve essere costante poiché all'aumentare della temperatura del filo e di conseguenza della sua lunghezza e resistenza bisogna modificare l'input al sistema.

Viene utilizzato un alimentatore DC GW-INSTEK SPS-3610 avente uscita nominale 36 V e 10 A mostrato in figura



Figura 5.21 : Alimentatore utilizzato - GW-INSTEK SPS-3610

Il dimostratore tecnologico è quindi pronto per le prove sperimentali.

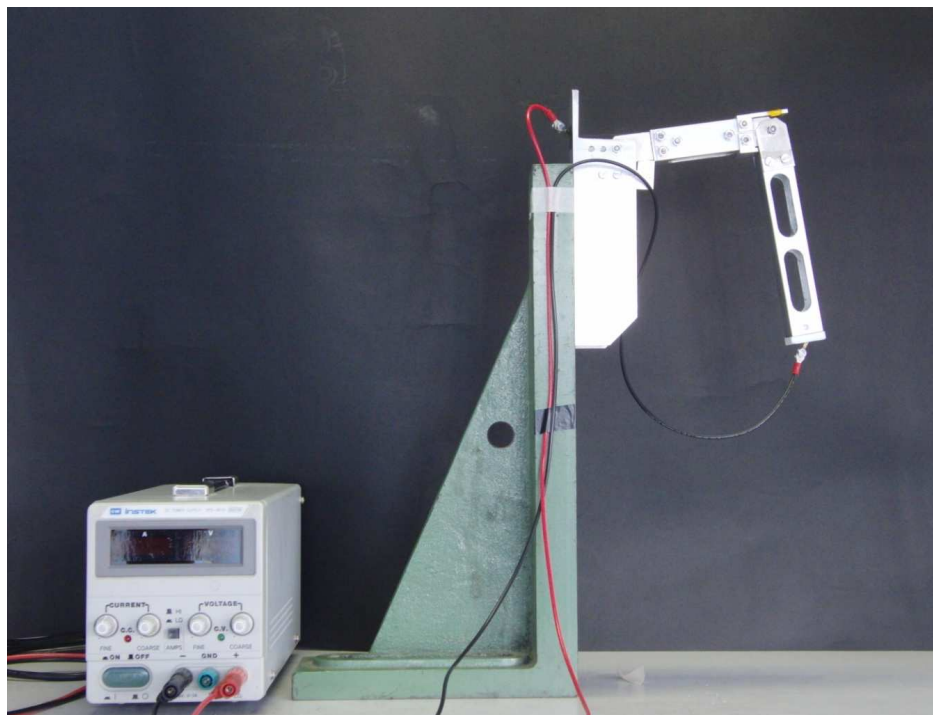


Figura 5.22 : Set up sperimentale

5.2 Prova di validazione sperimentale

Le prove sperimentali illustrate in questo paragrafo hanno avuto l'obiettivo di validare il sistema di attuazione progettato.

5.2.1 Setup sperimentale

Preparato il dimostratore tecnologico si passa alla verifica del sistema di attuazione.

Come accennato nel capitolo precedente, durante il montaggio del pezzo è necessario prendere alcuni accorgimenti al fine di non rovinare il filo e che il sistema funzioni perfettamente.

Il set-up sperimentale si compone di

- Dimostratore tecnologico
- Alimentatore DC

Nonostante il filo sia stato sottoposto ad un riscaldamento preventivo, è possibile che durante il montaggio siano state introdotte delle ulteriori deformazioni per cui il primo ciclo che verrà fatto non verrà ritenuto attendibile.

La deformazione imposta non è fisicamente misurabile ma si considera essere sufficiente a permettere l'alzata della zampa essendo stata applicata bloccando il filo in una determinata posizione ed allungandolo poi manualmente fino alla condizione di riferimento iniziale. La posizione in cui è stato bloccato si avvicina a quella finale ma, data l'ipotesi appena spiegata, di presenza di una deformazione pregressa, si preferisce che non corrisponda esattamente alla posizione finale.

Si pone infine una scala graduata per valutare l'effettivo valore dell'alzata.

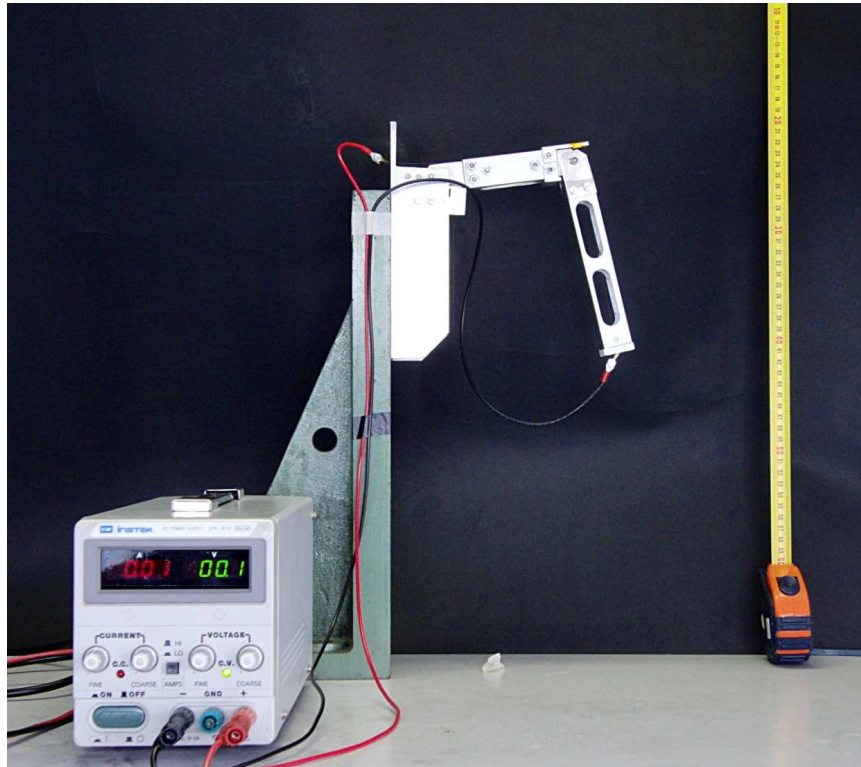


Figura 5.23 : Set up sperimentale

La posizione di partenza corrisponde ad un valore sulla scala graduata di 41.
Si riporta il dettaglio.



Figura 5.24 : Rilevamento posizione iniziale

Il risultato teorico che ci si aspetta è

	β [°]	α [°]	H [mm]
<i>Configurazione iniziale</i>	80	90	143
<i>Posizione finale teorica</i>	16	147	-230
<i>Variazione teorica</i>	64	57	373

Tabella 5.2 : Configurazione finale – Valori TEORICI

Considerando che H_{massimo} ottenibile con il sistema attuato da motori elettrici è pari a 73mm il risultato che si attende con l'utilizzo dei fili in NiTi è decisamente migliorativo.

Prima di attivare il filo se ne misura la resistenza mediante multimetro ottenendo un valori pari a 13 Ω .

5.2.2 Esecuzione della prova

Fatto ciò si procede con l'attivazione del dimostratore tecnologico. Il sistema viene controllato manualmente agendo sulla tensione di alimentazione e facendola variare in maniera attenta.

Come previsto la movimentazione della Tibia è immediata e cio si deve al fatto che è costituita da un cinematismo più semplice che richiede meno sforzo e con un braccio maggiore. Una volta che essa all'altezza del blocco e, quindi i 145° fissati in via teorica, ha inizio la variazione sull'angolo β fino a giungere ad una posizione finale in cui il sistema non è più in grado di sollevare l'arto.

In figura viene mostrato l'innalzamento dovuto alla variazione dell'angolo α e, di seguito, l'innalzamento dovuto all'angolo β corrispondente alla condizione finale.

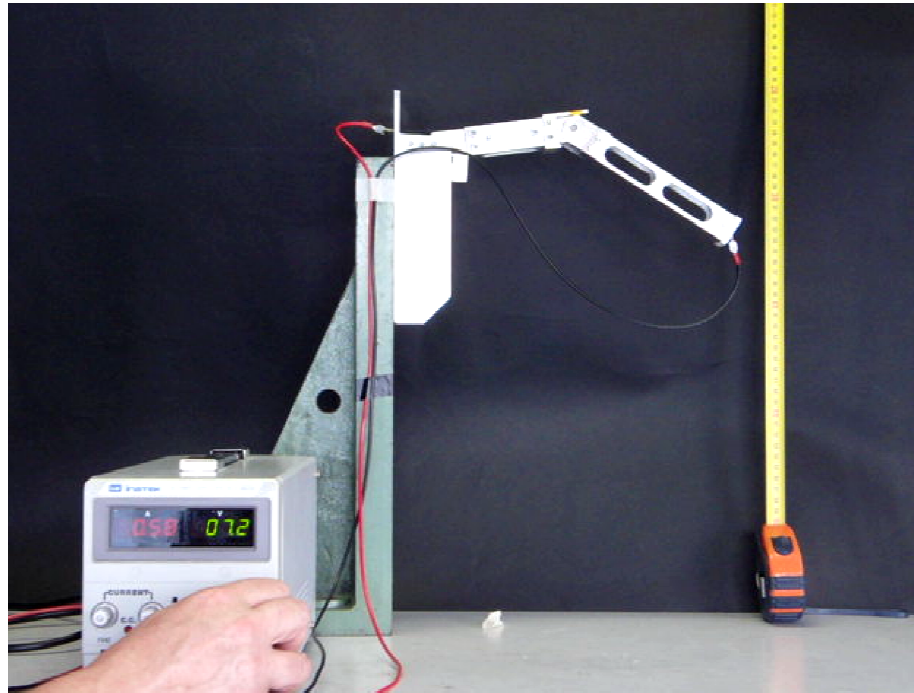


Figura 5.25 : Configurazione intermedia per $\alpha = \alpha_{\text{finale}}$ teorico

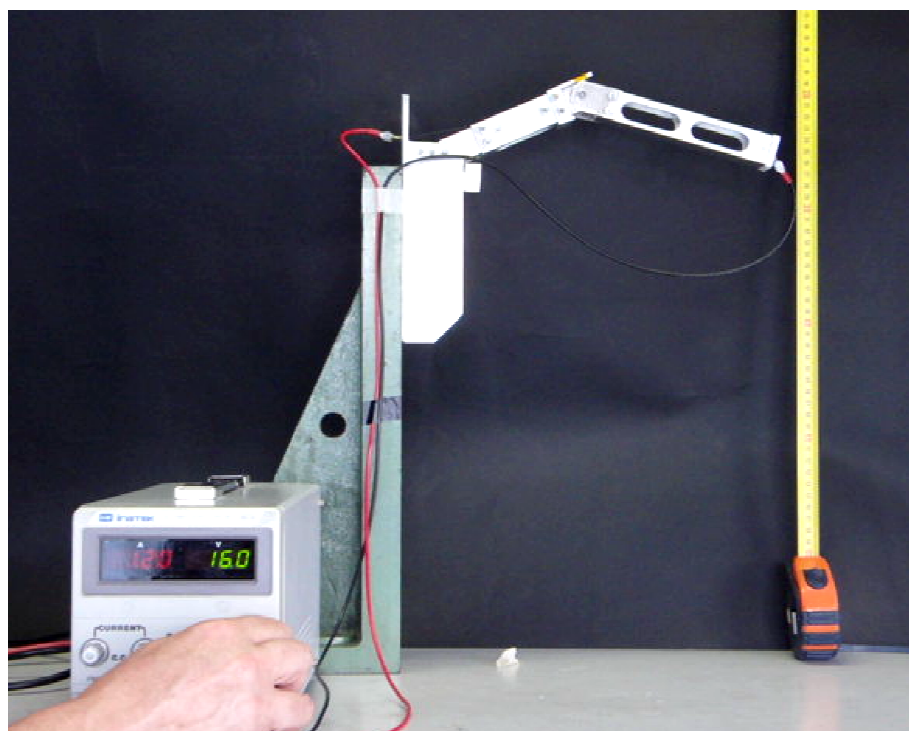


Figura 5.26 : Configurazione finale

Nella condizione finale il valore di riferimento sulla scala graduata è 25 ottenendo un ΔH di 160 mm che corrisponde ad un H_{finale} pari a -17 mm.

E' un risultato competitivo nonostante la variazione di β sia lontana dal valore teorico previsto.

Si riproposta la tabella 6.1 aggiornata coi valori sperimentali per effettuare una comparazione

	β [°]	α [°]	H [mm]
<i>Configurazione iniziale</i>	80	90	143
<i>Posizione finale TEORICA</i>	16	147	-230
<i>Variazione TEORICA</i>	64	57	373
<i>Posizione finale REALE</i>	65	145	-17
<i>Variazione REALE</i>	15	55	150
<i>Errore commesso</i>	49	2	223

Tabella 5.3 : Configurazione finale – Comparazione valori TEORICI e PRATICI

Nonostante l'elevato errore commesso su β il risultato ottenuto sul valore di H_{finale} è ottimo. Si riesce, attraverso il cinematismo implementato con attuazione attraverso fili a memoria di forma, a raggiungere un'altezza che superi l'asse della cerniera di 17 mm ed un innalzamento doppio rispetto all' H_{massimo} ottenuto con la configurazione precedente.

Mentre l'errore commesso sull'angolo α viene trascurato in quanto dovuto ad imperfezioni nella realizzazione del fermo si reputa importante analizzare le motivazioni riguardanti l'errore commesso sulla valutazione di β .

Il modello reale rispetto a quello teorico ha una prestazione nettamente inferiore al punto da ottenere una variazione angolare di soli 15° rispetto ai 64° attesi. Fortunatamente 15° è il valore minimo considerato accettabile. Anche considerando le prestazioni del filo reale minori di quelle teoriche non è comunque giustificato il risultato.

I possibili problemi che possono essersi presentati in fase sperimentale sono

- Attrito

Sono presenti nel sistema problemi di attrito dovuti sia allo scorrimento del filo sui cilindri in teflon sia dei cilindri stessi intorno ai propri perni su cui non riescono a girare liberamente. La rotazione delle carrucole è minima e, purtroppo, non aiuta lo scorrimento dei fili ai livelli voluti ed, anzi, sembrerebbe peggiorarne le prestazioni. Per ottimizzare il ruolo dei rimandi interni sarebbe necessario apporre dei cuscinetti, fare delle gole antiscarrucolamento e far sì che i fili scorrano in esse con il minor attrito possibile.

- Cinematismo

All'aumentare dell'angolo α si ha l'estensione del corpo della Tibia e questo provoca un aumento del braccio di applicazione delle forze aumentando la criticità già presente nella cerniera A e diminuendo l'efficienza del cilindro in teflon posto in B. La criticità A aumenta a tal punto che se non vi fosse presente il blocco nella posizione voluta l'angolo α aumenterebbe fino al recupero completo delle deformazioni da parte del filo ed il cinematismo implementato non sarebbe in grado di modificare l'angolo β .

Per quanto riguarda la potenza utilizzata ed il tempo di attuazione è possibile verificare che si arriva nella posizione finale con valori pari a

$$\Delta V = 16 V \quad I = 1.20 A$$

corrispondenti ad una potenza richiesta per attuare la zampa di circa 18 W.

Il processo di alzata avviene in 25 secondi ed una volta tolta l'alimentazione il braccio ritorna nella posizione iniziale in 5 secondi. Il raffreddamento è quindi ritenuto sufficientemente rapido e non è pertanto richiesto un sistema ausiliario che acceleri il processo.

Conclusioni e sviluppi futuri

Attraverso l'impiego delle leghe a memoria di forma è stato possibile realizzare l'attuazione del sistema di locomozione di un rover per esplorazione planetaria con risultati nettamente superiori rispetto al corrispondente attuato attraverso l'uso di motori elettrici comandati in corrente continua ed agenti ognuno su un grado di libertà.

Il dimostratore tecnologico è stato progettato sulla base del prototipo preesistente per esplorazione planetaria NEMeSys ed in fase preliminare ci si è concentrati unicamente sull'attuazione del singolo movimento dell'alzata.

Questo progetto di tesi è stato sviluppato sotto l'ipotesi fondamentale di lavorare nelle condizioni ambientali del laboratorio ovvero quelle terrestri.

Il risultato ottenuto è stato un aumento dell'elevazione da terra dell'estremo libero della zampa di 150 mm che corrisponde al doppio della prestazione di NEMeSys.

$$\Delta H_{\text{massimo}} \text{ motori elettrici} \quad \rightarrow \quad 70 \text{ mm}$$

$$\Delta H_{\text{massimo}} \text{ SMA} \quad \rightarrow \quad 150 \text{ mm}$$

Nonostante tutti i risultati siano apprezzabili e si siano raggiunti gli obiettivi di:

- Aumento elevazione zampa
- Diminuzione potenza necessaria
- Diminuzione degli ingombri
- Semplicità di progetto
- Autonomia

durante le prove sperimentali si sono presentati problemi sul cinematismo che hanno fatto sì che la variazione sull'angolo β sia stata inferiore di quella attesa.

Saranno allora necessarie in futuro delle migliorie sul cinematismo e sulla qualità dei rimandi per quanto riguarda sia la loro realizzazione che gli eventuali problemi di attrito presenti. Attraverso questi accorgimenti si ritiene possibile avvicinarsi al risultato teorico illustrato nel capitolo 4.

Ulteriori miglioramenti realizzabili in futuro possono essere:

- Attuazione separata su α e β

Attuare separatamente il corpo Femur ed il corpo Tibia, nonostante complichino il sistema, darebbe la possibilità di avere risultati migliori in quanto il problema del cinematismo legato all'angolo β non si presenterebbe. Il filo 1 lavorerebbe unicamente per l'angolo β ed il filo 2 unicamente su α .

Si potrebbe in questo modo attuare prima β , che non risentirebbe dell'aumento di braccio dovuto all'estensione della Tibia, ed in seguito α , che a sua volta potrebbe effettuare la corsa massima.

Nel caso di attuazione doppia entra in gioco il problema precedentemente trattato degli ingombri che potrebbe essere superato attraverso la modifica della struttura.

Bisogna inoltre fare attenzione che, nel caso dell'angolo α , la lunghezza della Tibia è sufficiente per dare ottimi risultati senza dover pensare ad eventuali rimandi mentre, nel caso di attuazione dell'angolo β , sarà necessario fare un calcolo per valutare quanto le migliorie ottenute giustifichino la maggior complessità realizzativa.
- Inserimento di più fili per il controllo delle posizioni intermedie

Sia utilizzando il cinematismo attuale sia considerando un altro tipo di soluzione è possibile prendere in considerazione l'ipotesi di inserire più fili che svolgano la funzione di attuatori.

Ogni filo può essere caratterizzato in maniera diversa così da permettere quello che può essere definito un controllo delle posizioni intermedie. In questo modo è possibile attivare il filo voluto sfruttando così un ventaglio di posizioni che, oltre a permettere un maggiore controllo, consente di risparmiare tempo (non è necessario aspettare che la zampa si sollevi completamente per superare un ostacolo di piccole dimensioni) ed energia.
- Utilizzo nastri

Altra possibilità potrebbe essere l'utilizzo di strisce in sostituzione dei fili. Questo aiuterebbe dal punto di vista dinamico dando la possibilità di lavorare con carichi maggiori. E' possibile eventualmente avere lo stesso risultato inserendo più fili che lavorano in parallelo.
- Discesa

Un problema che non è stato preso in considerazione ma che è importante nel caso in cui il sistema venga implementato in un ambiente reale, è la necessità, oltre che di alzare la zampa, di abbassarla ulteriormente rispetto alla sua posizione di riferimento. Questo problema

può non essere considerato sotto l'ipotesi di appoggio di almeno tre delle sei zampe in quanto questa condizione assicura la stabilità.

Non è però così improbabile il caso in cui l'appoggio al di sotto dello zero teorico sia necessario.

- Problemi dovuti all'ambiente spaziale

Premesso che il rover e, di conseguenza, il suo sistema di locomozione, viene progettato in funzione della missione che deve portare a termine, nei progetti futuri sarà necessario considerare le condizioni ambientali.

Qualitativamente i problemi più critici sono l'alto gradiente termico dovuto soprattutto all'assenza di atmosfera e, quindi, all'irraggiamento diretto e l'assenza totale o parziale di gravità.

Per quanto riguarda la possibilità di essere soggetti a forti carichi termici la soluzione di più facile attuabilità è l'applicazione di uno schermaggio che può essere esterno o dato dall'inglobamento dei fili di NiTi all'interno di un materiale composito. Questo, per quanto aiuti ad evitare variazioni di temperatura non volute che provocherebbero la conseguente attivazione degli SMA, aggiunge però al sistema il problema del raffreddamento. Dovrà essere quindi implementato un controllo sia per quanto riguarda il riscaldamento che per quanto riguarda l'abbassamento di temperatura.

Un'altra soluzione è l'utilizzo di superleghe a memoria di forma. Non hanno le stesse prestazioni meccaniche del NiTi ma resisterebbero ad alte temperature ed eliminerebbero la necessità di schermare l'intera struttura.

Infine vi è il problema della microgravità che comporta la necessità di attuazione per ogni grado di libertà ed in ogni direzione. Questo problema può essere affrontato tramite una soluzione ibrida che utilizza contemporaneamente SMA e motori elettrici oppure tramite l'introduzione di attuatori antagonisti.

Bibliografia

- [1] H.T.Banks, R.C. Smith, Y.Wang ; Smart Material Structures; John Wiley & Sons Ltd;1996
- [2] Ortalli F., Spalla A.; ‘Decentralized control system for a hexapod robot by using neural networks’; Master Thesis in Aeronautical Engineering, Politecnico di Milano; AA 2009-2010.
- [3] N.Amati, M.Chiaberge, G.Genta, E.Miranda and L.Reyneri ; ‘Walkie 6 – Awalking rover demonstrator for planetary exploration’; Space Forum vol 5;2000; pp.259-277.
- [4] G. Sala, L. Di Landro, A. Airoidi, P. Bettini; Materiale del corso ‘Tecnologie e materiali spaziali’; Cap.52; Politecnico di Milano.Dipartimento di ingegneria Aerospaziale
- [5] T.W. Duerig, K.N. Melton, D. Stöckel, C.M. Wayman; Engineering Aspects of Shape Memory Alloys; Butterworth-Heinemann Ltd, (1990)
- [6] Loughlan, J., Thompson, S.P., Smith H; ‘Buckling control using embedded shape mempry actuators and the utilization of smart technology in future aerospace platforms’; Composite Structure,58; 2002; pp.319-347
- [7] L.Colonna Preti; ‘Microattuatori in leghe a memoria di forma:sperimentazione, implementazione di leggi costitutive e validazione numerico – sperimentale’; Tesi di Laurea. Politecnico di Milano.Ingegneria Aerospaziale; A.A. 2005-2006
- [8] A.Pisciotta; ‘Progetto di un sistema motorio di un robot a più arti’. Tesi di Laurea.Politecnico di Milano.Ingegneria aeronautica;2008
- [9] P. Massioni S. Nebuloni;‘Progetto e sperimentazione di sistemi di controllo per un prototipo di robot esapode per esplorazione planetaria’;Tesi di Laurea. Politecnico di Milano.Ingegneria Spaziale; 2005
- [10] H.Cruse , C.Bartling;. ‘Movement of joint angles in the legs of a walking insect, *Carausius morosus*’; Journal of Insect Physiology,9(41):761–771, 1995.
- [11] M. Schumm, H. Cruse; ‘Control of swing movement: influences of differently shaped substrate’; Journal of Comparative Physiology, 192:1147–1164, 2006
- [12] Torri,Viscoso;’Progettazione di un’ortotesi per la riabilitazione della mano e della sua attivazione mediante leghe a memoria di forma’.Tesi di Laurea;Politecnico di Milano,Ingegneria Biomedica
- [13] J.Makaran; ‘Shape memory alloy orthotic device’; U.S.Patent;1992