

Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduzione | 3 |
| 2 | Le leghe a memoria di forma | 9 |
| 2.1 | Aspetti cristallografici della trasformazione martensitica | 10 |
| 2.2 | Gli effetti a memoria di forma | 13 |
| 2.2.1 | L'effetto a memoria di forma a una via | 13 |
| 2.2.2 | L'effetto a memoria di forma a due vie | 14 |
| 2.2.3 | La pseudoelasticità | 15 |
| 3 | Impieghi medici del Nitinol | 17 |
| 3.1 | Proprietà di pseudoelasticità | 17 |
| 3.2 | Proprietà di memoria di forma | 19 |
| 3.3 | Proprietà di "kink resistance" | 19 |
| 3.4 | Proprietà di costanza dello sforzo | 20 |
| 3.5 | Isteresi dello sforzo | 21 |
| 3.6 | Attivabilità elettrica | 21 |
| 4 | Microattuatori | 23 |
| 4.1 | Microvalvole in SMA | 25 |
| 4.2 | Micromanipolatori | 28 |
| 4.3 | Ulteriori considerazioni | 32 |
| 5 | Equazioni termo-elettro-meccaniche | 35 |
| 5.1 | Problema meccanico | 35 |
| 5.2 | Problema termico | 41 |
| 5.2.1 | Principi della termodinamica | 41 |
| 5.2.2 | Modalità di trasmissione del calore | 42 |
| 5.3 | Problema elettrico | 46 |
| 5.4 | Accoppiamento tra i campi | 49 |
| 5.4.1 | Accoppiamento termo-meccanico | 49 |
| 5.4.2 | Accoppiamento termo-elettrico | 50 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.4.3 | Accoppiamento termo-elettro-meccanico | 51 |
| 5.5 | Formulazione debole del problema | 51 |
| 5.6 | Soluzione col metodo degli elementi finiti | 53 |
| 6 | Studio di un manipolatore in SMA | 59 |
| 6.1 | Introduzione ai sistemi antagonisti | 60 |
| 6.2 | Manipolatore monolitico in SMA | 65 |
| 6.2.1 | Progetto del dispositivo | 70 |
| 6.3 | Manipolatore non monolitico: attuatore a memoria di forma saldato con componente superelastica | 84 |
| 6.3.1 | Progetto del dispositivo | 85 |
| 6.4 | Manipolatore non monolitico con due posizioni di chiusura . . | 92 |
| 7 | Conclusioni e sviluppi futuri | 99 |
| A | Effetto Peltier | 103 |
| A.1 | I dispositivi di Peltier | 107 |
| A.2 | Moduli termoelettrici commerciali | 110 |
| | Bibliografia | 111 |

Capitolo 1

Introduzione

Le leghe a memoria di forma (SMA) stanno riscuotendo sempre più successo in ambito biomedico: ciò è dovuto principalmente alle inusuali proprietà manifestate da questo tipo di materiale, prime fra tutte l'effetto a memoria di forma e la pseudoelasticità.

Date le peculiari caratteristiche di questi tipi di materiale, particolare attenzione va riservata alla fase di progettazione di dispositivi e componenti realizzate in lega a memoria di forma: la dipendenza delle proprietà di tali leghe dalla temperatura è infatti estremamente marcata, ed una completa ed esaustiva caratterizzazione del materiale non può prescindere da un'analisi termica del comportamento.

Appare dunque evidente che, per poter progettare correttamente un dispositivo realizzato in SMA, è fondamentale conoscere a fondo il comportamento del materiale in ogni suo aspetto.

Per prima cosa quindi, si introdurranno le leghe a memoria di forma e se ne descriveranno i comportamenti fondamentali che le caratterizzano. Successivamente verranno presentate altre proprietà di tali leghe, derivanti anch'esse dalla particolare forma della caratteristica sforzo-deformazione, che le rendono particolarmente interessanti per applicazioni di tipo biomedico. Ad esempio le SMA consentono di esercitare una forza costante a fronte di un ampio intervallo di deformazioni: questo aspetto può essere opportunamente sfruttato per la realizzazione di dispositivi intrinsecamente sicuri, ovvero che mantengano la forza da loro esercitata entro certi limiti di sicurezza.

Oltre alle proprietà meccaniche, vi è un'altra proprietà che rende alcuni tipi di SMA (il Nitinol ad esempio) estremamente indicate per un impiego intracorporeo: la biocompatibilità. Mediante opportuni trattamenti è infatti possibile rendere il Nitinol estremamente compatibile con il corpo umano, impedendo da una parte il rilascio di sostanze o ioni potenzialmente nocivi e consentendo dall'altra un'estrema resistenza ad agenti corrosivi. Ecco spie-

gato il perchè di una così grande diffusione di questo tipo di SMA nel campo delle endoprotesi o degli apparecchi ortodontici.

Il Nitinol è molto diffuso anche nella realizzazioni di strumenti chirurgici di ultima generazione. Nel campo della chirurgia mini-invasiva, infatti, vi è una sempre maggiore richiesta di dispositivi di piccole dimensioni, che possano essere utilizzati direttamente come strumenti chirurgici o come ausilio per l'assemblaggio di strumenti chirurgici endoscopici: questi strumenti infatti sono spesso costituiti da piccole componenti che necessitano di dispositivi, anch'essi miniaturizzati, che ne consentano una manipolazione accurata e precisa.

Le leghe a memoria di forma si prestano particolarmente bene alla realizzazione di tali microdispositivi, ciò è dovuto principalmente al fatto che esse presentano una alta densità di energia, il che consente loro di fornire un lavoro significativo anche su scale ridotte. Questa tipologia di dispositivi sta diventando via via sempre più diffusa, occupando volumi di mercato sempre maggiori. Infatti, l'impiego delle leghe a memoria di forma consente realizzazioni estremamente compatte che, in alcuni casi, consentono di integrare in un unico componente le funzioni di attuazione e di sensoristica, con indubbi vantaggi per quanto concerne la semplicità realizzativa e, conseguentemente, l'economicità dei dispositivi stessi.

Fra tutte le possibili implementazioni di microdispositivi proposte in letteratura (micropompe, micromanipolatori, microswitch...), si è deciso di focalizzarsi sulla realizzazione di un micromanipolatore, essendo questo dispositivo uno dei più promettenti.

Prima di poter iniziare a dedicarsi alla progettazione di un micromanipolatore però, è indispensabile inquadrare il problema oggetto del nostro studio. Dal momento che si prevede di attivare il manipolatore elettricamente, sfruttando l'effetto Joule, avremo necessariamente a che fare con tre problemi di natura diversa: un problema meccanico, uno termico (per quanto detto prima, avendo a che fare con le SMA, considerazioni termiche sono imprescindibili) ed un problema elettrico. Verranno dunque presentate le equazioni relative a questi problemi e, successivamente, verranno discusse le varie relazioni esistenti fra di essi.

Una volta introdotto il problema nella sua interezza, si descriverà la procedura utilizzata per procedere alla sua soluzione, procedura basata sul cosiddetto metodo degli elementi finiti e che ha previsto l'impiego del codice agli elementi finiti FEAP.

Quindi, una volta definiti gli strumenti e le modalità con cui verrà affrontato il problema allo studio, è possibile passare allo sviluppo di una procedura che consenta di realizzare un micromanipolatore funzionante: infatti, per

quanto in letteratura si trovino svariati esempi di un tale dispositivo, non viene quasi mai fornita una procedura valida per la sua progettazione.

Dal momento che il funzionamento del dispositivo si basa su di un meccanismo antagonista, sarà opportuno considerare, almeno inizialmente, delle casistiche relativamente semplici di tale meccanismo, in modo da comprenderne a fondo il funzionamento.

La procedura di progettazione si basa su una caratterizzazione delle singole componenti del manipolatore nel piano forza-spostamento e sulla successiva creazione di una rappresentazione complessiva, in base alla quale sia possibile prevedere il comportamento del dispositivo completo. In base al comportamento desiderato, sarà possibile andare a scegliere il valore da utilizzare per i parametri di progettazione del dispositivo.

Una volta definita la procedura di progettazione, la si può applicare per realizzare un micromanipolatore monolitico in SMA, la cui geometria è già stata proposta in letteratura, in modo da dimostrare l'efficacia dell'iter di progettazione introdotto. Il dispositivo risulta composto da due componenti principali: un attuatore lineare ed uno rotazionale, entrambe realizzati in SMA, che lavorano in maniera antagonista. Dal momento che queste due componenti sono realizzate con lo stesso materiale, è possibile ricavare il dispositivo dalla stessa lastra di SMA, con notevoli vantaggi per quanto riguarda la semplicità realizzativa.

Dopo aver validato la metodologia di progettazione su di un caso già discusso in letteratura, ci si è dedicati allo sviluppo di una variante del dispositivo inizialmente considerato: anche tale variante prevede l'accoppiamento di due componenti, questa volta però non saranno entrambe le componenti a manifestare l'effetto a memoria di forma: l'attuatore rotazionale del dispositivo precedentemente considerato sarà ora sostituita da una componente di egual geometria, ma realizzata in lega pseudoelastica. Questa variante di dispositivo presenta il vantaggio di evitare il riscaldamento dell'oggetto afferrato, dal momento che l'attivazione avviene riscaldando solo l'attuatore lineare (che rappresenta l'unico elemento attivo del micromanipolatore considerato). Tale vantaggio è estremamente interessante in vista di una possibile impiego del dispositivo come strumento chirurgico. Dal momento che le due componenti presentano caratteristiche differenti, non sarà più possibile una realizzazione monolitica: le due parti verranno ricavate da due lastre diverse e, successivamente, saldate fra loro mediante opportuna tecnologia.

Teoricamente sarebbe possibile utilizzare l'effetto Joule per attivare anche per questa variante del dispositivo, tuttavia si correrebbe il rischio di non poter raggiungere frequenze operative significative: infatti, dal momento che solo una delle due componenti è attiva, la velocità con cui il dispositivo si chiude e si riapre dipende sostanzialmente dalla velocità con cui tale compo-

nente riesce a riscaldarsi e a raffreddarsi. Dal momento che il raffreddamento può richiedere anche tempi relativamente lunghi, sarebbe auspicabile riuscire a realizzare sia un riscaldamento che un raffreddamento diretto dell'attuatore lineare. Questo obiettivo può essere realizzato andando ad utilizzare un modulo di Peltier, ovvero un dispositivo termoelettrico in grado sia di fornire che di assorbire calore e del quale siamo in grado di controllare la temperatura (App.A). Nonostante non sia stato possibile trovare delle indicazioni relative alle tempistiche necessarie ad un dispositivo di Peltier per raggiungere una certa temperatura impostata, si pensa che tali tempistiche siano compatibili con una frequenza operativa del micromanipolatore adatta alla maggior parte degli utilizzi. Tale ipotesi andrà debitamente verificata in studi futuri.

Proprio in virtù del fatto che in questa seconda variante di manipolatore viene utilizzato un dispositivo di cui siamo in grado di controllare la temperatura con una certa finezza, è possibile pensare di realizzare un'ulteriore versione del manipolatore che presenti due posizioni di chiusura stabili, ampliando in tal modo la funzionalità del dispositivo stesso. Il grado di chiusura del dispositivo, infatti, dipende sostanzialmente dalla temperatura che viene raggiunta nell'attuatore lineare: prevedendo due differenti temperature di riscaldamento dunque si potrà facilmente raggiungere l'obiettivo di realizzare un manipolatore a due gradi di chiusura. Nel progettare questa variante di dispositivo verrà evidenziato un comportamento particolare che troverà riscontro nelle simulazioni numeriche, confermando ulteriormente la validità della procedura di progettazione introdotta.

In definitiva gli obiettivi che si vogliono raggiungere nel presente lavoro sono i seguenti:

- Definizione di una procedura di progettazione valida per la realizzazione di micromanipolatori basati su due componenti antagoniste
- Validazione di tale procedura su di un dispositivo presentato in letteratura
- Progettazione e simulazione di una variante del dispositivo proposto, impiegante una componente puramente passiva pseudoelastica e una memoria di forma
- Progettazione e simulazione di una variante del dispositivo che consenta di realizzare due differenti gradi di chiusura

Per completare questo nostro studio, sarebbe interessante realizzare fisicamente alcuni dei manipolatori proposti ed andare a valutare quanto le

simulazioni eseguite siano valide nel predire il comportamento reale. Le prove sperimentali sul dispositivo sarebbero anche utili per determinare il grado di resistenza dei dispositivi, nonché per valutare la resistenza a fatica del manipolatore sottoposto a cicli ripetuti di apertura e chiusura. Purtroppo in questa prima fase non è stato possibile effettuare tali prove sperimentali e ci si è dunque limitati allo studio preliminare basato su simulazioni numeriche.

Capitolo 2

Le leghe a memoria di forma

Le leghe a memoria di forma, o SMA (dalla loro denominazione inglese *Shape Memory Alloy*), presentano delle proprietà estremamente interessanti che fanno loro meritare a pieno titolo di essere annoverate fra i cosiddetti “materiali intelligenti”. Le SMA sono infatti in grado di rilevare la presenza di una serie di stimoli di varia natura e di innescare a fronte di essi una risposta determinata. Proprio questa loro caratteristica di reagire attivamente al presentarsi di uno stimolo fisico consente la realizzazione di sistemi compatti che riescono a svolgere contemporaneamente sia una attività di sensore sia quella di attuatore, caratteristica che si rivela estremamente desiderabile per la realizzazione di dispositivi miniaturizzati. A differenza dei materiali tradizionali, in cui i cambiamenti di forma sono dovuti solamente a contributi di tipo elastico, termico o plastico, nel caso delle SMA si individuano tre ulteriori contributi derivanti dalla proprietà che prende il nome di *memoria di forma* e che si manifesta nei seguenti tre effetti:

1. **Effetto a memoria di forma ad una via (*one-way*):** questo effetto è caratterizzato dalla capacità delle SMA di recuperare, completamente o in parte, la deformazione plastica ottenuta in seguito all’applicazione di un carico al di sotto di una temperatura caratteristica. Il recupero della forma indeformata avviene riscaldando il materiale al di sopra di una certa temperatura caratteristica specifica per il materiale impiegato e determinata dai trattamenti a cui il materiale è stato sottoposto.
2. **Effetto a memoria di forma a due vie (*two-way*):** questo effetto comporta, oltre al recupero di forma mediante riscaldamento, descritto qui sopra, anche il recupero di una forma predeterminata a seguito di un raffreddamento al di sotto di una temperatura caratteristica. Per raggiungere questo effetto è tuttavia necessario procedere all’ “allena-

mento” del materiale, ossia ad un opportuno trattamento meccanico dello stesso.

3. **Pseudoelasticità:** tale comportamento consiste nella capacità di recuperare grandi deformazioni ottenute a seguito dell’applicazione di un carico. Il comportamento complessivo è assimilabile ad un comportamento elastico, anche se l’entità della deformazione che può essere recuperata può arrivare fino all’8% poiché il meccanismo originante la pseudoelasticità si discosta notevolmente da un comportamento elastico propriamente detto. Proprio per questa ragione, è preferibile non utilizzare il termine di *superelasticità*, spesso utilizzato per descrivere questo comportamento, essendo il comportamento solamente in apparenza elastico.

Il meccanismo alla base dei fenomeni appena descritti è costituito essenzialmente da una trasformazione di fase reversibile, detta *trasformazione martensitica*. Tale trasformazione avviene con il passaggio da una fase solida, stabile ad alte temperature, detta austenite (A) ed una fase, anch’essa solida, ma stabile a basse temperature e nota con il nome di martensite (M). Nel corso di questa trasformazione, gli atomi si muovono in maniera coordinata e possono così determinare un cambiamento macroscopico nella forma del materiale, nonostante gli spostamenti dei singoli atomi siano di piccolissima entità. La trasformazione di fase è caratterizzata da una accentuata isteresi che risulta caratterizzata da 4 temperature. La trasformazione da martensite ad austenite inizia ad una temperatura denominata A_s e si completa in corrispondenza di una temperatura chiamata A_f con $A_f > A_s$. Un discorso analogo vale per la trasformazione inversa (ossia per quella da austenite a martensite): in questo caso la temperatura di inizio della trasformazione di fase sarà indicata con M_s e la temperatura a cui il processo termina si indica con M_f . In questo caso però avremo che $M_f < M_s$.

Solitamente gli effetti a memoria di forma vengono rappresentati con l’ausilio di un diagramma stress-deformazione-temperatura ($\sigma - \epsilon - T$), come verrà mostrato in seguito.

2.1 Aspetti cristallografici della trasformazione martensitica

Per poter spiegare la genesi dei comportamenti a memoria di forma, è necessario esaminare con un certo dettaglio la trasformazione martensitica e, quindi, il passaggio da martensite ad austenite e viceversa. Una delle caratteristiche principali della trasformazione di fase da martensite ad austenite

è rappresentata dal già citato movimento coordinato degli atomi che ne formano la struttura cristallina. Le tipologie di trasformazione con cui si può avere un passaggio di fase solido-solido sono essenzialmente due:

1. **Trasformazioni diffusive:** si tratta di quelle trasformazioni in cui si ha un cambiamento della struttura chimica del materiale, come conseguenza della rottura del reticolo cristallino durante il passaggio di stato. Poichè questa trasformazione avviene in seguito al movimento di atomi, essa dipenderà tanto dal tempo quanto dalla temperatura.
2. **Trasformazioni dislocative:** sono trasformazioni caratterizzate da piccoli movimenti degli atomi rispetto alla loro posizione originaria. La natura chimica del materiale non viene alterata, in quanto il reticolo cristallino viene solamente a disporsi in una configurazione più stabile. Non essendo richiesta una migrazione degli atomi, il processo dipenderà solamente dalla temperatura e non dal tempo.

Le trasformazioni che si ritrovano nelle SMA sono generalmente di tipo dislocativo e vengono classificate, dal punto di vista termodinamico, come trasformazioni del primo ordine, poiché viene liberato del calore durante la trasformazione diretta (austenite \rightarrow martensite) mentre il calore viene assorbito durante la trasformazione inversa (martensite \rightarrow austenite). Andando a considerare la struttura cristallina delle SMA, si può notare che la fase austenitica è caratterizzata da un elevato grado di simmetria, mentre la fase martensitica presenta una struttura a simmetria inferiore. Il passaggio fra i due stati avviene, come già ricordato, a seguito di un movimento coordinato degli atomi costituenti la cella elementare. Sebbene i movimenti su scala atomica siano di piccola entità, essendo coinvolte molte celle è possibile che emerga un comportamento macroscopico che determina un cambiamento nella forma del materiale. La trasformazione martensitica si può verificare o per variazione di temperatura o a seguito dell'applicazione di uno sforzo. Partendo dalla fase austenitica, è possibile ottenere due tipologie di martensite, come evidenziato in Fig.2.1:

1. **Martensite “detwinned”**, derivante da scivolamento dei piani cristallini
2. **Martensite “twinned”**, in cui gli atomi si dispongono formando la struttura caratteristica a “spina di pesce”

Le trasformazione da austenite a martensite può essere suddivisa in due fasi successive: durante la prima fase si ha la *deformazione del reticolo* seguita dalla cosiddetta “lattice-invariant shear”, ossia da una fase di accomodamento della struttura cristallina deformata. Nel corso della prima fase, si

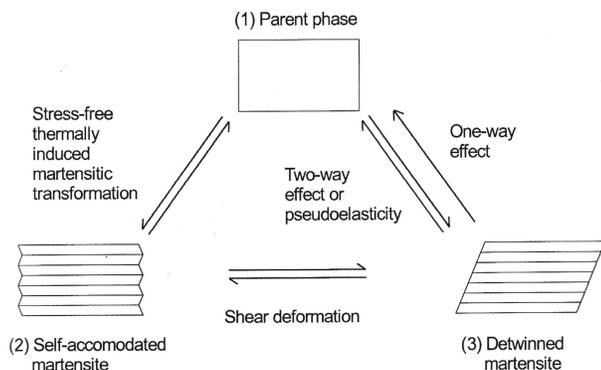


Figura 2.1: Passaggio da austenite alle due possibili tipologie di martensite

assiste ad una serie di movimenti degli atomi che determinano la nuova configurazione cristallina. La formazione della martensite avviene all'interno di un ambiente austenitico, mediante un processo di nucleazione e gemmazione rappresentato schematicamente in Fig.2.2.

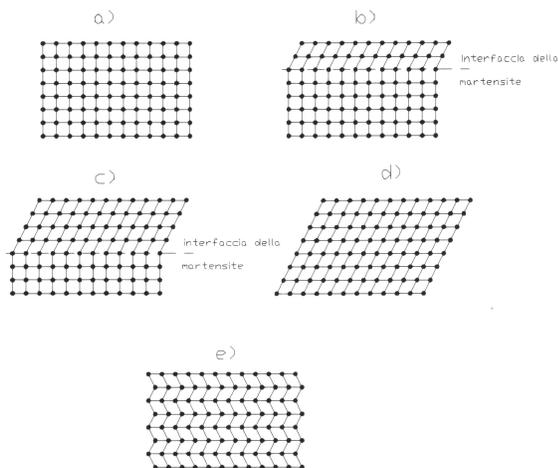


Figura 2.2: Fasi della trasformazione austenite \rightarrow martensite

Una volta che si è avuta una completa trasformazione dell'austenite in martensite, si assiste alla seconda fase della trasformazione: dal momento che la nuova fase cristallina ha forma e volume diversi dall'ambiente austenitico da cui è circondata, si avrà un accomodamento della struttura cristallina, in

modo tale da evitare discontinuità con l'austenite con cui si interfaccia. Sollecitando il materiale con uno sforzo di taglio, si potrà facilmente passare dalla forma multivariante, o "twinned", alla forma monovariante, o "detwinned", scegliendo in tal modo la variante più adatta rispetto allo sforzo applicato Fig.2.3.

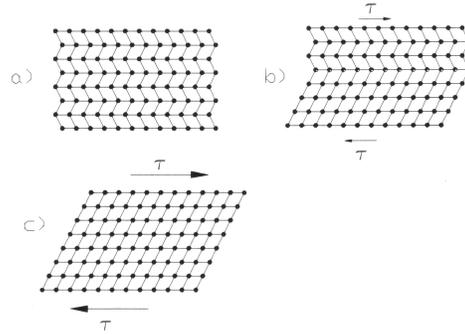


Figura 2.3: Passaggio da martensite multivariante a martensite monovariante a seguito dell'applicazione di uno sforzo

In presenza di uno sforzo esterno, la martensite orientata in maniera favorevole rispetto a tale sforzo può crescere ed espandersi a scapito di quelle orientate in un'altra direzione. Nel caso estremo, l'intero cristallo può essere costituito da un'unica variante di martensite.

2.2 Gli effetti a memoria di forma

Andiamo ora ad esaminare un po' più in dettaglio ciascuno degli effetti a memoria di forma, evidenziando i meccanismi microscopici che li determinano.

2.2.1 L'effetto a memoria di forma a una via

Per temperature inferiori a M_f le SMA presentano un limite elastico estremamente basso, la deformazione elastica è quindi immediatamente seguita da un comportamento di tipo pseudo-plastico in cui il materiale può essere deformato in maniera reversibile ancora per un range abbastanza ampio. Una volta terminata questa fase, per stress più elevati sopraggiunge una fase di deformazione plastica e quindi la rottura. Se in fase plastica viene rimosso il carico, una volta annullato lo stress il materiale presenterà una deformazione residua E_{1w} , come mostrato in figura Fig.2.4.

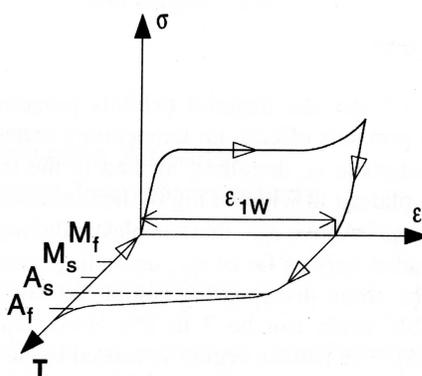


Figura 2.4: Effetto a memoria di forma oneway nello spazio sforzo-deformazione-temperatura

Tale deformazione residua può tuttavia essere recuperata, andando ad aumentare la temperatura al di sopra di A_f . Come si può evincere sempre da Fig.2.4, il recupero significativo avviene a partire da temperature superiori a A_s e si completa a temperature maggiori di A_f . Una volta recuperata la forma originaria, non è possibile determinare cambiamenti di forma ulteriori andando ad agire sulla temperatura; proprio in virtù del fatto che il cambiamento di forma si realizza solamente in seguito al riscaldamento, quindi in una sola direzione, il fenomeno viene chiamato effetto ad una via. Se durante il recupero della forma conseguente al passaggio di stato martensite-austenite, il recupero di forma viene ostacolato, si creano i presupposti per la generazione di forze anche elevate che possono essere impiegate per svolgere lavoro. Questo è il principio alla base del funzionamento di attuatori realizzati in leghe a memoria di forma. La forma che viene recuperata durante il riscaldamento è determinata prima di applicare il carico mediante opportuni trattamenti termici ed essendo quella stabile a temperature superiori a A_f ci si riferisce spesso a tale forma come *hot-shape*.

2.2.2 L'effetto a memoria di forma a due vie

Questo tipo di effetto è caratterizzato dal recupero di una forma determinata sia a seguito del riscaldamento che a seguito del raffreddamento, senza che sia richiesto un carico esterno per passare da una all'altra forma. La curva caratteristica di questo fenomeno risulta quindi essere localizzata sul solo piano $\epsilon - T$, come mostrato in Fig.2.5.

Il passaggio fra le due forme può avvenire senza rinnovare la deformazione,

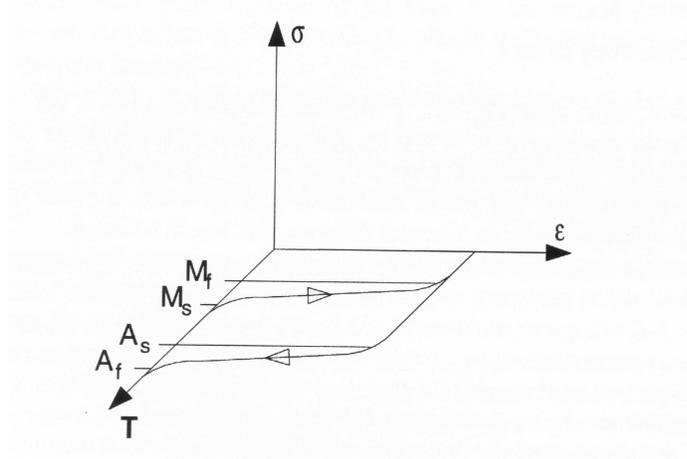


Figura 2.5: Effetto a memoria di forma a due vie nello spazio sforzo-deformazione-temperatura

tuttavia le deformazioni non possono assumere la stessa entità di quelle che vengono riscontrate nell'effetto ad una via. Il cambiamento di forma che si ottiene raffreddando il materiale è ottenuto andando a creare campi di stress ordinati all'interno del materiale, attraverso un processo chiamato di allenamento.

2.2.3 La pseudoelasticità

Nello stato austenitico, ossia per $T > A_f$, il materiale presenta un comportamento pseudoelastico. A differenza dei due fenomeni appena menzionati, in questo caso non è richiesto alcun cambiamento di temperatura affinché la pseudoelasticità possa manifestarsi. La curva caratteristica di tale fenomeno può quindi essere rappresentata nel piano $\sigma - \epsilon$ ed ha l'andamento rappresentato in Fig.2.6.

Al di sopra del limite elastico, si incontra un plateau che è la manifestazione delle deformazioni altamente non lineari che avvengono all'interno del materiale fino al raggiungimento del limite di pseudoelasticità, denominato ϵ_{pe} . Se la deformazione viene mantenuta entro tale limite, il materiale è in grado di recuperarla completamente una volta rimosso il carico. In leghe NiTi la deformazione reversibile massima può arrivare fino al 7-8%. Il plateau che si può osservare è determinato dalla trasformazione dell'austenite in martensite indotta dallo stress. Tale trasformazione di fase può avvenire solo a patto che ci si trovi al di sotto di una temperatura limite indicata come M_d .

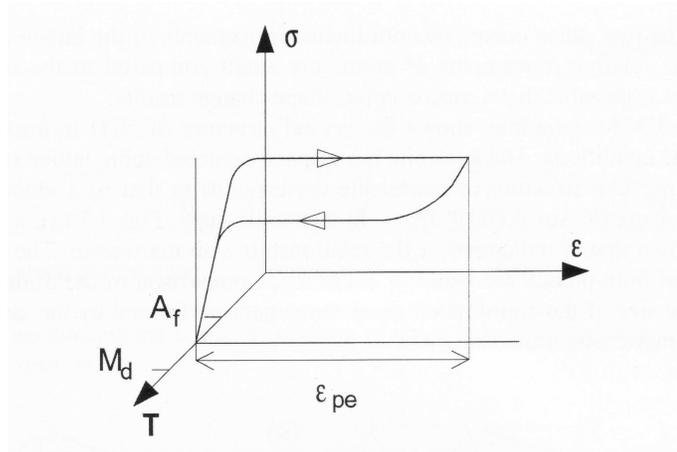


Figura 2.6: Effetto pseudoelastico nello spazio sforzo-deformazione-temperatura

Una volta rimosso il carico, dato che la martensite è instabile a temperature superiori ad A_f , la martensite tenderà a trasformarsi nuovamente in austenite, determinando il recupero della deformazione. È possibile stabilire il range di temperature in cui si manifesta il comportamento elastico mediante opportuni trattamenti termomeccanici del materiale. Per temperature superiori a M_d il materiale si presenta come un materiale convenzionale, con un'iniziale fase elastica, seguita da una plastica e quindi dalla rottura.

Come linea generale è possibile fare in modo che i tre effetti si manifestino indipendentemente l'uno dall'altro oppure con un certo grado di sovrapposizione. Ciò può essere realizzato mediante opportune scelte della temperatura operativa, della composizione chimica della lega e dalle condizioni di stress presenti all'interno della stessa.

Capitolo 3

Impieghi medici del Nitinol

La lega equiatomica Nickel-Titanio, nota con il nome di Nitinol, sta avendo un impiego sempre maggiore in campo medico. Oltre ad essere ormai impiegata per la realizzazione di stent auto espandenti, trova anche utilizzo per la realizzazione di tutta una serie di strumenti per la chirurgia a minima invasività nonché per la pratica endoscopica. Sono molteplici al giorno d'oggi le compagnie di strumenti medici che presentano nel loro catalogo dispositivi realizzati in questa lega estremamente versatile e l'interesse è giustificato dalle proprietà inusuali di questo materiale.

Come si è già visto le proprietà principali di questo tipo di materiale sono quelle delle tipiche SMA, ossia l'effetto a memoria di forma e la superelasticità. Tuttavia le caratteristiche che rendono interessante questo materiale non si esauriscono qui. Vediamo ora in dettaglio queste proprietà, mostrando alcuni esempi di come possano essere opportunamente sfruttate per la realizzazione di strumenti medici avanzati.

3.1 Proprietà di pseudoelasticità

L'elevata elasticità che caratterizza il Nitinol consente di realizzare dispositivi che possono essere facilmente introdotti all'interno del corpo mediante cateteri o altri sistemi affini. Una volta raggiunta una posizione voluta all'interno del corpo il dispositivo può quindi essere rilasciato consentendogli di recuperare la sua forma e di potersi espandere raggiungendo dimensioni notevolmente maggiori rispetto a quelle originarie. Probabilmente questa è stata la prima caratteristica del Nitinol ad essere impiegata per dispositivi medici. Un esempio è rappresentato dal Homer Mammalok (Fig.3.1).

Si tratta di un dispositivo utilizzato dai radiologi per andare a marcare la posizione di tumori al seno. Si tratta in sostanza di un uncino realizzato in



Figura 3.1: Immagine dell'Homer Mammalok che fuoriesce dall'ago usato per il posizionamento (Cfr.[6])

Nitinol che viene posizionato all'interno di un ago cavo che viene introdotto nel corpo: una volta che l'ago si trova in posizione l'uncino viene fatto fuoriuscire consentendo di andare a marcare il tumore per il chirurgo. Qualora la marcatura non fosse efficace si può far rientrare l'uncino all'interno dell'ago e procedere nuovamente al riposizionamento. Molto probabilmente le particolari proprietà di elasticità del Nitinol sono quelle maggiormente utilizzate, almeno al giorno d'oggi, in medicina. La forma del dispositivo può essere sia estremamente semplice, come quella del dispositivo appena descritto, fino ad arrivare a quelle decisamente più complesse, come quella realizzata in alcuni dispositivi per l'occlusione del setto cardiaco fra cui l'Amplatzer (Fig.3.2).

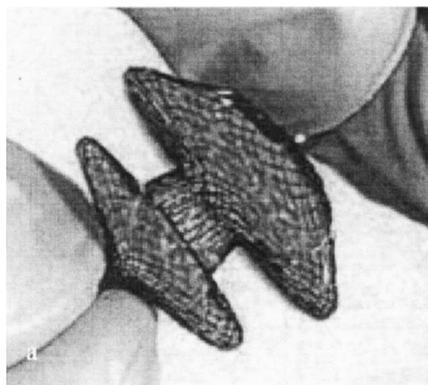


Figura 3.2: Amplatzer: dispositivo usato per risolvere l'occlusione del setto (Cfr.[6])

Tale dispositivo è realizzato con un filo di Nitinol opportunamente sagomato e viene posizionato in loco mediante cateteri del diametro di 6-9 F, dove 1 F (french) equivale a $1/3$ mm. Si comprende dunque che è fondamentale che il dispositivo sia in grado di recuperare la forma originaria una volta all'esterno del catetere.

3.2 Proprietà di memoria di forma

L'effetto a memoria di forma manifestato al variare della temperatura è alla base di tutti quei dispositivi autoespandenti come gli stent o i filtri. Dispositivi realizzati con una temperatura di fine transizione A_f inferiore a quella corporea possono essere introdotti nel corpo, avendo cura di mantenere una $T < A_f$ nella fase di posizionamento. Una volta in loco, il dispositivo viene rilasciato e la stessa temperatura corporea provvederà a fargli riacquistare la forma originaria. Il problema fondamentale di questa classe di dispositivi consiste nell'evitare che il dispositivo possa riacquistare la sua forma prima del dovuto. Bisognerà quindi confinare il dispositivo all'interno di un catetere, raffreddandolo ad esempio con della soluzione salina fredda. Alternativamente si può optare per l'utilizzo di un materiale con temperatura di transizione maggiore rispetto alla temperatura corporea. In questo caso non si correrà il rischio di un recupero di forma indesiderato, ma si dovrà riscaldare il dispositivo con un qualche mezzo esterno una volta posizionato.

3.3 Proprietà di “kink resistance”

Sebbene questa proprietà si origini dalle già citate proprietà di elasticità, essa merita una menzione particolare. Innanzitutto, con il termine di “kink resistance” si intende la proprietà per la quale una eccessiva concentrazione di sforzo viene evitata mediante una distribuzione delle deformazioni più uniforme rispetto a quella riscontrata in altri materiali tradizionali. Come conseguenza è possibile far passare un filo di Nitinol anche attraverso curve dal raggio molto stretto. Una delle prime applicazioni di questa proprietà nell'ambito medico, è stata la realizzazione di guide che consentissero di attraversare percorsi anche molto tortuosi all'interno del corpo. La capacità di manovrare un filo (ossia la possibilità di far compiere determinati movimenti di traslazione e torsione ad una estremità agendo opportunamente sull'altra) è direttamente collegata all'assenza della benché minima deformazione permanente del filo stesso. Qualora tali deformazioni dovessero essere presenti, l'estremità del filo non sarebbe più controllabile con il rischio di non poter raggiungere l'effetto desiderato o, peggio, di arrecare un qualche danno. Fili in Nitinol che manifestano la proprietà di “kink resistance” sono di grande importanza nella cardiocirurgia e nella radiologia interventista. Inoltre, questa proprietà consente la realizzazione di “basket” per l'estrazione di calcoli renali e biliari Fig.3.3 per i quali è fondamentale la manovrabilità a torsione.

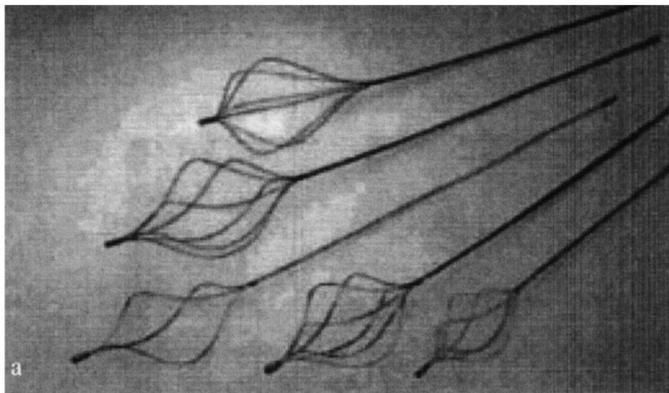


Figura 3.3: Alcuni esempi di basket usati per l'asportazione di calcoli (Cfr.[6])

3.4 Proprietà di costanza dello sforzo

Una caratteristica che balza subito agli occhi nell'osservare la curva sforzo deformazione di una SMA, è rappresentata dal fatto che le curve di carico/scarico si presentino essenzialmente piatte per un elevato range di deformazioni. Questa caratteristica apre la via alla realizzazione di dispositivi che siano in grado di realizzare un forza costante in corrispondenza di un intervallo molto ampio di deformazioni.

I fili convenzionali utilizzati per la realizzazione di apparecchi ortodontici devono essere periodicamente posti nuovamente in tensione. Infatti, col passare del tempo i denti si muovono e le forze esercitate dal filo vengono a rilassarsi, secondo la nota legge di Hook. L'impiego di fili realizzati in Nitinol consente invece di ottenere l'applicazione di uno sforzo costante per un periodo notevolmente più lungo e per un ampio range di posizione dei denti.

Il fatto che nel Nitinol si osservi uno sforzo costante durante la fase di carico viene sfruttato come meccanismo di prevenzione da sovraccarico in quei gripper, privi di cerniere, o altri meccanismi affini, realizzati in Nitinol (Fig.3.4). La forza esercitata dalle ganasce risulta essere costante, indipendentemente dalla grandezza dell'oggetto afferrato, evitando in tal modo la possibile occorrenza di arrecare danni ai tessuti. In virtù della semplicità con cui questi dispositivi sono realizzati, essi risultano estremamente facili da pulire e sterilizzare, caratteristica auspicabile per un dispositivo di impiego medico.

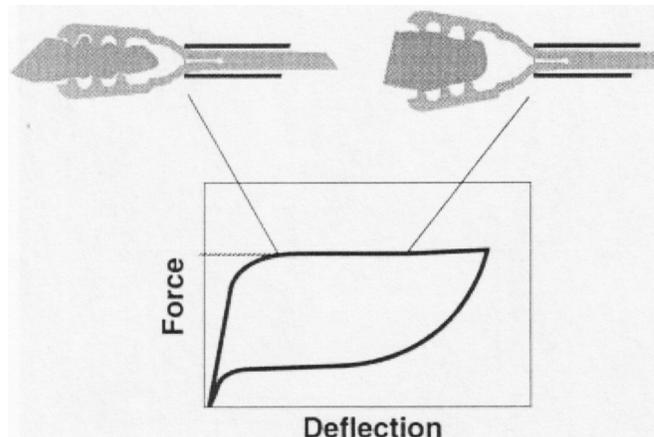


Figura 3.4: Realizzazione di un gripper privo di cerniere (Cfr.[6])

3.5 Isteresi dello sforzo

Una delle caratteristiche più inusuali che si ritrovano nel Nitinol è la presenza di una marcata isteresi negli sforzi. Dopo una fase iniziale in cui lo sforzo aumenta linearmente con la deformazione, si ha quindi una fase in cui lo sforzo cresce di pochissimo a fronte di una grande deformazione, si ha quindi un *plateau* detto di carico. La fine di questo *plateau* si ha in corrispondenza di una deformazione pari a circa l'8%. A questo punto lo stress ricomincia a crescere linearmente con la deformazione. Se al termine del plateau si comincia a scaricare, lo sforzo decresce rapidamente fino ad assestarsi su di un *plateau* detto di scarico, che ha un valore sensibilmente inferiore a quello di carico (anche del 25%). La presenza di questa isteresi così accentuata, può essere sfruttata in molteplici strumenti di impiego medico. Ad esempio, negli stent auto-espandenti si riesce a fare in modo che la forza esercitata dallo stent sul vaso sia bassa ma che, a fronte di contrazioni del vaso stesso o a compressioni esterne, manifesti una resistenza alla deformazione ben più elevata (Fig.3.5).

3.6 Attivabilità elettrica

Questa proprietà è diretta conseguenza delle proprietà termiche del Nitinol. Essendo tale lega un conduttore è possibile andare a realizzare il riscaldamento, non già mediante una fonte esterna di calore, bensì utilizzando l'effetto Joule. Questo tipo di soluzione consente di ridurre ancora di molto la complessità del dispositivo. Infatti la SMA racchiude in se stessa tanto il

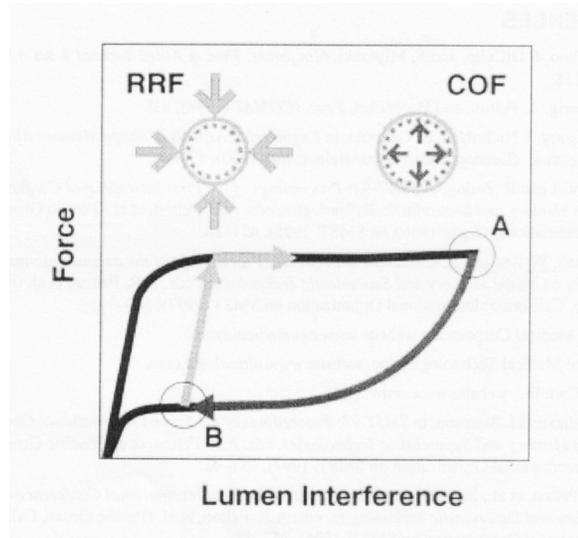


Figura 3.5: Come l'isteresi dello sforzo viene sfruttata negli stent (Cfr.[6])

meccanismo di attuazione quanto il sistema di riscaldamento necessario ad innescarlo. Sono già al progetto alcuni cateteri intelligenti che sono in grado, mediante l'impiego di una serie di attuatori SMA attivati elettricamente, di muoversi come un serpente nei vasi de paziente. I risvolti di questo tipo di catetere sono ancora difficili da quantificare, ma senza dubbio appaiono già al giorno d'oggi estremamente promettenti.

Capitolo 4

Microattuatori

Gli attuatori rappresentano dei componenti essenziali nel controllo dei processi e se ne trovano applicazioni praticamente in ogni campo tanto in sistemi macroscopici quanto in sistemi microscopici (come ad esempio nei pacemaker o nelle cosiddette stampanti bubble-jet).

Gli attuatori rappresentano di fatto l'interfaccia fra la parte di elaborazione delle informazioni di un sistema di controllo e quello che è l'effettivo sistema controllato. Generalmente il controllo di un attuatore viene realizzato tramite un segnale elettrico anche se, in linea teorica, altri tipi di segnali di controllo possono essere impiegati.

La caratteristica saliente dei cosiddetti microattuatori è quella di avere delle dimensioni tipicamente nel range dei millimetri: per la fabbricazione di tali dispositivi sarà quindi necessario impiegare avanzate tecnologie di fabbricazione, mutate ad esempio dal campo della microelettronica.

Il campo dei microattuatori è ancora molto giovane, ma negli ultimi anni ha subito una forte evoluzione, soprattutto a causa dell'aumento della richiesta di microattuatori conseguente agli enormi sviluppi nel settore della microelettronica. Al giorno d'oggi infatti, notevoli sforzi vengono indirizzati allo sviluppo di micro-sistemi nei più diversi settori partendo da quello automobilistico, passando per quello informatico fino ad arrivare a quello medico e delle biotecnologie. Una delle possibili funzioni di attuazione, richiesta in campo medico, biologico e dell'ingegneria chimica, è rappresentata dalla capacità di trattare piccoli volumi di fluido. Nel campo delle telecomunicazioni e della robotica invece si ha spesso necessità di realizzare dispositivi di posizionamento nel range delle frazioni di millimetro. La richiesta di microattuatori non è quindi settoriale, ma proviene altresì dalla quasi totalità dei settori scientifici.

La riduzione delle dimensioni degli attuatori consente di seguire approcci di controllo di tipo decentralizzato in cui parte delle attività svolte dall'unità

di controllo centrale vengono ora demandate ai sensori e agli attuatori stessi. Si prevede quindi di dotare questi sensori ed attuatori di microprocessori in modo che possano svolgere localmente operazioni di elaborazione delle informazioni, con tutti i vantaggi che possono derivare da ciò. Essendo ora gli attuatori e sensori accoppiati ad altri dispositivi, non è più possibile considerarli come sistemi isolati, sarà invece necessario considerare anche tutte le altre componenti con cui interagiscono, dando un taglio multidisciplinare alla fase di progettazione del dispositivo. Sarà infatti di primaria importanza, ad esempio, considerare come circuiti posti in prossimità del dispositivo ne determinino cambiamenti nel comportamento, a causa del calore o di radiazioni elettromagnetiche generate.

Generalmente il progetto di microattuatori è accompagnato da richieste abbastanza elevate in termini di materiali e di tecnologie da impiegare. Per questo motivo, la realizzazione di questo tipo di dispositivi risulta ancora oggi alquanto dispendiosa e, quindi, non si è ancora assistito ad un'ampia diffusione di microattuatori. Nell'ultimo periodo però si sta assistendo ad una inversione di tendenza. Le testine di stampa delle stampanti bubble-jet, che utilizzano un sistema di microattuazione, hanno un volume di mercato estremamente significativo. Inoltre, microvalvole, microposizionatori, microinteruttori meccanici stanno diventando sempre più richiesti dal momento che si vanno moltiplicando le possibili applicazioni per questo tipo di dispositivi.

La richiesta di micropompe si origina dalla necessità di controllare in maniera precisa il flusso di fluidi. A questi attuatori si affiancano microsensori e altre componenti tipiche di un sistema a fluido. Possibili campi applicativi sono quelli del monitoraggio ambientale o quello medico e al momento, notevoli sforzi sono indirizzati verso la realizzazione di questo tipo di dispositivo.

Nella realizzazione di microattuatori, due sono gli approcci che possono essere seguiti. Il primo di questi, consiste nel cercare di trasporre su piccola scala, mediante l'impiego delle microtecnologie, quei principi di attuazione tradizionalmente impiegati nel mondo del "macro". La seconda strada passa attraverso l'impiego di nuovi principi di attuazione che si rivelano estremamente promettenti. Fra questi, oltre all'effetto piezoelettrico inverso, va senza dubbio citato anche l'effetto a memoria di forma. Proprio quest'ultimo principio di attuazione, è quello che presenta le densità di energia più elevate (Tab. 4.1) consentendo di ottenere forze e spostamenti elevati ferme restando le piccole dimensioni del dispositivo. Inoltre, le leghe a memoria di forma (Shape Memory Alloys SMA) presentano anche interessanti caratteristiche che permettono di poter effettuare anche misure di posizione, di temperatura consentendo in generale di realizzare in un unico dispositivo più funzionalità con un ingombro limitato. Inoltre, a differenza di quanto accade nel caso di implementazioni macroscopiche, non si riscontrano in microattuatori realiz-

| Principio Attuazione | Densità Massime di Lavoro [J/m^3] | Ipotesi |
|--------------------------------|--|--------------------------------|
| Elettrostatico | 10^5 | $E_{max} = 1.5 \cdot 10^8 V/m$ |
| Magnetico | $4 \cdot 10^5$ | $B_{max} = 1 Tesla$ |
| Fluidico | 10^6 | $p_{max} = 10^6 Pa$ |
| Effetto Piezoelettrico Inverso | $1.2 \cdot 10^4$ | $E_{max} = 10^6 V/m$ |
| Effetto Memoria di Forma | 10^7 | $\epsilon_{max} = 4\%$ |

Tabella 4.1: Confronto fra le densità di lavoro massime generabili impiegando vari principi di attuazione

zati con SMA problemi di efficienza termodinamica; infatti, le basse velocità di trasferimento del calore vengono compensate dalle ridotte dimensioni del dispositivo. Sembra quindi che le leghe a memoria di forma siano in qualche modo predestinate all'impiego nel campo dei microattuatori.

Resta comunque da capire quale sia la strada migliore per la realizzazione effettiva di microdispositivi. I primi tentativi erano indirizzati alla mera miniaturizzazione dei dispositivi macroscopici, ma ciò non costituiva una via pratica nè tantomeno economicamente percorribile. È invece auspicabile l'impiego di metodologie innovative sulla linea di quelle impiegate con successo nella microelettronica. La disponibilità di lamine sottili ottenute mediante processi di sputtering o tecniche di rollatura ha gettato le basi per lo sviluppo degli attuatori in SMA. Inoltre, utilizzando tecnologie di taglio laser, è possibile riuscire a raggiungere il duplice obiettivo di una miniaturizzazione spinta del dispositivo unita ad una buona qualità delle superfici tagliate, a patto di scegliere un'opportuna tipologia di laser in base alle proprie necessità.

Il campo dei microattuatori SMA appare quindi estremamente vasto e multidisciplinare spaziando dalla scienza dei materiali all'ingegneria ed implicando problematiche relative al progetto, alla simulazione e alla realizzazione dei dispositivi stessi.

Allo stato attuale, fra i vari dispositivi che già hanno trovato una applicazione, vanno senza dubbio ricordate le microvalvole attuate mediante l'effetto a memoria di forma.

4.1 Microvalvole in SMA

Il funzionamento di una microvalvola, indipendentemente dal meccanismo usato per l'attuazione, è relativamente semplice.

Una microvalvola è costituita essenzialmente da un alloggiamento (costituito da due metà, una superiore che costituisce la camera di attuazione e una inferiore costituente la camera del fluido) all'interno del quale sono collocati un attuatore a memoria di forma, un distanziatore e una membrana. Tali componenti sono assemblati nel modo mostrato in figura Fig.4.1.

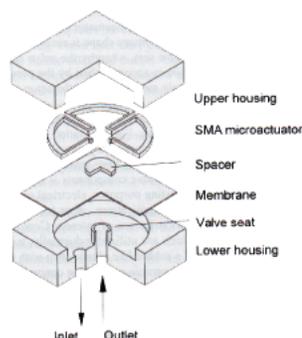


Figura 4.1: Esploso di una microvalvola con attuatore in SMA (Cfr.[1])

Come si evince da Fig.4.2, mediante una sovrappressione del fluido in ingresso rispetto a quello in uscita, si riesce ad indurre una deformazione nel microattuatore portando così la valvola nella sua condizione aperta. Partendo da questa configurazione, andando a riscaldare l'attuatore a memoria di forma, si farà in modo che esso riacquisti la sua forma originaria (sfruttando l'effetto ad una via), determinando la chiusura della valvola. La quantità di fluido che può passare durante l'apertura della valvola è determinata principalmente dallo spessore del distanziatore.

Concentriamoci ora sull'attuatore a memoria di forma. L'obiettivo che deve essere raggiunto è schematizzato in Fig.4.3.

A seconda delle pressioni in gioco e delle dimensioni previste per il dispositivo, l'attuatore dovrà essere appositamente progettato in modo che, durante la fase di chiusura la F^A permetta di controbilanciare la $F_{\Delta p}$. Una possibile geometria del microattuatore è presentata in Fig.4.4.

Il microattuatore è costituito da un insieme di beam disposti in maniera circolare. La realizzazione del dispositivo, nel caso di spessori nell'ordine dei $100 \mu m$, viene effettuata mediante taglio laser, tecnologia che nel trattare questi spessori presenta vantaggi rispetto all'erosione chimica. Per il taglio del dispositivo è stato utilizzato un laser Nd-YAG allo stato solido, tecnologia che può comportare formazione di detriti sulla faccia inferiore del microattuatore. Si può facilmente ovviare a questo inconveniente utilizzando, successivamente al taglio, un opportuno processo chimico di pulitura. Il

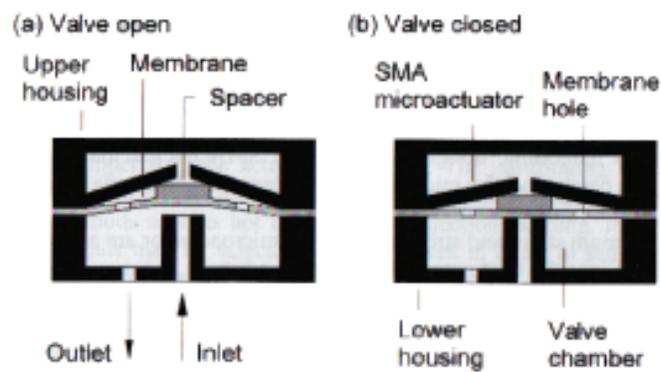


Figura 4.2: Principio di funzionamento di una valvola (Cfr.[1])

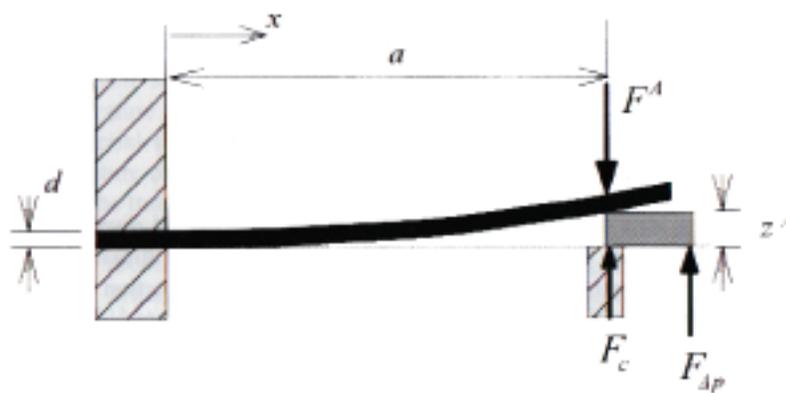


Figura 4.3: Schema delle forze in gioco durante il funzionamento della valvola (Cfr.[1])

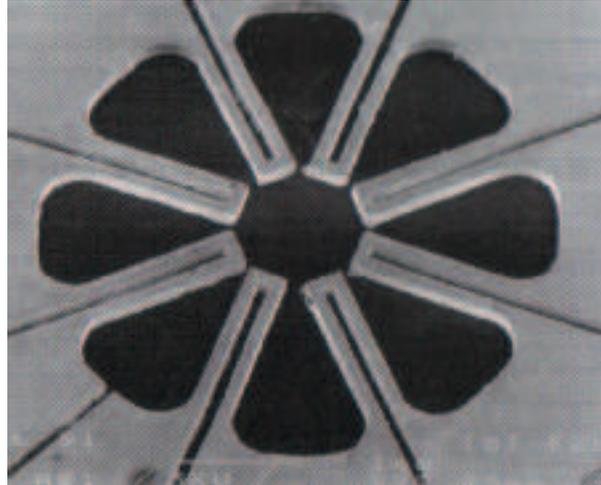


Figura 4.4: Una possibile implementazione di un microattuatore impiegato in una microvalvola (Cfr.[1])

riscaldamento originato dal laser durante la procedura di taglio non comporta nessuna conseguenza sull'effetto a memoria di forma e, pertanto, non deve costituire oggetto di attenzione particolare.

Quella che è stata presentata può essere considerata come la più semplice implementazione di una microvalvola che sfrutta l'effetto a memoria di forma; molti infatti sono i margini di miglioramento e ottimizzazione. Ad esempio, le proprietà dinamiche della valvola saranno determinate dall'efficienza di scambio del calore, aspetto di cui tenere debitamente conto nella fase di progettazione del microattuatore.

4.2 Micromanipolatori

La continua richiesta di microsistemi che integrino varie componenti, anch'esse di dimensioni ridotte, comporta la necessità di realizzare sistemi di assemblaggio adatti a tale scopo. Lo stesso campo dei microdispositivi fornisce dunque un forte stimolo alla realizzazione di microgripper e micromanipolatori. Tali dispositivi comunque, non hanno un campo di applicazione limitato all'assemblaggio di microcomponenti. Pensando agli sviluppi della chirurgia mini-invasiva, appaiono evidenti le potenzialità applicative nel campo medico-chirurgico.

Durante la progettazione di un micromanipolatore, è necessario tenere conto dei seguenti aspetti:

- Devono essere ottenute performance affidabili in termini di afferraggio e rilascio degli oggetti. Ciò significa che una volta venga afferrato un oggetto, esso rimanga saldamente fra le ganasce del manipolatore. Parimenti, una volta comandata l'apertura del dispositivo, l'oggetto afferrato deve essere effettivamente rilasciato
- Le forze esercitate sull'oggetto afferrato devono essere mantenute entro certi limiti di sicurezza
- Durante il movimento, l'oggetto afferrato non deve subire moti, ma deve mantenere l'orientamento desiderato. Solo in questo modo si riesce ad ottenere un posizionamento preciso dell'oggetto
- Deve essere osservata la compatibilità con il sistema di impiego. A seconda del campo di applicazione, possono essere richieste alcune caratteristiche aggiuntive al manipolatore, di cui si deve tenere debitamente conto durante il progetto

Le caratteristiche appena elencate, sono in genere applicabili a qualsiasi manipolatore, indipendentemente dalla scala di impiego. Tuttavia, dovendo trattare con oggetti di piccole dimensioni, sarà necessario muoversi verso la realizzazione di un manipolatore dalle dimensioni compatte. Ponendosi come obiettivo delle dimensioni di qualche millimetro, sia i perni e i cuscinetti e i meccanismi di attuazione pneumatici ed idraulici utilizzati in realizzazioni macroscopiche appaiono immediatamente non adeguati ai nostri scopi. Un dispositivo che possa essere adatto agli scopi prefissi deve quantomeno presentare le seguenti caratteristiche:

- Semplicità realizzativa: più semplice è il manipolatore maggiore è il grado di miniaturizzazione che può essere raggiunto
- Utilizzo di cerniere in luogo di cuscinetti e perni: questo tipo di soluzione consente un maggior grado di miniaturizzazione oltre a permettere movimenti senza frizione
- Impiego di attuatori allo stato solido: questi attuatori ben si prestano alla miniaturizzazione e, essendo privi di abrasione, possono essere impiegati anche in situazioni particolari in cui sia richiesta assenza di detriti e polveri

Queste caratteristiche trovano piena applicazione impiegando attuatori realizzati in SMA, i vantaggi dell'impiego di tale materiale acquistano maggior importanza quando le dimensioni sono di alcuni millimetri o meno.

| | |
|--------------------------|-------------|
| Dimensioni | alcuni mm |
| Minima forza di gripping | 10 mN |
| Minimo passo di chiusura | 200 μm |

Tabella 4.2: Caratteristiche di un micromanipolatore in SMA

Una possibile realizzazione di micromanipolatore è rappresentata in Fig.4.5, le cui caratteristiche qualitative sono elencate in Tab.4.2.

Nella realizzazione presentata, vengono utilizzati due attuatori attivi che agiscono in maniera antagonista. Entrambi questi attuatori sfruttano l'effetto a memoria di forma ad una via.

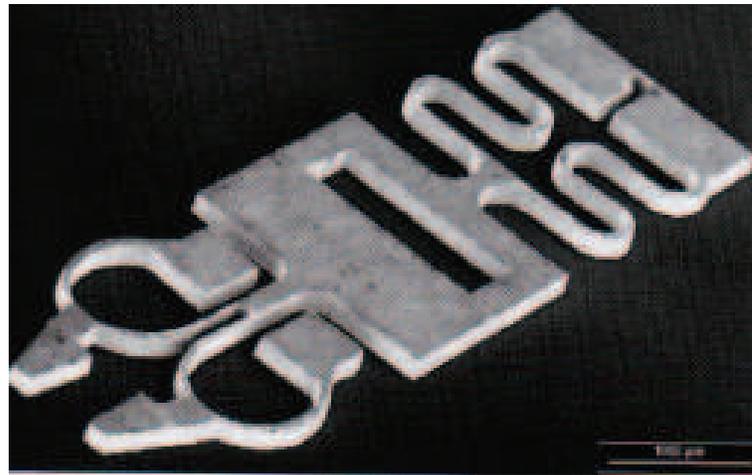


Figura 4.5: Micromanipolatore in SMA (Cfr.[1])

Il manipolatore può essere realizzato partendo da una sottile lamina di SMA ed utilizzando la tecnologia laser per ottenere la geometria desiderata. Prima di poter utilizzare il dispositivo, sarà necessario predeformare l'attuatore lineare come mostrato in Fig.4.6

Il funzionamento del dispositivo si basa sull'attivazione separata dei due attuatori, indicati come "Gear actuator" e "Linear Actuator". Partendo dalla configurazione rappresentata a sinistra in Fig.4.6, andando a riscaldare selettivamente l'attuatore lineare (in modo che la sua temperatura sia superiore alla soglia di attivazione dell'effetto a memoria di forma), si determinerà il recupero della forma indeformata nello stesso. Ciò comporterà la chiusura delle ganasce del manipolatore. Successivamente, andando a riscaldare il Gear Actuator, si indurrà in esso il recupero della forma originaria e le

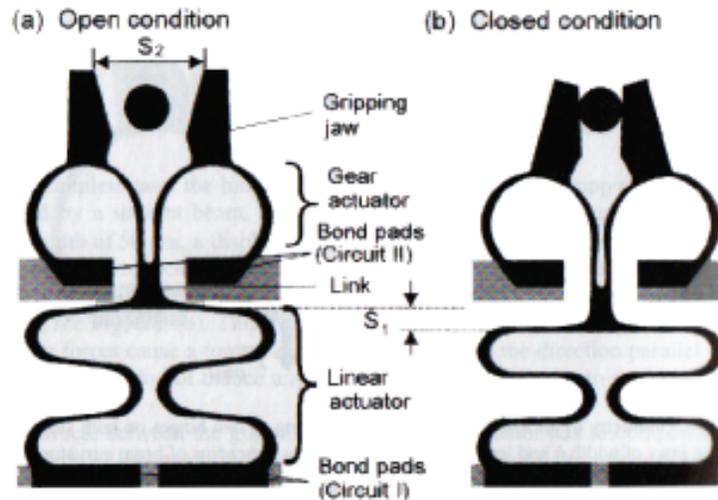


Figura 4.6: Principio di funzionamento del micromanipolatore (Cfr.[1])

ganasce si apriranno: il manipolatore si troverà ora nella sua configurazione aperta.

Affinché il manipolatore possa effettivamente funzionare, è necessario che l'attivazione dei due attuatori operanti in maniera antagonista sia effettivamente indipendente. L'aumento di temperatura necessario ad attivare l'effetto a memoria di forma viene realizzato mediante l'iniezione di corrente che, per effetto Joule, determina riscaldamento. Il fatto che il materiale utilizzato sia un conduttore termico, oltre che di elettricità, comporta dei limiti al grado di miniaturizzazione del dispositivo stesso. Infatti, il calore generato per l'attivazione di un singolo attuttore per conduzione interesserà anche l'altro attuttore. Se da un lato, nel caso di miniaturizzazioni non eccessivamente spinte, questo può non costituire un problema (in quanto l'aumento di temperatura, indotto nell'attuttore non riscaldato direttamente, è sotto soglia), dall'altro, nel caso di dispositivi di dimensioni sempre più ridotte, la condizione di attuazione separata dei dispositivi può al limite non essere soddisfatta.

Appare quindi evidente che l'utilizzo di due attuatori attivi comporta un limite al grado di miniaturizzazione del manipolatore. Alcune soluzioni progettuali, come l'introduzione di una zona centrale che separa i due attuatori Fig.4.5, sono proprio volte ad assicurare l'isolamento dell'attuttore che non deve essere attivato. Anche una soluzione di questo tipo però introduce limiti alla riduzione delle dimensioni del dispositivo complessivo. Un possibile

modo per superare questo problema consiste nell'abbandonare la soluzione impiegante due attuatori con effetto a memoria di forma e sostituire uno di essi (ad esempio il Gear Actuator) con un componente passivo che venga sottoposto a deformazioni elastiche a seguito dell'attivazione dell'altro attuatore. In tal modo, soltanto l'attuatore attivo dovrà essere attuato tramite effetto Joule, mentre l'altro avrà solo un comportamento passivo.

Questo tipo di scelta, se da un lato consente di eliminare alla radice il problema della attivazione indipendente dei due attuatori (non essendoci di fatto più due attuatori attivi), dall'altro non consente più una realizzazione monolitica del manipolatore (ossia a partire da un'unica lamina). Sarà quindi necessario realizzare separatamente i due dispositivi partendo da due lamine di materiali diversi (il materiale può in linea teorica essere lo stesso, l'unico vincolo è rappresentato dal fatto che uno di essi non deve manifestare l'effetto a memoria di forma) e, successivamente, procedere all'assemblaggio delle due componenti. Una possibilità consiste nel saldare le due componenti utilizzando ancora una volta la tecnologia laser, anche se ovviamente anche altre soluzioni sono percorribili.

4.3 Ulteriori considerazioni

In sintesi, appare evidente che i campi di applicazione di microattuatori sono molteplici ed interessano vari campi tecnologici. Nel progettare tali tipi di attuatori, bisogna prestare particolare attenzione al meccanismo di attuazione che viene applicato. Infatti, diminuendo sensibilmente le dimensioni, è necessario trovare un meccanismo di attuazione che sia in grado di sviluppare energie che consentano applicazioni di una qualche utilità. Molto spesso inoltre questi attuatori sono destinati a campi in cui sono richieste caratteristiche particolari come ad esempio l'assenza di formazione di particelle durante il funzionamento o l'esecuzione di posizionamenti in maniera molto precisa. La fase progettuale di un microattuatore è quindi estremamente complessa, dovendo essere soddisfatta una molteplicità di requisiti, spesso in contrasto fra loro.

Fra tutti i possibili meccanismi di attuazione, si è visto che l'effetto a memoria di forma presenta un insieme di caratteristiche tali da renderlo il candidato ideale per l'utilizzo in microattuatori. Le SMA presentano infatti elevate densità di energie ed inoltre non comportano formazione di particelle durante la loro attivazione. Ciò permette di realizzare facilmente dispositivi in grado di esercitare forze non banali che possano essere utilizzati in ambienti critici come *clean room* e l'interno del corpo umano. Superato il limite della scelta della tecnologia realizzativa, l'attenzione deve a questo punto essere

spostata alla realizzazione di dispositivi dalle geometrie semplici, in modo da consentire una più facile miniaturizzazione, e che consentano un efficace scambio di calore consentendo frequenze operative accettabili.

Capitolo 5

Equazioni del problema termo-elettro-meccanico

L'obiettivo di questo lavoro è quello di studiare il comportamento di un microgripper realizzato in SMA. Il funzionamento del dispositivo si realizza mediante l'applicazione di una opportuna differenza di potenziale che, determinando un riscaldamento, consente di attivare l'effetto a memoria di forma alternativamente nei due attuatori che costituiscono il dispositivo. Data questa premessa, si rende necessario considerare il problema termo-elettro-meccanico accoppiato. Dopo un primo studio realizzato mediante *ABAQUS* che trattava solo il problema termo-meccanico, si è passati ad utilizzare *FEAP* per considerare il problema nella sua interezza. Le incognite relative a questo problema sono quindi di tipo meccanico (ovvero gli spostamenti a cui è sottoposto il dispositivo), di tipo termico (le temperature nei vari punti del corpo) e di tipo elettrico (le differenze di potenziale che determinano il passaggio di corrente). Si è dunque ritenuto opportuno ricordare quali sono le equazioni che reggono i tre problemi di nostro interesse.

5.1 Problema meccanico

La trattazione effettuata è soggetta all'ipotesi di piccoli spostamenti, che risulta accettabile in prima approssimazione.

Equazioni di equilibrio

Consideriamo un corpo continuo \mathcal{B} , delimitato dalla superficie $\partial\mathcal{B}$, esso risulta essere in equilibrio quando risultano nulle sia la risultante delle forze

sia la risultante dei momenti agenti sul corpo stesso. Ciò significa che:

$$\begin{aligned}\vec{R}(\mathcal{P}) &= \vec{0} \\ \vec{M}(\mathcal{P}) &= \vec{0} \quad \forall \mathcal{P} \subseteq \mathcal{B}\end{aligned}\tag{5.1}$$

Passando alla forma integrale possiamo scrivere:

$$\begin{aligned}\int_{\mathcal{P}} \vec{f} dV + \int_{\partial\mathcal{P}} \vec{t}_n dS &= 0 \\ \int_{\mathcal{P}} \vec{r} \times \vec{f} dV + \int_{\partial\mathcal{P}} \vec{r} \times \vec{t}_n dS &= 0\end{aligned}\tag{5.2}$$

dove in Eq.5.2 \vec{f} e \vec{t}_n rappresentano, rispettivamente, la densità volumetrica e la tensione agenti su \mathcal{P} . Il vettore \vec{r} rappresenta invece la posizione dei punti di \mathcal{P} relativamente ad un sistema di riferimento assegnato. Applicando il teorema di Cauchy, secondo il quale

$$\vec{t}_n = \boldsymbol{\sigma} \cdot \vec{n}\tag{5.3}$$

e ricorrendo poi al teorema della divergenza, data la genericità del volume considerato si potrà riscrivere la prima delle Eqq. 5.2 nel modo seguente, che rappresenta l'equazione di equilibrio per un continuo.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \vec{f} = 0 \text{ in } \mathcal{B}\tag{5.4}$$

La seconda delle Eqq.5.2 rappresenta la simmetria del tensore degli sforzi $\boldsymbol{\sigma}$, si potrà quindi scrivere:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^t \text{ in } \mathcal{B}\tag{5.5}$$

Si dovrà inoltre verificare la seguente condizione

$$\vec{t} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \vec{n} \text{ su } \partial\mathcal{B}_f\tag{5.6}$$

dove $\partial\mathcal{B}_f$ rappresenta quella parte di $\partial\mathcal{B}$ sottoposta ad un carico.

Equazioni di congruenza

Per poter completare lo studio di un continuo è necessario considerare anche la sua deformazione. Per poter far ciò è opportuno rappresentare la deformazione corrente rispetto ad una configurazione di riferimento, ad esempio quella iniziale. Si introducono quindi il vettore spostamento \vec{u} e il tensore delle deformazioni infinitesime $\boldsymbol{\epsilon}$ che sono fra loro legati dall'equazione di congruenza:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \frac{1}{2}[\vec{\nabla}\vec{u} + (\vec{\nabla}\vec{u})^t]\tag{5.7}$$

che può essere scritta in forma compatta come

$$\boldsymbol{\epsilon} = \vec{\nabla}^s \vec{u} \quad (5.8)$$

dove $\vec{\nabla}^s \vec{u}$ rappresenta il gradiente simmetrico di \vec{u} . Le condizioni al contorno vengono espresse come:

$$\vec{u} = \vec{u}_0 \text{ su } \partial\mathcal{B}_s \quad (5.9)$$

Equazioni di legame

A questo punto è necessario andare a definire le relazioni che permettano di tenere conto del comportamento del materiale che costituisce il corpo continuo che viene considerato; verrà quindi introdotta una equazione di legame, ossia una relazione matematica che lega sforzi e deformazioni descrivendo in tal modo il comportamento meccanico del materiale.

A seconda del tipo di materiale che viene considerato, esistono diverse equazioni di legame usate per modellarne il comportamento. A titolo esemplificativo introduciamo il legame elastico lineare, che rappresenta il legame più semplice, il legame elasto-plastico e, infine, il legame utilizzato per le SMA.

Legame elastico lineare Tutti i materiali solidi possiedono una zona nello spazio degli sforzi in cui una variazione di carico produce soltanto deformazioni di tipo elastico. Questo tipo di deformazione consta di movimenti reversibili degli atomi, molecole o celle che costituiscono il materiale. Tali movimenti corrispondono a deformazioni di piccola entità giustificando l'ipotesi di piccole deformazioni nel caso elastico. Il limite del campo elastico in ogni materiale dipende dalla temperatura e dalla storia di carico cui è stato sottoposto il materiale stesso. Per un continuo lineare elastico è possibile scrivere la relazione:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{a} : \boldsymbol{\epsilon}^e \quad (5.10)$$

La Eq.5.10 è nota con il nome di legge di Hook, dove \mathbf{a} è un tensore simmetrico del quarto ordine, le cui componenti, nel caso di isotropia del materiale, dipendono solo dal modulo elastico E e dal modulo di Poisson ν . Nel caso anisotropo invece, il tensore sarà caratterizzato da 21 componenti indipendenti. La legge di Hook può essere invertita e riscritta nella forma:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{A} : \boldsymbol{\sigma} \quad (5.11)$$

dove \mathbf{A} prende il nome di tensore della flessibilità. I tensori delle deformazioni e degli sforzi vengono normalmente scomposti nella somma di due

componenti, una volumetrica e l'altra deviatorica:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{e} + \frac{1}{3}\theta\mathbf{I} \quad (5.12)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{s} + p\mathbf{I} \quad (5.13)$$

in cui:

$$\theta = \boldsymbol{\epsilon} : \mathbf{I} = \text{tr}(\boldsymbol{\epsilon}) \quad (5.14)$$

$$p = \frac{1}{3}\boldsymbol{\sigma} : \mathbf{I} = \frac{1}{3}\text{tr}(\boldsymbol{\sigma}) \quad (5.15)$$

dove \mathbf{I} rappresenta il tensore identità del secondo ordine.

Legame elasto-plastico Il comportamento di un materiale è detto inelastico quando la deformazione non è più solo funzione dello sforzo, ma anche di altre quantità che prendono il nome di variabili interne ξ . Consideriamo il più semplice dei comportamenti inelastici, noto come plasticità, in cui le deformazioni inelastiche, dette plastiche ed indicate come $\boldsymbol{\epsilon}^p$, rappresentano la variabile interna del problema. Considerando l'ipotesi di piccole deformazioni, possiamo esprimere la deformazione totale come la somma delle deformazioni elastiche e di quelle plastiche, in formula:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\epsilon}^e + \boldsymbol{\epsilon}^p \quad (5.16)$$

Partendo da questa considerazioni, le leggi costitutive relative ai due termini di deformazione possono essere considerate in maniera disaccoppiata.

Sono presenti deformazioni plastiche solo quando viene superato il limite elastico del materiale, indicato come σ_y . Nel caso pluriassiale è necessario definire una superficie limite, definita come la condizione di sforzo al di sopra del quale si generano trasformazioni irreversibili. A seconda della scelta di tali superfici limite e delle variabili interne utilizzate, si identificano differenti teorie. Consideriamo il caso in cui la funzione di snervamento F è costante: l'incrudimento del materiale è nullo e lo sforzo non aumenta oltre il valore corrispondente allo snervamento. Una possibile scelta della funzione di snervamento può essere a seguente:

$$F = \|\mathbf{s}\| - \sigma_y \quad (5.17)$$

in cui $\|\mathbf{s}\|$ rappresenta la norma della parte deviatorica dello sforzo \mathbf{s} .

Data la natura irreversibile delle deformazioni plastiche, è necessario che il legame costitutivo tenga conto della storia di carico e venga quindi espresso in forma incrementale. La deformazione plastica dipende solamente dalla parte deviatorica della deformazione \mathbf{e} , si avrà quindi:

$$\dot{\theta} = 0 \quad (5.18)$$

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p = \dot{\mathbf{e}}^p \quad (5.19)$$

Si potrà quindi scrivere:

$$\mathbf{e}^{el} = \mathbf{e} - \mathbf{e}^p \quad (5.20)$$

$$\theta^{el} = \boldsymbol{\epsilon} : \mathbf{I} \quad (5.21)$$

Possiamo scrivere le equazioni di legame relative alla parte elastica come:

$$p = K_M \theta^{el} \quad (5.22)$$

$$\mathbf{s} = 2G(\mathbf{e} - \mathbf{e}^p) \quad (5.23)$$

dove K_M è il modulo di elasticità volumetrica, mentre G rappresenta il modulo di elasticità tangenziale. Il legame relativo alla parte inelastica può essere scritto nel modo seguente:

$$\dot{\mathbf{e}}^p = \dot{\gamma} \mathbf{n} \quad (5.24)$$

dove \mathbf{n} è un tensore del secondo ordine così definito:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \quad (5.25)$$

Lo scalare $\dot{\gamma}$ in Eq.5.24 deve soddisfare le seguenti condizioni

$$\dot{\gamma} \geq 0 \text{ per } F \leq 0 \quad (5.26)$$

$$\dot{\gamma} F = 0 \quad (5.27)$$

Legame usato per le SMA Per esprimere il legame costitutivo delle SMA, ci si è riferiti al modello presentato in [2]. La variabile interna che è stata utilizzata è rappresentata dal tensore del secondo ordine \mathbf{e}^{tr} , che rappresenta la deformazione associata alla trasformazione. Questo tensore è caratterizzato dalla seguente proprietà:

$$tr(\mathbf{e}^{tr}) = 0 \quad (5.28)$$

e fornisce una misura della deformazione associata alla trasformazione e, in particolare, al passaggio da austenite o martensite multi-variante a martensite mono-variante. Le equazioni di legame sono quindi scritte come:

$$p = K_M \theta^{el} \quad (5.29)$$

$$\mathbf{s} = 2G(\mathbf{e} - \mathbf{e}^{tr}) \quad (5.30)$$

$$\eta = \eta_0 + 3\alpha K \theta - \beta \|\mathbf{e}^{tr}\| \frac{\langle T - M_f \rangle}{|T - M_f|} + c \ln \frac{T}{T_0} \quad (5.31)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{s} - \boldsymbol{\alpha} \quad (5.32)$$

$$(5.33)$$

dove p e \mathbf{s} rappresentano, rispettivamente, la parte volumetrica e deviatorica dello sforzo $\boldsymbol{\sigma}$, η è l'entropia e \mathbf{X} rappresenta lo sforzo di trasformazione. Il tensore $\boldsymbol{\alpha}$ è definito come:

$$\boldsymbol{\alpha} = [\beta \langle T - Mf \rangle + h \|\mathbf{e}^{tr}\| + \gamma] \frac{\partial \|\mathbf{e}^{tr}\|}{\partial \mathbf{e}^{tr}} \quad (5.34)$$

in cui il parametro h è legato all'incrudimento del materiale durante la trasformazione e γ è un parametro definito come:

$$\begin{cases} \gamma = 0 & \text{se } 0 \leq \|\mathbf{e}^{tr}\| < \epsilon_L \\ \gamma \geq 0 & \text{se } \|\mathbf{e}^{tr}\| = \epsilon_L \end{cases}$$

dove ϵ_L rappresenta il valore massimo di $\|\mathbf{e}^{tr}\|$, che viene raggiunto nel caso il materiale si trasformi interamente in martensite mono-variante. Oltre alle equazioni appena descritte, occorre introdurre anche le equazioni che guidano l'evoluzione della variabile interna \mathbf{e}^{tr} :

$$\dot{\mathbf{e}}^{tr} = \zeta \frac{\partial F(\mathbf{X})}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (5.35)$$

$$F(\mathbf{X}) = \sqrt{2J_2} + m \frac{J_3}{J_2} - R \quad (5.36)$$

in cui J_2 e J_3 sono rispettivamente il secondo e terzo invariante del tensore deviatorico \mathbf{X} , definiti come:

$$J_2 = \frac{1}{2}(\mathbf{X}^2 : \mathbf{1}) \quad (5.37)$$

$$J_3 = \frac{1}{3}(\mathbf{X}^3 : \mathbf{1}) \quad (5.38)$$

R rappresenta invece il raggio del dominio elastico nello spazio deviatorico, mentre m è un parametro che soddisfa la condizione $m \leq 0.46$ per garantire la convessità della superficie limite. Oltre alle equazioni evolutive prima presentate, è indispensabile introdurre le cosiddette condizioni di Kuhn-Tucker che riducono il problema ad un problema di ottimizzazione vincolata. Tali condizioni vengono espresse nel modo seguente:

$$\dot{\zeta} \geq 0 \quad (5.39)$$

$$\dot{\zeta} F(\mathbf{X}) = 0 \quad (5.40)$$

La variabile ζ prima utilizzata viene detta parametro di consistenza, o scorrimento inelastico mentre F costituisce la cosiddetta funzione limite, definita in termini dello sforzo relativo.

5.2 Problema termico

5.2.1 Principi della termodinamica

In termodinamica, si definisce calore quella forma di energia che si propaga, attraverso i confini di un sistema, a causa di una differenza di temperatura. Fondamentali per comprendere la natura e le modalità con cui avvengono gli scambi di calore sono i principi della termodinamica.

Primo principio della termodinamica

Consideriamo un corpo continuo \mathcal{B} , delimitato dalla superficie $\partial\mathcal{B}$. Detta E l'energia interna del corpo ed indicate con e l'energia interna specifica per unità di massa e con ρ la densità di massa, si può scrivere:

$$E = \int_{\mathcal{B}} \rho e dV \quad (5.41)$$

Si può inoltre scrivere l'espressione dell'energia cinetica K del corpo nel modo seguente:

$$K = \frac{1}{2} \int_{\mathcal{B}} \rho \vec{v} \cdot \vec{v} dV \quad (5.42)$$

Chiamata Q la variazione di calore entrante nel corpo \mathcal{B} , tale variazione risulta essere costituita da due termini. Il primo di questi termini rappresenta il calore generato all'interno del corpo, mentre il secondo rappresenta il calore scambiato per conduzione attraverso $\partial\mathcal{B}$. Fatte queste considerazioni possiamo scrivere:

$$Q = \int_{\mathcal{B}} r dV - \int_{\partial\mathcal{B}} \vec{q} \cdot \vec{n} dS \quad (5.43)$$

Definita infine $P_{(x)}$ la potenza delle forze esterne

$$P_{(x)} = \int_{\mathcal{B}} \vec{f} \cdot \vec{v} dV + \int_{\partial\mathcal{B}} \vec{T} \cdot \vec{v} dS \quad (5.44)$$

Il primo principio della termodinamica afferma che

$$\frac{d}{dt}(E + K) = P_{(x)} + Q \quad \forall \mathcal{B} \quad (5.45)$$

Ossia, sostituendo in Eq.5.45 le singole espressioni:

$$\frac{d}{dt} \int_{\mathcal{B}} \rho \left(e + \frac{1}{2} \vec{v} \cdot \vec{v} \right) dV = \int_{\mathcal{B}} (\vec{f} \cdot \vec{v} + r) dV + \int_{\partial\mathcal{B}} (\vec{T} \cdot \vec{v} - \vec{q} \cdot \vec{n}) dS \quad (5.46)$$

da cui, con alcuni passaggi, possiamo ottenere una forma locale della Eq.5.45:

$$\rho \frac{de}{dt} = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} + r - \nabla \cdot \vec{q} \quad (5.47)$$

che, nell'ipotesi di piccole deformazioni, si riduce a

$$\rho \dot{e} = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}} + r - \nabla \cdot \vec{q} \quad (5.48)$$

.

Secondo principio della termodinamica

Oltre all'energia e alla variazione di calore nel corpo, è necessario introdurre anche altre due variabili: entropia e temperatura. Ipotizziamo che la temperatura T possa essere espressa mediante un campo scalare, l'entropia esprime una variazione di energia associata ad una variazione di temperatura e viene definita come:

$$S = \int_{\mathcal{B}} \rho s dV \quad (5.49)$$

dove s rappresenta l'entropia specifica per unità di massa. Il secondo principio della termodinamica afferma che la variazione di entropia è sempre maggiore o uguale del rapporto fra variazione di calore e temperatura, ossia:

$$\frac{dS}{dt} \geq \int_{\mathcal{B}} \frac{r}{T} dV - \int_{\partial \mathcal{B}} \frac{\vec{q} \cdot \vec{n}}{T} dS \quad \forall \mathcal{B} \quad (5.50)$$

Applicando all'Eq.5.50 il teorema della divergenza, data la genericità del continuo \mathcal{B} , possiamo scrivere una forma puntuale:

$$\rho \frac{ds}{dt} + \nabla \cdot \frac{\vec{q}}{T} - \frac{r}{T} \geq 0 \quad (5.51)$$

Sostituendo nella Eq.5.51 l'espressione di r che si ottiene dall'Eq.5.47 otteniamo la seguente disuguaglianza:

$$\rho \frac{ds}{dt} + \nabla \cdot \vec{q} T - \frac{1}{T} (\rho \frac{de}{dt} - \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} + \nabla \cdot \vec{q}) \geq 0 \quad (5.52)$$

5.2.2 Modalità di trasmissione del calore

Se all'interno di un corpo esistono differenze di temperatura, all'interno di esso si verifica un trasferimento di energia dalle parti più calde a quelle più fredde. Tale trasferimento di energia prende il nome di trasmissione del calore.

La trasmissione di calore si verifica anche fra corpi distinti, qualunque sia la loro natura, indipendentemente dalla presenza di materia fra di essi: ciò che è fondamentale è la presenza di una differenza di temperatura fra i corpi. La trasmissione del calore può avvenire mediante tre meccanismi: la conduzione, la convezione e l'irraggiamento. Questi tre meccanismi possono avvenire da soli oppure combinati fra loro, in quest'ultimo caso si semplifica la trattazione considerando separatamente gli effetti di ciascun meccanismo.

- la *conduzione* rappresenta la modalità di trasmissione tipica dei solidi, anche se può presentarsi anche nei liquidi. Essa consiste in uno scambio energetico conseguente alla interazione diretta delle molecole costituenti il materiale, in presenza di un gradiente di temperatura. In un corpo solido infatti, sebbene le particelle siano legate alle loro posizioni di equilibrio, esse si trovano in continuo movimento intorno a tali posizioni: l'energia media posseduta dalle particelle dipende dalla temperatura del corpo. Lo scambio energetico avviene senza che vi siano contemporanei trasferimenti di massa. La propagazione del calore è funzione del gradiente di temperatura e viene espressa mediante la legge di Fourier.
- la *convezione* avviene nei fluidi, dove sono possibili spostamenti più ampi delle molecole. Essa è determinata dallo spostamento di materia fluida libera di viaggiare all'interno dell'intero volume del corpo. Tali spostamenti possono essere provocati da una differenza di temperatura oppure da una azione esterna. Si parla nel primo caso di convezione libera mentre, nel secondo caso, di convezione forzata. Il meccanismo di convezione è generalmente descritto dalla legge di Newton.
- l'*irraggiamento* consiste nel trasferimento di energia termica sotto forma di onde elettromagnetiche che, come tali, possono propagarsi anche in assenza di materia e che vengono emesse in virtù dell'agitazione atomica sulla superficie di un corpo. Il meccanismo di irraggiamento è descritto dalla relazione di Stefan-Boltzman

Dal momento che le temperature raggiunte durante il funzionamento del dispositivo con cui avremo a che fare non sono molto elevate, si è deciso di considerare solamente le prime due modalità di trasmissione.

Conduzione

La conduzione del calore è un fenomeno di propagazione dell'energia che avviene in seguito al contatto diretto fra le particelle di un corpo. A seconda

della struttura fisica del corpo si avrà un meccanismo diverso che controlla la propagazione. nel caso di solidi dielettrici e fluidi la conduzione termica è dovuta alla propagazione di onde elastiche. Nel caso di solidi metallici, la conduzione è dovuta essenzialmente alla diffusione degli elettroni liberi, mentre l'oscillazione elastica della struttura cristallina risulta di secondaria importanza.

La teoria matematica che descrive la conduzione fa riferimento ad un mezzo continuo indipendentemente dalla sua struttura molecolare. Così come per gli altri meccanismi di scambio di calore, la propagazione per conduzione si manifesta solamente in presenza di differenza di temperature, fondamentale per la descrizione del fenomeno sarà quindi la conoscenza del campo di temperature per ogni punto all'interno del corpo e per ogni istante temporale, ossia della funzione:

$$T = T(x, y, z, t) \quad (5.53)$$

All'interno del corpo si possono individuare dei luoghi di punti che presentano, ad un dato istante, la stessa temperatura. Tali punti formano delle superfici dette *isoterme*. Esse non si intersecano mai, in quanto ogni punto, in un dato istante, non può trovarsi a temperature diverse. Secondo l'ipotesi di Fourier, la quantità di calore dQ che attraversa un elemento di superficie isoterma dS , in direzione normale, nell'intervallo di tempo dt risulta proporzionale alla variazione di temperatura per unità di lunghezza nella stessa direzione, secondo la relazione:

$$dQ_n = -k dS \frac{\partial T}{\partial n} dt \quad (5.54)$$

Dove il coefficiente k prende il nome di conduttività termica del materiale e ne definisce la capacità di condurre il calore. Il segno meno tiene conto del fatto che il calore si propaga da zone a temperatura maggiore verso zone a temperatura minore. Si definisce il flusso termico specifico q come la quantità di calore che si propaga attraverso l'unità di superficie isoterma, lungo la direzione normale e nell'unità di tempo, ovvero:

$$q = k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (5.55)$$

Questa espressione, nella sua forma vettoriale, rappresenta la forma più nota dell'equazione di Fourier

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (5.56)$$

Questa legge è valida sotto l'ipotesi di isotropia del continuo considerato. Nel caso anisotropo, la conduttività termica assume valori diversi a seconda

della direzione, si dovrà quindi ricorrere ad un *tensore di conduttività termica*. Pertanto la legge di Fourier assume la forma generica:

$$\vec{q} = -\mathbf{k}\nabla T \quad (5.57)$$

Per poter studiare la propagazione del calore per conduzione all'interno di un corpo, è fondamentale conoscere il campo di temperatura all'interno dello stesso. Tale funzione si ottiene risolvendo l'*equazione generale della conduzione*, che esprime il bilancio energetico in un sistema in cui si propaga calore per conduzione. Partendo dall'Eq.5.48, una volta introdotto il calore specifico C , definito come

$$C = T \frac{\partial s}{\partial T} \quad (5.58)$$

raccolti in un unico termine noto b tutti i termini che non dipendono direttamente dalla temperatura, l'equazione generale della conduzione può essere scritta come:

$$\nabla \cdot \vec{q} + C\dot{T} = b \quad (5.59)$$

in cui b rappresenta il calore generato all'interno del sistema.

Convezione termica

In primo luogo, è fondamentale effettuare una distinzione fra convezione naturale e convezione forzata.

Nel caso della *convezione forzata* il fluido è dotato di un suo moto e pertanto lambisce la superficie del solido con cui è in contatto. Questo moto è indipendente dal fenomeno di trasmissione del calore e anzi, il fenomeno convettivo, ha effetti trascurabili sul moto del fluido. Un esempio di convezione forzata è rappresentato ad esempio dallo scambio termico fra un processore e l'aria messa in movimento da una ventola, all'interno di un elaboratore.

Nella *convezione naturale* il fluido non è agitato da cause esterne. Il fluido a contatto con il solido (che si trova ad una temperatura diversa) assume una temperatura, e quindi una densità, diversa dal fluido che non si trova a diretto contatto con il solido. In presenza di un campo gravitazionale, le differenze di densità generano un movimento di particelle dalle zone a temperatura più bassa verso quelle a temperatura più alta e, conseguentemente, le particelle nelle zone a temperatura più alta si muoveranno verso quelle a temperatura più bassa. Esempio di convezione naturale è il raffreddamento di un corpo nell'ambiente in assenza di ventilazione. Si noti che alla base del moto convettivo naturale vi è una differenza di densità, e quindi di peso specifico, del fluido. Tale differenza può realizzarsi anche a causa di una differenza di composizione del fluido stesso, oltre che per la già citata differenza di temperatura.

Per rappresentare lo scambio di calore fra un corpo solido e il fluido con cui è in contatto, si utilizza la *legge di Newton* la quale assume che il calore scambiato è proporzionale alla superficie di contatto e alla differenza di temperatura fra i due mezzi, ovvero:

$$q = h(T_s - T_f)dA \quad (5.60)$$

in cui T_s e T_f rappresentano rispettivamente la temperatura del solido e quella del fluido. Il coefficiente di proporzionalità h prende il nome di *coefficiente convettivo* e dipende da molti fattori, come la forma e la temperatura del solido, la presenza di un campo gravitazionale, le caratteristiche cinematiche e dinamiche del fluido e anche la natura e lo stato fisico di quest'ultimo. Appare dunque evidente che la stima di questo coefficiente risulta essere alquanto complessa. Basandosi su formule approssimate basate su metodi empirici, si possono trovare i range tipici per questo coefficiente a seconda che la convezione sia naturale o forzata e che il fluido sia aeriforme o liquido (Tab.5.2.2)

| Tipo di convezione | h |
|--------------------------------|---------------|
| Convezione libera dei gas | 2 ÷ 25 |
| Convezione libera dei liquidi | 10 ÷ 1000 |
| Convezione forzata dei gas | 25 ÷ 250 |
| Convezione forzata dei liquidi | 50 ÷ 20000 |
| Ebollizione e condensazione | 2500 ÷ 100000 |

Tabella 5.1: Valori tipici, espressi in W/m^2K , del coefficiente convettivo h nei diversi modi di convezione Cf.[3]

Nel corso delle nostre analisi, trattando solo il caso di convezione naturale, andremo a considerare un coefficiente che rientri nel range tipico per questa tipologia di convezione.

5.3 Problema elettrico

Prendiamo in considerazione un corpo conduttore, ossia un corpo che presenti al suo interno elettroni liberi di muoversi. Applicando una differenza di potenziale

$$\Delta V = V(A) - V(B) = V_A - V_B \quad (5.61)$$

fra tali punti sarà presente un campo elettrico \vec{E} tale per cui:

$$\int_A^A \vec{E} \cdot d\vec{l} = V(A) - V(A) = 0 = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (5.62)$$

dove \oint indica la circuitazione, ossia l'integrale lungo una linea chiusa. Per quanto abbiamo appena scritto, si può affermare che la circuitazione del campo elettrico lungo qualsiasi linea chiusa è nulla, il che porta ad affermare che il campo elettrico è conservativo. Ricordando il teorema di Stokes, possiamo scrivere:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S \nabla \times \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (5.63)$$

Dove S rappresenta una qualsiasi superficie che ha come contorno la linea chiusa considerata. Data la conservatività del campo elettrico si avrà:

$$\int_S \nabla \times \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (5.64)$$

Poichè la relazione in Eq.5.64 è valida per la generica superficie S, allora dovrà essere verificata la seguente condizione:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (5.65)$$

L'Eq.5.65 esprime la conservatività del campo elettrico in forma locale e consente di affermare che il campo elettrico è irrotazionale.

Considerando nuovamente il conduttore a cui viene applicata una differenza di potenziale ΔV , misurando l'andamento temporale della differenza di potenziale si verifica che esso segue un decadimento esponenziale. Si può dunque asserire che nel conduttore si ha un movimento ordinato di cariche, ovvero un passaggio di corrente elettrica. Mantenendo costante la differenza di potenziale applicata, è possibile studiare il fenomeno in modo stazionario. Si definisce corrente elettrica il rapporto tra la carica elettrica dQ , che fluisce nel tempo dt attraverso il conduttore, e il tempo dt stesso:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (5.66)$$

Qualora la differenza di potenziale applicata al conduttore è mantenuta costante nel tempo, anche la corrente che fluirà nel conduttore risulta costante nel tempo; si parla pertanto di *corrente stazionaria*.

Nel trattare problemi elettrici, è importante definire anche un'altra grandezza chiamata *densità di corrente*. Tale grandezza viene indicata con \vec{J} e rappresenta il vettore il cui flusso attraverso una superficie S di un conduttore rappresenta la corrente che attraversa la superficie stessa, ovvero in formula:

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (5.67)$$

Molto spesso, risulta possibile scrivere una relazione funzionale che lega il campo elettrico e la densità di corrente nella forma $\vec{J} = f(\vec{E})$. Nel caso di conduttori lineari ed isotropi si può scrivere:

$$\vec{J} = \sigma_E \vec{E} \quad (5.68)$$

dove σ_E prende il nome di *conducibilità elettrica* ed è una costante tipica del materiale considerato. Alcuni valori tipici per questa grandezza sono riportati in Tab.5.3

| Materiale | Conducibilità elettrica |
|-----------|-------------------------|
| Alluminio | 4.0×10^4 |
| Argento | 6.67×10^4 |
| Rame | 5.88×10^4 |
| Legno | 1.0×10^{-11} |
| Vetro | 1.0×10^{-13} |

Tabella 5.2: Valori per la conducibilità elettrica σ_E espresse in $1/mm\Omega$

Nel caso di materiali anisotropi, la conducibilità elettrica viene ad assumere caratteristiche tensoriali e, quindi, il legame fra densità di corrente e campo elettrico verrà ad assumere la seguente forma:

$$\vec{J} = \boldsymbol{\sigma}_E \vec{E} \quad (5.69)$$

Andiamo a considerare un continuo isolato delimitato dalla superficie S . Sia $Q_E(t)$ la carica totale presente all'interno di tale continuo. In base al principio di conservazione della carica, una eventuale variazione dQ_E della carica contenuta nel continuo è da attribuirsi ad un passaggio di carica attraverso la superficie S , ovvero:

$$-dQ_E = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} dt \quad (5.70)$$

da cui otteniamo:

$$-\frac{dQ_E}{dt} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (5.71)$$

Chiamata ρ_E la densità volumica di carica e considerando un volume infinitesimo $d\tau$ si può scrivere:

$$\frac{dQ_E}{dt} = \int_{\tau} \frac{\partial \rho_E}{\partial t} d\tau \quad (5.72)$$

Sostituendo questa espressione nella Eq.5.71 e applicando il teorema della divergenza otteniamo:

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho_E}{\partial t} = 0 \quad (5.73)$$

L'equazione 5.73 viene detta equazione di continuità della corrente e altro non è che una espressione locale del principio di conservazione della carica. In condizioni stazionarie, le variazioni temporali delle grandezze sono nulle e quindi la 5.73 può scriversi:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (5.74)$$

Integrando entrambe i membri per un generico volume otteniamo:

$$0 = \int_{\tau} \nabla \cdot \vec{J} d\tau = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (5.75)$$

Il che consente di affermare che il flusso del vettore \vec{J} attraverso una superficie chiusa è nullo, ovvero che \vec{J} è solenoidale in tutto lo spazio τ .

5.4 Accoppiamento tra i campi

5.4.1 Accoppiamento termo-meccanico

L'accoppiamento tra i campi meccanico e termico si realizza in due modi:

- attraverso dei termini dissipativi
- attraverso la deformazione termica

.

Termini dissipativi

Sotto l'ipotesi di piccoli gradienti di deformazione. partendo dalla Eq.5.52 si può ricavare la seguente espressione valida per la dissipazione Φ

$$\Phi = \sigma : \dot{\epsilon}^i - A_k \dot{V}_k - \nabla T \cdot \frac{\vec{q}}{T} \geq 0 \quad (5.76)$$

che può essere riscritta come:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (5.77)$$

dove

$$\Phi_1 = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^i - \mathbf{A}_k \dot{V}_k \quad (5.78)$$

$$\Phi_2 = -\nabla T \cdot \frac{\vec{q}}{T} \quad (5.79)$$

Il primo termine viene detto *dissipazione meccanica* ed è dovuto alle deformazioni inelastiche. Nel caso specifico del legame SMA da noi considerato, si avrà:

$$\Phi_1 = \mathbf{X} : \boldsymbol{\epsilon}^{tr} \quad (5.80)$$

Il secondo termine, invece, rappresenta la *deformazione termica* ed è dovuta alla conduzione del calore. Il termine di dissipazione meccanica è una quantità di calore che viene generata all'interno del sistema e, quindi, entrerà a far parte del termine noto b nell'equazione generale della conduzione (Eq.5.59).

Deformazione termica

Nel caso sia presente anche un campo termico, la deformazione complessiva viene scritta come:

$$\boldsymbol{\epsilon}^{tot} = \boldsymbol{\epsilon}^e + \boldsymbol{\epsilon}^p + \alpha \Delta T \cdot \mathbf{1} \quad (5.81)$$

in cui $\boldsymbol{\epsilon}^{tot}$ rappresenta la deformazione totale, α è il coefficiente di dilatazione termica, ΔT rappresenta la differenza di temperatura fra esterno ed interno e $\mathbf{1}$ è il tensore unitario

5.4.2 Accoppiamento termo-elettrico

L'accoppiamento fra campo elettrico e termico è determinato dal cosiddetto *effetto Joule*. Esso consiste nella generazione di calore a seguito del passaggio di corrente all'interno di un conduttore. Il campo elettrico genera infatti una potenza che deve essere in qualche modo dissipata; dal momento che si tratta di un fenomeno stazionario, l'energia spesa dal campo elettrico non può trasformarsi né in energia potenziale né in energia cinetica. A seguito degli urti fra portatori di carica e reticolo cristallino, tale energia si trasforma in un moto di agitazione disordinato, ovvero in energia termica. Il corpo si riscalda e disperde nell'ambiente la potenza elettrica dissipata dal campo elettrico nel conduttore. La potenza dissipata per effetto Joule può essere espressa come:

$$w = \vec{E} \cdot \vec{J} \quad (5.82)$$

dove \vec{E} rappresenta il campo elettrico presente nel conduttore e \vec{J} la densità di corrente che percorre il conduttore stesso. Il calore prodotto per effetto Joule

non è altro che calore prodotto all'interno del corpo e, come tale, rientrerà anch'esso nel termine noto b dell'Eq.5.59.

5.4.3 Accoppiamento termo-elettro-meccanico

È possibile a questo punto scrivere l'equazione termica completa, in modo che essa includa i contributi dovuti a tutti i campi considerati. Come si è visto, gli accoppiamenti si riducono all'aggiunta di addendi al termine noto della Eq.5.59. Nel caso delle SMA si potrà dunque scrivere:

$$b = \mathbf{X} : \boldsymbol{\epsilon}^{tr} + w \quad (5.83)$$

che rappresenta il calore complessivamente generato all'interno del materiale in seguito alla presenza di una deformazione meccanica e di un campo elettrico.

5.5 Formulazione debole del problema

Il problema esaminato è stato risolto mediante l'impiego del metodo degli elementi finiti, utilizzando il codice FEAP. Le equazioni differenziali che si sono introdotte, insieme alle condizioni al contorno, rappresentano la *formulazione forte* del problema. Per potersi avvalere del metodo degli elementi finiti, è necessario riscrivere il problema nella cosiddetta *forma debole*. Per poter ottenere tale formulazione, si devono seguire 4 passi:

1. Si moltiplicano le equazioni differenziali per una funzione arbitraria W , detta funzione peso. L'obiettivo è quello di ottenere a partire dal sistema di equazioni differenziali una funzione scalare $g(x_i)$
2. Si integra tale funzione scalare sull'intero dominio considerato
3. Si integra per parti, per ridurre le derivate al loro minimo ordine
4. Si sostituiscono opportunamente le condizioni al contorno

Vediamo ora di seguire questi 4 passi nella costruzione della forma debole per ognuno dei tre campi considerati.

- *Campo meccanico* Partendo dalla condizione di equilibrio per il campo meccanico (Eq.5.4) e moltiplicando per la funzione peso, otteniamo:

$$g_M = W(\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \vec{f}) = 0 \quad (5.84)$$

Integrando ora sull'intero dominio Ω :

$$G_M = \int_{\Omega} W(\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \vec{f})d\Omega = 0 \quad (5.85)$$

da cui, integrando per parti

$$G_M = \int_{\Omega} W\vec{f}d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \vec{W})^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega + \int_{\Gamma} W \boldsymbol{\sigma} \cdot \vec{n} d\Gamma = 0 \quad (5.86)$$

Definendo $\vec{t} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \vec{n}$, l'integrale sulla frontiera può essere scomposto in due termini, uno relativo a quella parte di frontiera in cui le condizioni di contorno riguardano le forze superficiali (Γ_q) e un'altra in cui le condizioni al contorno riguardano gli spostamenti (Γ_T), si può quindi scrivere:

$$\int_{\Gamma} W \boldsymbol{\sigma} \cdot \vec{n} d\Gamma = \int_{\Gamma_T} W \vec{t} d\Gamma + \int_{\Gamma_q} W \vec{t} d\Gamma \quad (5.87)$$

Data l'arbitrarietà della funzione peso W , si può ipotizzare che essa sia nulla in corrispondenza di Γ_T . Per tale motivo, applicando la condizione al contorno $\vec{t} = \vec{\bar{t}}$ alla frontiera Γ_q , otteniamo:

$$G_M = \int_{\Omega} W\vec{f}d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \vec{W})^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega + \int_{\Gamma_q} W \vec{\bar{t}} d\Gamma = 0 \quad (5.88)$$

Si noti che l'equazione appena scritta contiene solo derivate del primo ordine, anziché derivate del secondo ordine (contenute nell'operatore divergenza) presenti nella scrittura in forma forte. Questo comporta condizioni più deboli per la soluzione del problema, da cui il nome di forma debole.

- *Campo termico* In analogia con quanto visto per il campo meccanico, partendo dall'Eq.5.59, definendo $q_n = \vec{q} \cdot \vec{n}$ ed introducendo la condizione al contorno $q_n = \bar{q}_n$, la forma debole dell'equazione di equilibrio del campo termico si può scrivere come:

$$G_T = \int_{\Omega} W(C\dot{T} - b)d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \vec{W})^T \vec{q} d\Omega + \int_{\Gamma_q} W \bar{q}_n d\Gamma = 0 \quad (5.89)$$

- *Campo Elettrico* Ancora una volta, partendo dall'Eq.5.74 e ricordando che $\vec{J} \cdot \vec{n} = 0$, possiamo scrivere la forma debole dell'equazione di equilibrio del campo elettrico come:

$$G_E = - \int_{\Omega} (\nabla \vec{W})^T \vec{J} d\Omega = 0 \quad (5.90)$$

5.6 Soluzione col metodo degli elementi finiti

Il metodo degli elementi finiti è un metodo approssimato, ciò significa che la soluzione del problema viene raggiunta approssimando le funzioni incognite. Gli approcci possibili sono due:

- le funzioni vengono approssimate direttamente sull'intero dominio
- il dominio viene suddiviso in piccole regioni, in ciascuna delle quali le funzioni incognite vengono approssimate. Solo in seguito si procederà alla costruzione di una approssimazione valida sull'intero dominio

Il metodo degli elementi finiti impiega il secondo approccio ed ha l'indubbio vantaggio di poter essere applicato qualunque sia la geometria del problema. Il dominio Ω viene innanzitutto suddiviso in tante piccole regioni dette *elementi finiti*:

$$\Omega \approx \Omega_h = \sum_{e=1}^{N_{el}} \Omega_e \quad (5.91)$$

dove Ω_h è l'approssimazione del dominio creata dall'insieme degli elementi e Ω_e rappresenta il generico elemento. Una volta creato il dominio approssimato, ognuno degli integrali che compaiono nella formulazione debole del problema può essere scritto in maniera approssimata come somma di integrali relativi ai singoli elementi. Consideriamo ora la soluzione del problema termico, dal momento che in esso compare un termine aggiuntivo (quello in \dot{T}) assente negli altri due problemi considerati. Considerando l'Eq.5.89 e ricordando che $\vec{q} = -\mathbf{k}\nabla T$, possiamo scrivere:

$$G_T = \int_{\Omega} W(C\dot{T} - b)d\Omega + \int_{\Omega} (\nabla\vec{W})^T \mathbf{k}\nabla T d\Omega + \int_{\Gamma_q} W\bar{q}_n d\Gamma = 0 \quad (5.92)$$

Introducendo l'approssimazione sul dominio possiamo riscrivere questa equazione come:

$$\begin{aligned} G_T \approx G_h &= \sum_{e=1}^{N_{el}} \int_{\Omega_e} W(C\dot{T} - b)d\Omega_e + \sum_{e=1}^{N_{el}} \int_{\Omega_e} (\nabla\vec{W})^T \mathbf{k}\nabla T d\Omega_e + \\ &+ \sum_{e=1}^{N_{el}} \int_{\Gamma_{qe}} W\bar{q}_n d\Gamma_e = 0 \end{aligned} \quad (5.93)$$

A questo punto è necessario introdurre una approssimazione per la funzione temperatura, che rappresenta l'incognita del problema termico; essa viene

calcolata interpolando i valori di temperatura ai nodi mediante le cosiddette funzioni di forma N , ossia:

$$T = \sum_{i=1}^{N_n} N_i(\vec{\xi}) \hat{T}^i(t) = \vec{N}^T \vec{\hat{T}} \quad (5.94)$$

dove l'indice i rappresenta l' i -esimo elemento, \vec{N} è il vettore delle funzioni di forma dei vari nodi, scritte in funzione delle coordinate naturali $\vec{\xi}$, N_n rappresenta il numero di nodi di ogni elemento (nel nostro caso sono 8) e $\vec{\hat{T}}$ è il vettore delle temperature nodali. Nel nostro studio, sono state impiegate funzioni di forma trilineari, espresse come:

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_1 \xi_{i1})(1 + \xi_2 \xi_{i2})(1 + \xi_3 \xi_{i3}) \quad i = 1, 8 \quad (5.95)$$

dove le varie ξ_{ij} ($j=1,3$) sono delle costanti che dipendono dal nodo considerato. Si può a questo punto definire la matrice \mathbf{B} , contenente le derivate delle funzioni di forma:

$$B_{ik} = N_{i,k} = \frac{\partial N_i}{\partial \xi_k} = \frac{\partial N_i}{\partial x_j} \frac{\partial x_j}{\partial \xi_k} = \frac{\partial N_i}{\partial x_j} J_{jk} \quad (5.96)$$

dove J_{jk} è definito come:

$$J_{jk} = \frac{\partial x_j}{\partial \xi_k} \quad (5.97)$$

Anche la funzione peso W può essere riscritta in termini delle funzioni di forma:

$$W = \sum_{i=1}^{N_n} N_i^T(\vec{\xi}) \hat{W}^i = \vec{N}^T \vec{\hat{W}} \quad (5.98)$$

dove $\vec{\hat{W}}$ è un vettore di parametri arbitrari. Considerando nuovamente l'Eq.5.89, essa può essere riscritta in termini delle funzioni di forma e quindi è possibile scriverne la forma approssimata come:

$$G_h = \sum_{e=1}^{N_{el}} \vec{\hat{W}}^T (\mathbf{M} \vec{\hat{T}} + \mathbf{K} \vec{\hat{T}} - \vec{F}) = 0 \quad (5.99)$$

in cui:

- \mathbf{M} è la matrice di capacità termica, definita come:

$$\mathbf{M} = \int_{\Omega_e} \vec{N} C \vec{N}^T d\Omega_e \quad (5.100)$$

- \mathbf{K} è la matrice di conduttività, definita come:

$$\mathbf{K} = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{k} \mathbf{B} d\Omega_e \quad (5.101)$$

- \vec{F} è il vettore dei carichi definito come:

$$\vec{F} = \int_{\Omega_e} \vec{N}^T b d\Omega_e - \int_{\Gamma_{eq}} \vec{N}^T \bar{q}_n d\Gamma_e \quad (5.102)$$

Poichè W è una funzione arbitraria, il sistema di equazioni da risolvere diventa:

$$\mathbf{M}\dot{\vec{T}} + \mathbf{K}\vec{T} = \vec{F} \quad (5.103)$$

Gli integrali vengono risolti utilizzando dei metodi di quadratura numerica, in cui, per esempio:

$$K_{ij} = \sum_{l=1}^L B_{ik}^T(\vec{\xi}_l) \mathbf{k} B_{jk}(\vec{\xi}_l) j(\vec{\xi}_l) w_l \quad (5.104)$$

in cui: $j(\vec{\xi}_l)$ è il determinante di \mathbf{J} calcolato per il punto di quadratura ($\vec{\xi}_l$) e w_l sono i pesi della formula di quadratura. Come punti di quadratura e relativi pesi si sono utilizzati quelli indicati per il *metodo di Gauss*, nel caso di 8 punti per elemento. Si è quindi approssimata la derivata prima temporale con il *metodo di Eulero implicito*, ovvero:

$$\dot{T}_{(n+1)} = \frac{1}{\Delta t} [T_{(n+1)} - T_{(n)}] \quad (5.105)$$

in cui Δt è l'incremento temporale considerato.

Il sistema di equazioni che viene ad essere definito è stato risolto con il *metodo di Newton*, che si basa sulla definizione di un residuo \vec{R} :

$$\vec{R} = \vec{F} - \mathbf{K}\hat{T} - \mathbf{M}\dot{\hat{T}} \quad (5.106)$$

Il metodo di Newton prevede la linearizzazione dell'equazione appena introdotta, la cui i -esima componente può scriversi come:

$$R_i^{(k+1)} = R_i^k + \frac{\partial R_i}{\partial T} \Big|^{(k)} dT^{(k)} = 0 \quad (5.107)$$

dove T è la temperatura, ossia l'incognita del problema considerato, al tempo t_{n+1} e k è il numero di iterazioni dell'algoritmo di Newton. Definiamo quindi la matrice tangente come:

$$K_i^{T^{(k)}} = -\frac{\partial R_i}{\partial T} \Big|^{(k)} \quad (5.108)$$

Si risolve quindi per $dT^{(k)}$ ottenendo:

$$dT^{(k)} = [K_i^{T^{(k)}}]^{-1} R_i^{(k)} \quad (5.109)$$

La soluzione viene quindi aggiornata tramite:

$$T^{(k+1)} = T^{(k)} + dT^{(k)} \quad (5.110)$$

In corrispondenza di ogni incremento di tempo, per la soluzione dell'Eq.5.103 si possono scegliere le seguenti condizioni iniziali:

$$T^0(t_{n+1}) = T(t_n) \quad (5.111)$$

dove una quantità senza indice (k) rappresenta un valore che abbia raggiunto la convergenza, ovvero, per il quale si sia raggiunta la condizione $\vec{R} = 0$ nei limiti di una tolleranza numerica prefissata. Nel caso di un problema lineare, il metodo di Newton converge in un'unica iterazione. Nel caso di un problema nonlineare il metodo mostra una velocità di convergenza quadratica. Riportiamo qui di seguito, per completezza, le espressioni dei residui e delle matrici tangenti per i tre campi considerati.

Campo meccanico

$$\vec{R}_M = - \int_{\Omega_e} \vec{N}^T \vec{f} d\Omega_e + \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega_e - \int_{\Gamma_{eq}} \vec{N}^T \bar{t} d\Gamma_e \quad (5.112)$$

$$\mathbf{K}_M^T = - \frac{\partial \vec{R}_M}{\partial \hat{\vec{u}}} = - \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \hat{\vec{u}}} d\Omega_e = - \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{a} \mathbf{B} d\Omega_e \quad (5.113)$$

ricordando che: $\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{B} \hat{\vec{u}}$ e $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{a} \boldsymbol{\epsilon}$.

Campo termico

$$\begin{aligned} \vec{R}_T &= \int_{\Omega_e} \vec{N}^T b d\Omega_e - \int_{\Gamma_{eq}} \vec{N}^T \bar{q}_n d\Gamma_e + \\ &- \left(\int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{k} \mathbf{B} d\Omega_e \right) \hat{T} - \left(\int_{\Omega_e} \vec{N} C \vec{N}^T d\Omega_e \right) \dot{\hat{T}} \end{aligned} \quad (5.114)$$

$$\mathbf{K}_T^T = - \frac{\partial \vec{R}_T}{\partial \hat{T}} = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{k} \mathbf{B} d\Omega_e \quad (5.115)$$

Campo elettrico

$$\vec{R}_E = - \left(\int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_E \mathbf{B} d\Omega_e \right) \vec{V} \quad (5.116)$$

$$\mathbf{K}_E^T = - \frac{\partial \vec{R}_E}{\partial \vec{V}} = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_E \mathbf{B} d\Omega_e \quad (5.117)$$

ricordando che $\vec{E} = -\mathbf{B}\vec{V}$ e $\vec{J} = \boldsymbol{\sigma}_e \vec{E}$

Dal momento che il problema da noi considerato coinvolge allo stesso tempo tutti e tre i campi, sarà necessario procedere alla soluzione contemporanea dei tre sistemi di equazioni. Il codice FEAP consente di suddividere il problema da risolvere nei tre sottoproblemi attraverso l'uso di partizioni. Le equazioni relative a ciascun campo vengono risolte indipendentemente in ogni istante di tempo e, mediante l'impiego di una opportuna metodologia, nota con il nome di *staggered analysis*, ci si assicura la convergenza complessiva nell'intervallo di tempo considerato.

Capitolo 6

Studio di un manipolatore in SMA

Le possibilità offerte dagli attuatori realizzati in lega a memoria di forma per la realizzazione di microdispositivi sono molteplici; oggi giorno tali attuatori trovano impiego nei più svariati campi tecnologici, assai rappresentativo è l'impiego che viene fatto di questo tipo di attuatori nella realizzazione di cartucce per stampanti a getto di inchiostro. Sebbene si tratti dell'esempio principale dell'utilizzo di questi dispositivi, vi sono ulteriori applicazioni che meritano di essere considerate: le SMA vengono infatti utilizzate per realizzare micropompe, microswith, micromanipolatore e tutta una vasta serie di microdispositivi che sarebbe lungo stare ad elencare. Fra tutti questi dispositivi, si è deciso di concentrare la nostra attenzione sulla realizzazione di un micromanipolatore, tale dispositivo, infatti, oltre a classici impieghi industriali presenta particolare interesse nel campo biomedico: infatti si può pensare di utilizzare un micromanipolatore montato sulla punta di un catetere durante interventi chirurgici a minima invasività o per svolgere una funzione di afferraggio vera e propria oppure, tarando opportunamente i parametri geometrici del dispositivo, per realizzare una funzione di taglio. In campo chirurgico la richiesta di strumenti molto piccoli in grado di esercitare forze di presa rilevanti è sempre maggiore e per questo lo studio di un micromanipolatore in Ni-Ti appare ampiamente giustificata, inoltre il materiale impiegato si presenta, a priori, come un candidato ideale in quanto presenta una densità di lavoro assai elevata. Oltre ad un impiego diretto in campo chirurgico, un micromanipolatore in SMA potrebbe trovare un'ulteriore applicazione nell'assemblaggio di altri dispositivi destinati alla pratica chirurgica. La diffusione delle tecniche laparoscopiche ha comportato la necessità di realizzare strumenti composti da componenti estremamente piccole e delicate che, come tali, necessitano di opportuni strumenti per essere manipolate

ed assemblate. Un micro manipolatore può essere impiegato, ad esempio, per posizionare le lenti delle microtelecamere utilizzate negli interventi in laparoscopia.

Svincoliamoci ora dall'impiego diretto in campo chirurgico, rimandando l'indagine relativa ad una tale applicazione a studi futuri, e limitiamoci a considerare il manipolatore come un mero strumento di afferraggio e manipolazione, prescindendo quindi da tutti gli aspetti di compatibilità con l'ambiente intra corporeo che, in questa fase, rappresenterebbero un'inutile complicazione. Indipendentemente dalla applicazione effettiva, le caratteristiche desiderate per il dispositivo sono le seguenti:

- Dimensioni estremamente contenute per poter manipolare oggetti di piccole dimensioni
- Sistema di attivazione semplice e che possa consentire un eventuale controllo di posizione
- Frequenze di operabilità che consentano un utilizzo pratico del dispositivo, ossia i tempi di chiusura e apertura del dispositivo devono essere "ragionevoli"
- Forza esercitata durante la presa sufficiente per gli scopi prefissati

Nell'indagare questi vari aspetti si è in primo luogo studiato il comportamento di un dispositivo, la cui geometria è stata già proposta in letteratura [1], definendo una procedura sistematica per il progetto dello stesso. Si è quindi valutata la realizzabilità di una soluzione alternativa che, quantomeno in linea teorica, consentirebbe di migliorare le caratteristiche del dispositivo consentendo un semplice meccanismo di controllo della posizione basato sul controllo della temperatura. Prima di iniziare a studiare nel dettaglio il dispositivo, è opportuno introdurre alcuni concetti relativi ai meccanismi alla base del funzionamento dello stesso.

6.1 Introduzione ai sistemi antagonisti

Come vedremo in seguito, il funzionamento del micromanipolatore è dovuto alla presenza di un sistema antagonista di attuatori. Per comprendere i principi alla base del funzionamento è opportuno considerare inizialmente un sistema antagonista basato su attuatori molto semplici, costituiti da molle in SMA. Prendendo in esame una singola molla bloccata ad una sua estremità, in seguito alla applicazione di una forza si potrà provocare in essa una deformazione (si è fatta l'ipotesi di trovarsi al di sotto della temperatura di inizio

della trasformazione di fase), una parte della quale rimarrà anche alla rimozione del carico. In seguito al riscaldamento dell'attuatore al di sopra di una opportuna soglia (determinata dalle proprietà specifiche del materiale), tale deformazione verrà recuperata completamente, a patto che la deformazione stessa sia inferiore a circa il 10% (Fig.6.1)

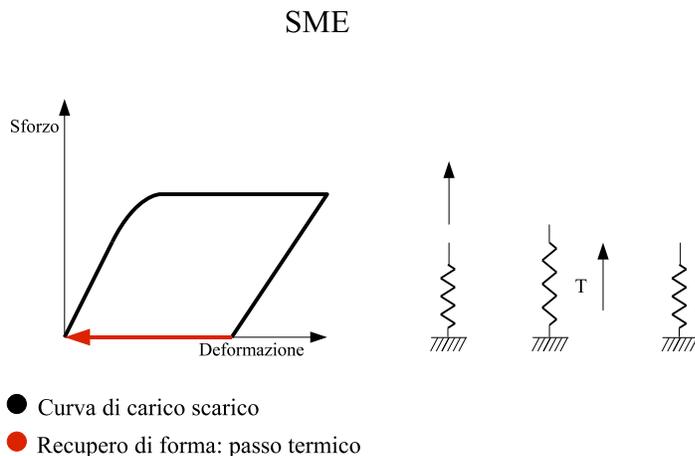


Figura 6.1: Comportamento a memoria di forma in una molla SMA

Per completezza consideriamo anche il caso in cui la temperatura di inizio della trasformazione di fase sia inferiore alla temperatura a cui si opera. In questo caso, l'applicazione di carichi anche elevati comporterà nella molla delle deformazioni che verranno completamente recuperate alla rimozione del carico stesso. Come già visto in precedenza, questo comportamento è noto con il nome di *pseudoelasticità* (Fig.6.2)

Prendiamo in esame ora il caso in cui una molla SMA venga caricata in modo da determinare una deformazione plastica residua alla rimozione del carico. A differenza del caso considerato in precedenza, andiamo a bloccare anche la seconda estremità della molla prima di procedere col riscaldamento. In questo caso la molla non sarà più in grado di recuperare la forma originaria, bensì in essa si verrà ad avere un incremento dello sforzo, fino al raggiungimento del ramo di scarico della curva caratteristica della molla per la temperatura che è stata raggiunta dopo il riscaldamento (Fig.6.3).

Se ora andiamo a raffreddare la molla SMA al di sotto della soglia caratteristica di temperatura, assisteremo ad una diminuzione dello sforzo a deformazione costante, finché non verrà intersecato il ramo di carico della

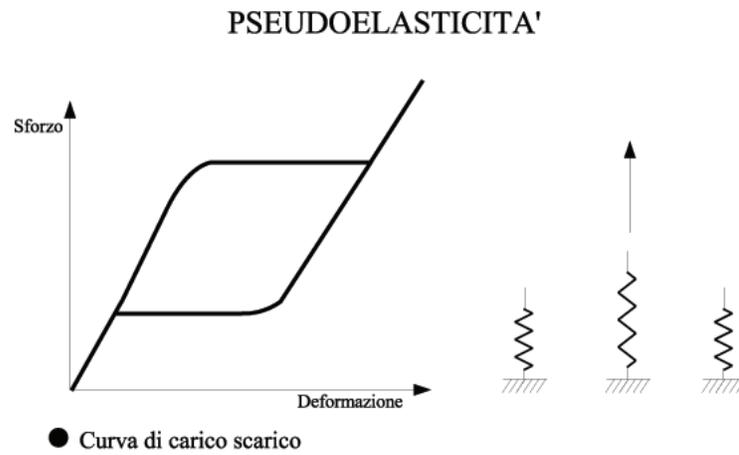


Figura 6.2: Comportamento pseudoelastico in una molla SMA

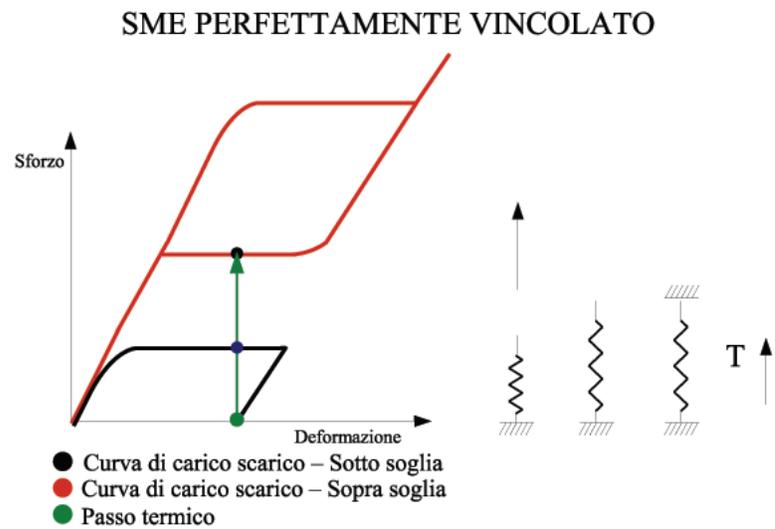


Figura 6.3: Comportamento di una molla SMA in presenza di un vincolo perfetto

curva caratteristica della molla SMA. Viene evidenziato un comportamento fondamentale, che tornerà utile in seguito: durante il riscaldamento, la molla SMA “lavora” sul ramo di scarico della sua curva caratteristica, mentre durante il raffreddamento “lavora” sul suo ramo di carico.

Quello appena presentato è un caso limite di quelli che si incontrano nella maggior parte dei dispositivi basati su attuatori SMA. In tali dispositivi infatti, l’attuatore SMA non è né libero di recuperare la sua forma ma nemmeno è vincolato perfettamente, è presente invece un altro componente che si oppone al recupero della forma mediante una forza, consentendo così all’attuatore SMA di compiere lavoro. Il caso più semplice è costituito da una molla SMA in serie ad una molla elastica. Come visto in precedenza, una estremità della molla SMA viene vincolato in modo da consentirne la deformazione plastica in seguito alla applicazione di un carico che viene successivamente rimosso. A questo punto il sistema serie viene vincolato anche all’altra estremità e si procede al riscaldamento della molla SMA. Come già accennato, non si potrà avere un recupero di forma completo in quanto è presente una molla che si oppone ad esso. Non sarà nemmeno possibile un incremento dello sforzo a deformazione costante, in quanto la molla elastica non è infinitamente rigida. Il sistema evolverà quindi verso stati caratterizzati da sforzi via via crescenti e deformazioni inferiori, seguendo la caratteristica sforzo-deformazione della molla elastica, opportunamente sovrapposta a quella della molla SMA (Fig.6.4). Il recupero di forma si arristerà al raggiungimento di una posizione di equilibrio, corrispondente all’intersezione fra il ramo di scarico della molla SMA e il ramo di carico della molla elastica.

La presenza della molla elastica fa in modo che, una volta che la molla inferiore torni ad essere sotto soglia quest’ultima venga nuovamente deformata fino al raggiungimento del punto di intersezione fra la curva della molla elastica e la curva di carico della molla SMA. Si è quindi realizzato un semplice meccanismo di attuazione in cui il punto in cui le due molle sono unite manifesta un movimento in entrambe le direzioni. Tale movimento è determinato andando a riscaldare o a raffreddare opportunamente la molla SMA. Anche in questo caso, durante il riscaldamento la molla SMA si trova sul suo ramo di scarico mentre durante il raffreddamento si assisterà ad uno scarico della stessa.

Se, in luogo della molla elastica, viene impiegata un’ulteriore molla SMA il funzionamento del dispositivo rimane in linea di principio del tutto analogo a quello appena visto. Considerando per semplicità il caso in cui le due molle accoppiate siano identiche, andiamo a vincolare una estremità del sistema serie in modo da poter deformare plasticamente una delle due molle. A questo punto anche la seconda estremità del dispositivo viene vincolata e si procederà al riscaldamento selettivo della molla SMA deformata. An-

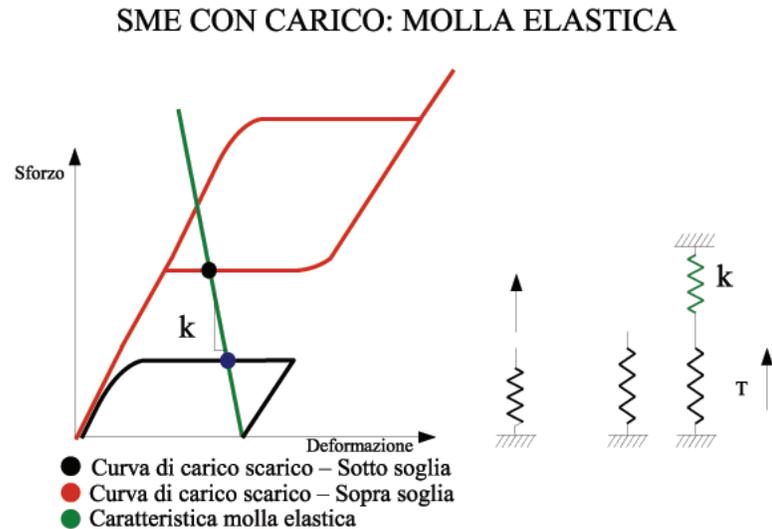


Figura 6.4: Comportamento di una molla SMA in presenza di una molla elastica antagonista

che in questo caso, non sarà possibile avere un recupero di deformazione a sforzo costante né tantomeno un incremento dello sforzo a deformazione costante. Quella che si verificherà sarà un'evoluzione del sistema verso stati di sforzo-deformazione caratterizzati da sforzi crescenti e da deformazioni decrescenti, seguendo la caratteristica sforzo-deformazione di una molla SMA, opportunamente sovrapposta a quella di un'altra molla SMA (Fig.6.5)

Andando a raffreddare la molla SMA, essa verrà ad essere deformata sotto l'effetto della azione esercitata dall'altra molla SMA posta in serie. La deformazione si arresterà al raggiungimento di un nuovo punto di equilibrio determinato dalla intersezione fra il ramo di carico della molla inferiore sotto-soglia e la curva caratteristica della molla superiore. Anche utilizzando due molle SMA si riesce a realizzare un semplice dispositivo di attuazione in cui il punto di unione delle due molle può subire spostamenti in entrambe le direzioni. In questo caso la direzione del movimento sarà determinata dall'attuatore SMA che viene riscaldato. Affinchè non sia abbia il simultaneo riscaldamento delle due molle è necessario prevedere una forma di isolamento termico fra le molle stesse.

Ora che si sono esaminati i concetti fondamentali relativi al funzionamento di due attuatori che lavorano in antagonismo è possibile entrare nel dettaglio, introducendo in primis il dispositivo allo studio e l'idea alla base del suo funzionamento, definendo in seguito la procedura seguita per il

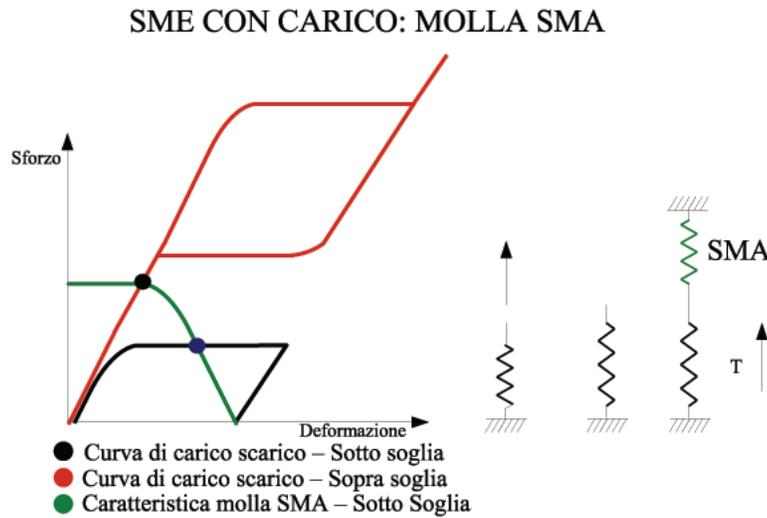


Figura 6.5: Comportamento di una molla SMA in presenza di un'altra molla SMA antagonista

progetto e il dimensionamento dello stesso.

6.2 Manipolatore monolitico in SMA

Il dispositivo di cui si è studiato il comportamento è quello rappresentato in Fig.6.6

Come evidenziato in figura, il manipolatore è costituito da due componenti principali (trascuriamo, per il momento, la componente centrale la cui funzione è essenzialmente quella di isolare termicamente i due attuatori): la parte inferiore è costituita da una molla piana. Affinché il dispositivo possa funzionare è necessario che tale molla sia opportunamente predeformata. Tale deformazione infatti sarà recuperata (parzialmente) in seguito al riscaldamento del dispositivo. Tale recupero di forma comporterà la generazione di una forza che, agendo sull'attuatore superiore, ne determinerà la chiusura. In maniera schematica, il manipolatore può essere rappresentato in Fig.6.7.

La parte superiore del dispositivo è costituita in sostanza da un attuatore non-lineare, denominato *attuatore rotazionale*, il quale è in grado di trasformare una forza lineare in una forza di “presa” esercitata fra le sue ganasce (Fig.6.8)

Una forza diretta come in figura sarà quindi in grado di determinare

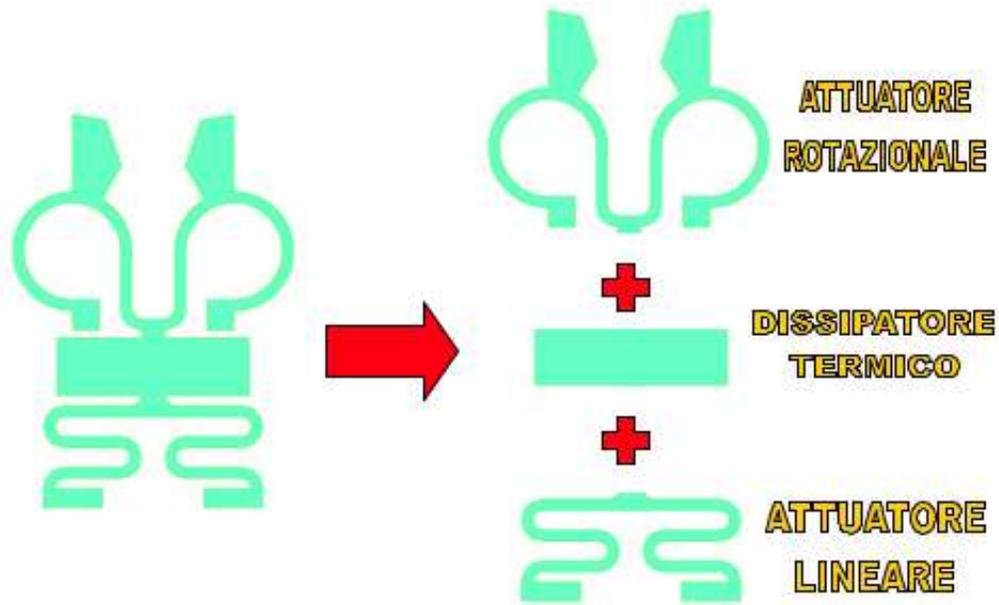


Figura 6.6: Manipolatore monolitico in SMA: sono evidenziate le tre parti che lo compongono

la chiusura delle ganasce ed eserciterà una forza sull'oggetto eventualmente presente fra di esse.

La parte inferiore è invece, come accennato in precedenza, costituita da un attuatore lineare che opportunamente predeformato e successivamente riscaldato sopra la temperatura di inizio transizione è in grado di esercitare una forza di richiamo diretta come mostrato in Fig.6.9.

Quella che si è appena descritta è la fase di chiusura nel dispositivo. Partendo proprio dalla configurazione chiusa è possibile, andando a riscaldare opportunamente l'attuatore rotazionale, riportarsi in una configurazione aperta, completando così un ciclo di chiusura/apertura e consentendo un utilizzo ciclico del manipolatore. Infatti, se si riscalda selettivamente l'attuatore rotazionale si provocherà in esso un recupero di forma che porterà alla generazione di una forza in grado di deformare nuovamente l'attuatore lineare. Si capisce facilmente che ci si trova in una situazione analoga a quella iniziale e che un riscaldamento opportuno dell'attuatore lineare determinerà una nuova chiusura del dispositivo.

Nel dispositivo considerato, i due attuatori lavorano in maniera antagonista e vengono attivati in maniera indipendente ed alternata. Dal momento che l'attivazione avviene in seguito a riscaldamento realizzato per effetto Jou-

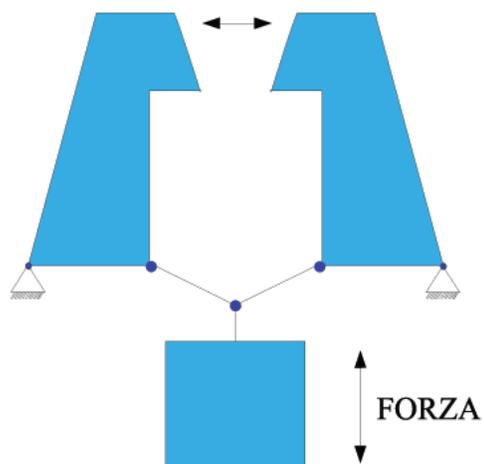


Figura 6.7: Schema funzionale di un micromanipolatore realizzato in SMA

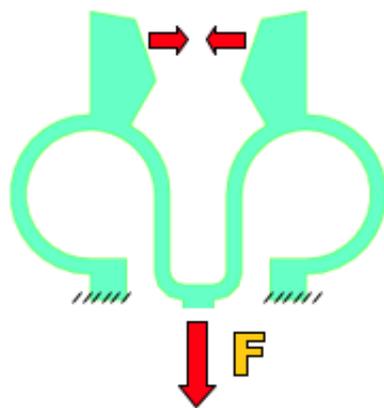


Figura 6.8: Gear Actuator: una forza lineare si traduce nella chiusura delle ganasce



Figura 6.9: Attuatore lineare

le, si è prevista una zona centrale la cui finalità è quella, come già accennato, di isolare termicamente i due attuatori, prevenendone l'attivazione contemporanea. La scelta delle dimensioni di questa componente centrale potrebbe essere oggetto di ottimizzazione, tuttavia ci si è limitati a considerare delle dimensioni ampiamente sufficiente a realizzare lo scopo.

La geometria complessiva e le dimensioni impiegate per la realizzazione del dispositivo che è stato oggetto delle successive simulazioni sono rappresentate in Fig.6.10.

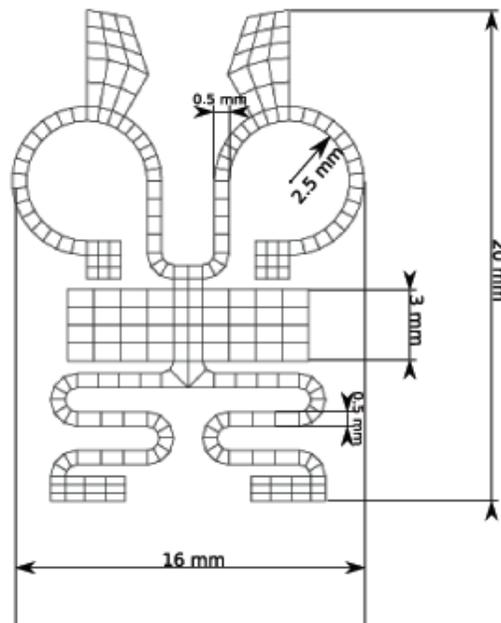


Figura 6.10: Geometria e misure caratteristiche del dispositivo considerato

Essendo il dispositivo realizzato interamente in SMA è possibile ricavarlo

mediante taglio laser da un'unica lastra di Nitinol con notevoli vantaggi per quanto riguarda la semplicità realizzativa.

Affinchè il dispositivo possa funzionare, come già accennato, è necessario procedere alla predeformazione dell'attuatore lineare inferiore: sfruttando l'effetto a memoria di forma, tale attuatore recupererà la forma che aveva prima della deformazione determinando un'azione sull'*attuatore rotazionale* che ne provocherà la chiusura. A questo punto, riscaldando selettivamente l'*attuatore rotazionale* si provocherà anche in esso il recupero della forma e, conseguentemente, l'attuatore lineare inferiore si deformerà nuovamente, consentendo di iniziare un nuovo ciclo di chiusura/apertura (Fig.6.11).

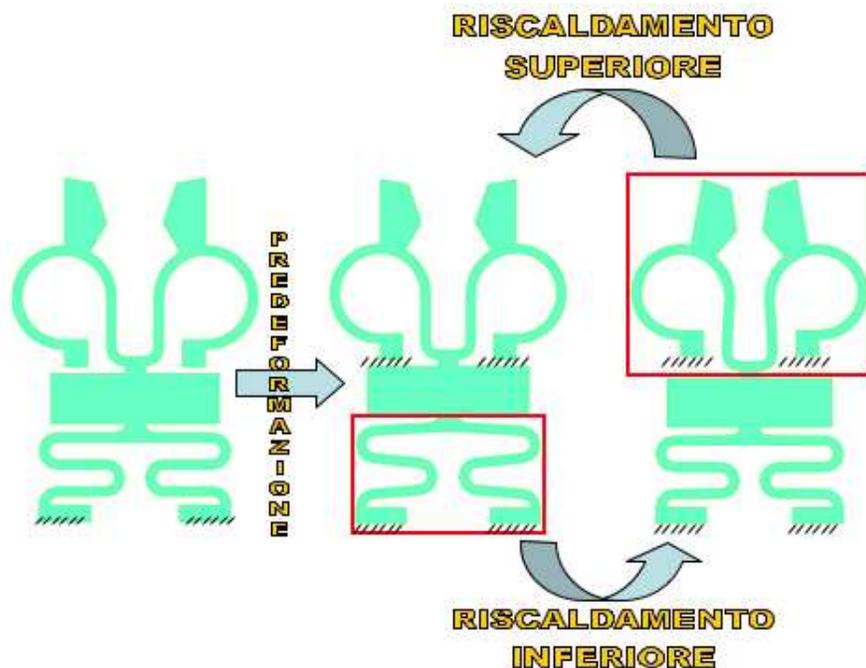


Figura 6.11: Fasi di funzionamento del dispositivo

Per attivare in maniera selettiva i singoli dispositivi, viene applicata una differenza di potenziale su dei connettori previsti appositamente su ciascun attuatore (Fig.6.12).

Oltre a consentire l'applicazione della differenza di potenziale, tali connettori consentono anche di fissare il dispositivo in SMA ad un supporto, in modo da realizzare le condizioni di vincolo necessarie al funzionamento del micromanipolatore.

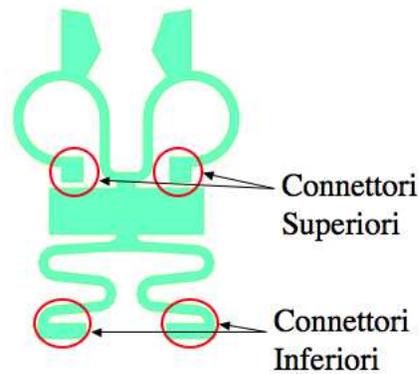


Figura 6.12: Connettori per l'applicazione del potenziale

6.2.1 Progetto del dispositivo

Per poter affrontare in maniera sistematica la realizzazione di un micromanipolatore, si è messa a punto una procedura di progettazione costituita di quattro fasi successive:

- Caratterizzazione degli attuatori nel piano forza-spostamento
- Rappresentazione del dispositivo complessivo nel piano forza-spostamento al variare della predeformazione
- Scelta della predeformazione da utilizzare
- Simulazione del dispositivo

Applichiamo ora questa procedura per la progettazione di tre diverse varianti del dispositivo. Il primo dispositivo che verrà considerato sarà un manipolatore monolitico composto da due attuatori SME; successivamente si considererà una soluzione alternativa impiegante un unico attuatore SME che lavora in opposizione ad una componente pseudoelastica. Infine si valuterà la realizzabilità di un dispositivo che consenta il raggiungimento di due posizioni di chiusura e che sia dunque in grado di afferrare oggetti con dimensioni caratteristiche differenti.

Progetto di un manipolatore monolitico in SMA

Come già detto, il primo passo da compiere nel progetto di un micromanipolatore consiste nella caratterizzazione meccanica dei singoli attuatori che

lo compongono. A tale fine, si è provveduto a bloccare i connettori dei singoli attuatori andando ad applicare una forza, il cui andamento è presentato in Fig.6.13, e misurando i relativi spostamenti rispetto ad un sistema di riferimento opportuno fissato sull'attuatore.

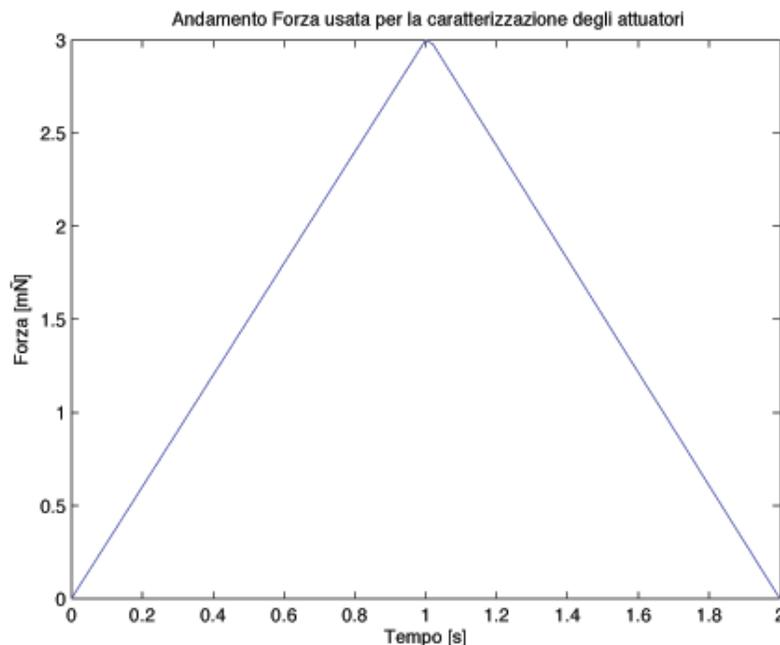


Figura 6.13: Andamento della forza utilizzata per la caratterizzazione degli attuatori

Dal momento che durante il funzionamento del dispositivo, per lo meno negli istanti di chiusura ed apertura, ciascun attuatore si trova in due possibili fasi, ogni attuatore avrà due curve caratteristiche: una relativa alla fase martensitica e una a quella austenitica. La forza viene applicata a ciascun attuatore con le modalità presentate in Fig.6.14

Per la caratterizzazione degli attuatori in fase austenitica, si è provveduto al riscaldamento dell'attuatore mediante una tensione opportuna applicata sugli appositi connettori: l'attuatore è lasciato libero di riscaldarsi per un secondo prima che la effettiva prova di carico/scarico venga effettuata. Si noti che il potenziale rimane comunque applicato per tutta la durata della prova, in modo da riprodurre il più possibile fedelmente quelle che saranno le reali condizioni di utilizzo. Una volta effettuate queste prove è stato possibile ottenere le rappresentazioni nello spazio forza-spostamento presentate nelle Figg. 6.15 - 6.18

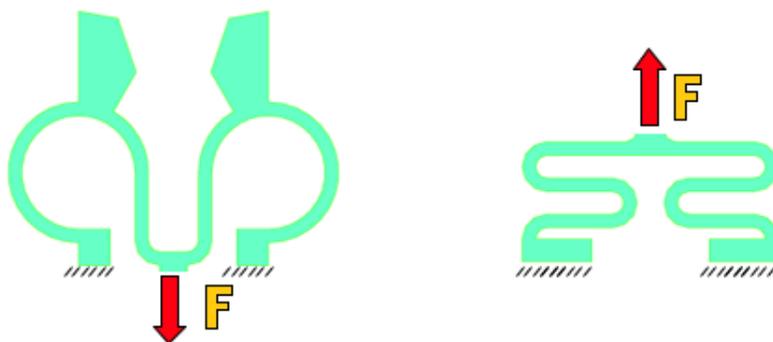


Figura 6.14: Prove di trazione per la caratterizzazione degli attuatori

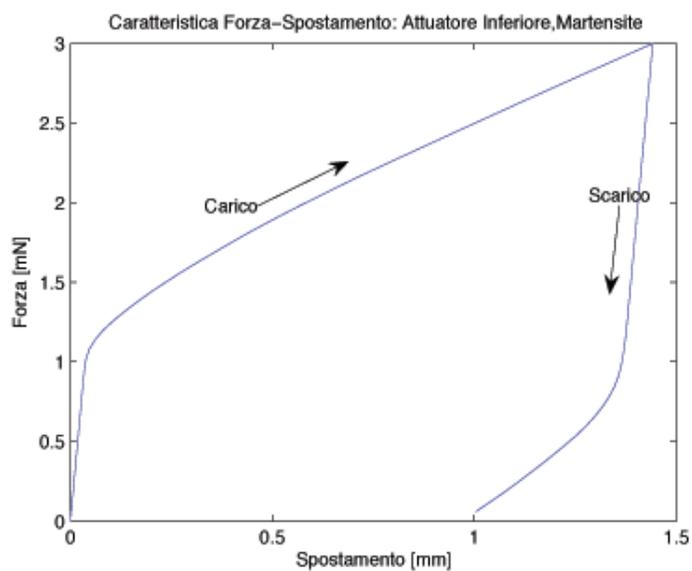


Figura 6.15: Curva di carico/scarico dell'attuatore lineare in fase martensitica

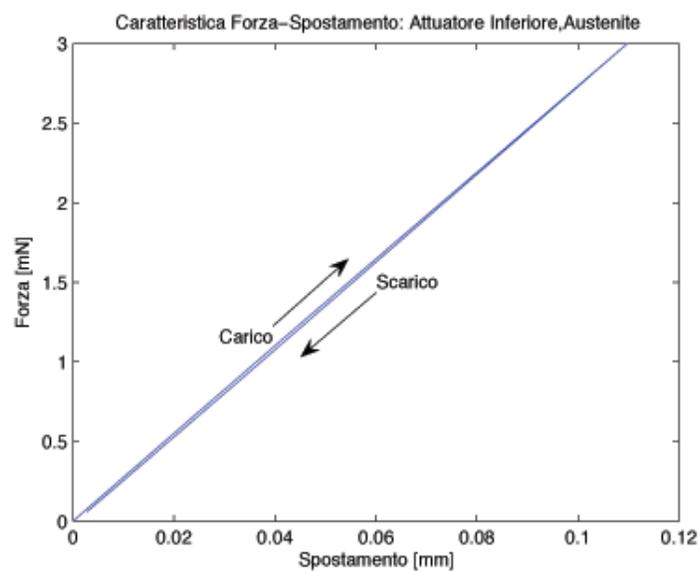


Figura 6.16: Curva di carico/scarico dell'attuatore lineare in fase austenitica

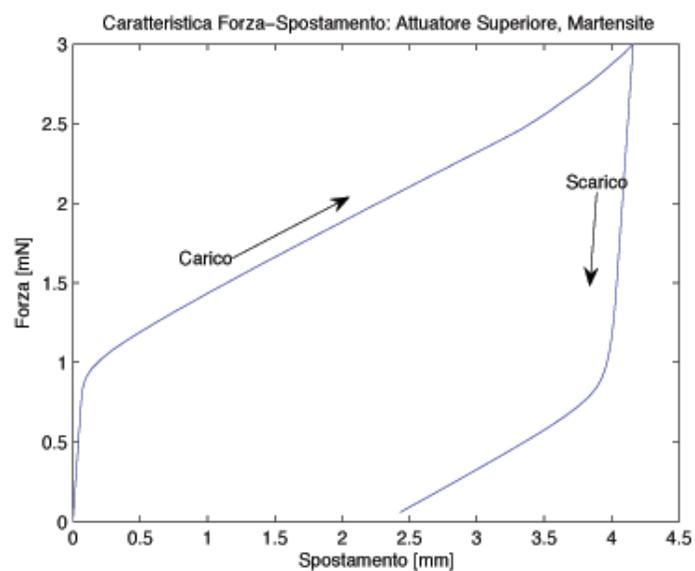


Figura 6.17: Curva di carico/scarico dell'attuatore rotazionale in fase martensitica

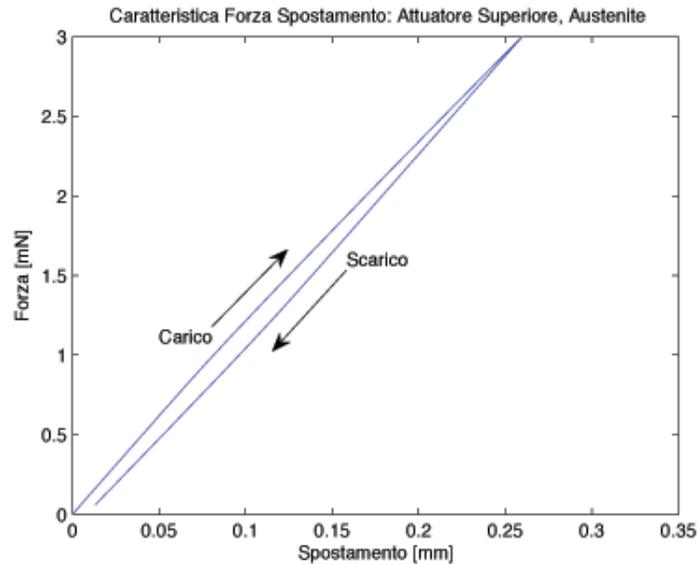


Figura 6.18: Curva di carico/scarico dell'attuatore rotazionale in fase austenitica

Considerando il dispositivo complessivo, si nota che gli spostamenti misurati per l'attuatore superiore hanno un verso opposto rispetto a quelli della molla inferiore. Per questo motivo, prima di poter rappresentare su uno stesso piano le caratteristiche dei due attuatori, sarà necessario invertire il segno degli spostamenti dell'attuatore superiore in entrambe le caratteristiche prima presentate. Si ottiene quindi una rappresentazione omogenea degli attuatori nel piano sforzo-spostamento che ci consentirà di proseguire nel progetto del dispositivo.

A questo punto, è opportuno fare una considerazione: durante il funzionamento del manipolatore i due attuatori si troveranno alternativamente in fase austenitica ed in fase martensitica. Siamo dunque interessati a valutare i punti di intersezione fra la caratteristica dell'attuatore inferiore in fase martensitica con quella dell'attuatore superiore in fase austenitica e viceversa. Fatte queste premesse, è ora possibile passare alla seconda fase di progettazione, ossia la rappresentazione dell'intero dispositivo sul piano forza-spostamento. Tale rappresentazione si ottiene andando a sovrapporre le caratteristiche degli attuatori su di uno stesso piano, avendo prima l'accortezza di traslare le caratteristiche relative all'attuatore superiore. Tale traslazione corrisponde alla predeformazione imposta alla molla. Senza tale predeformazione, le varie caratteristiche si intersecherebbero in un unico

punto, corrispondente all'origine degli assi, e il dispositivo sarebbe del tutto inutile. Utilizzando invece un'opportuna predeformazione (che si traduce come detto in una traslazione delle caratteristiche), si ottiene una rappresentazione come quella presentata in Fig.6.19 È importante altresì notare che,

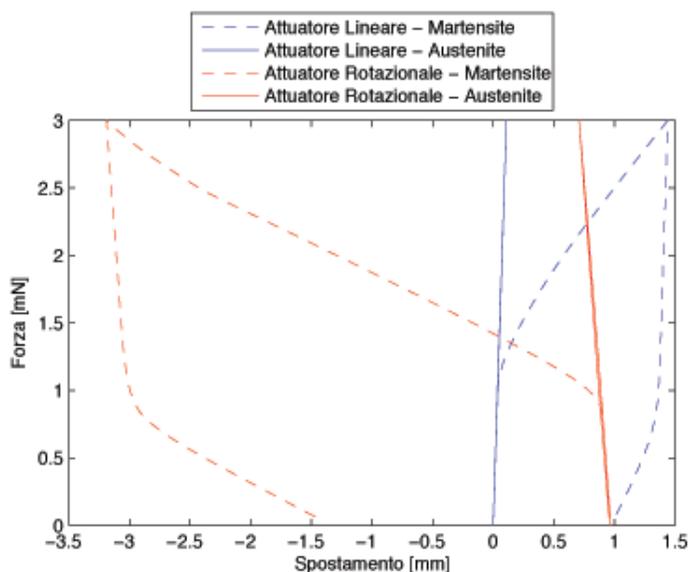


Figura 6.19: Rappresentazione complessiva nel piano forza-spostamento del meccanismo antagonista alla base del funzionamento del micromanipolatore

per come è costruito il dispositivo, quando gli attuatori si trovano in fase martenisitica “lavorano” in carico, mentre quando essi si trovano in fase austenitica “lavorano” sul ramo di scarico della loro caratteristica. Per questo motivo, ai nostri fini è rilevante solamente uno dei due rami delle caratteristiche presentate: quello di carico per la fase martenisitica e quello di scarico per la fase austenitica. La rappresentazione in Fig.6.19 può dunque essere semplificata andando a rappresentare i soli rami di interesse delle caratteristiche. Tale rappresentazione semplificata è proposta in Fig.6.20 Come si può notare le varie caratteristiche si intersecano in 2 punti¹. Tali punti corrispondono ai due punti di equilibrio del sistema, ovvero alla configurazione

¹In realtà i punti di equilibrio sono 4: due dati dall'intersezione delle caratteristiche degli attuatori quando si trovano nella stessa fase e due dall'intersezione delle caratteristiche degli attuatori quando si trovano in fase diversa. Dal momento che si ipotizza che i due attuatori non si trovino mai contemporaneamente in fase austenitica e poichè si ignorano gli istanti in cui i due attuatori si trovano contemporaneamente in fase martenisitica, solamente due punti di intersezione sono degni di nota

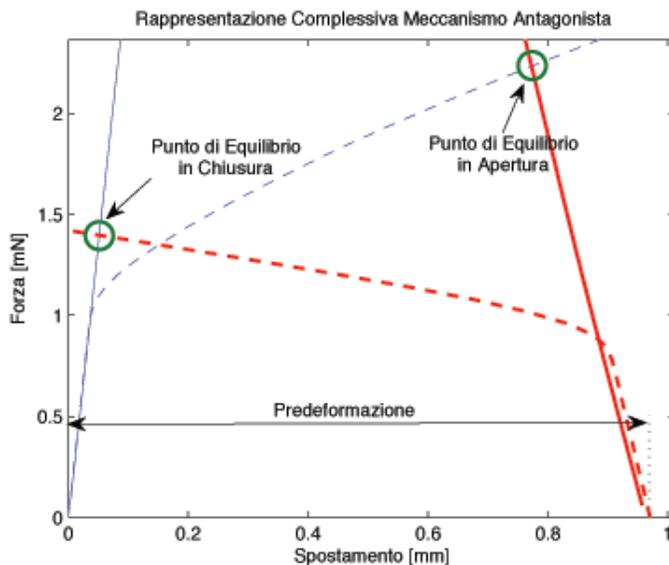


Figura 6.20: Rappresentazione complessiva nel piano forza-spostamento del meccanismo antagonista alla base del funzionamento del micromanipolatore

chiusa ed aperta del dispositivo. Infatti, tali punti rappresentano quelle configurazioni del dispositivo in cui le forze esercitate da entrambi gli attuatori si compensano e quindi il dispositivo stesso cessa di muoversi. Non è sufficiente tuttavia che vi siano questi due punti di equilibrio per assicurare il funzionamento del dispositivo: è necessario che i punti di intersezione siano tali per cui la forza all'equilibrio comporti un'effettiva chiusura del dispositivo (ovvero sia capace di fare chiudere le ganasce dell'attuatore rotazionale) in corrispondenza del punto di equilibrio in chiusura e invece non determini una chiusura apprezzabile delle ganasce in corrispondenza del punto di equilibrio in apertura. Tale condizione deve essere opportunamente verificata e può rappresentare un criterio di scelta della predeformazione da impiegare. Consideriamo ad esempio la Fig.6.21 in essa sono rappresentate due configurazioni corrispondenti rispettivamente ad una predeformazione di 0.7 (caso I) e di 0.971 (caso II) *mm*. Come si può notare, nel caso della predeformazione pari a 0.971 *mm* si ha una forza in chiusura più elevata (anche se di poco) rispetto al caso I. Tale caratteristica può essere desiderabile, in quanto, oltre a determinare una chiusura maggiore del manipolatore, corrisponde anche ad una forza di presa maggiore. Tuttavia anche la forza in apertura nel caso II risulta essere maggiore rispetto al caso I. Si tratta di appurare se l'aumento di tale forza giustifichi la scelta di una predeformazione più elevata volto al-

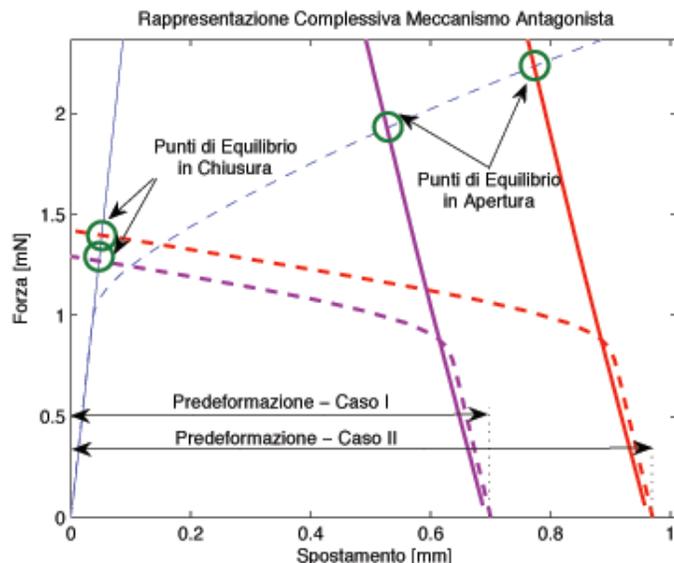


Figura 6.21: Punti di equilibrio in corrispondenza di diverse predeformazioni

l'aumento della forza di presa e, quindi, del grado di chiusura del dispositivo. Per questo scopo si devono effettuare delle simulazioni indirizzate a valutare il grado di chiusura e apertura del dispositivo in corrispondenza delle varie forze. Nel caso esaminato si sono ottenuti i risultati presentati in Fig.6.22

Come si può apprezzare dalla figura, nel caso II si ottiene una chiusura maggiore del dispositivo e, come già detto in precedenza, una forza di presa maggiore. Per quanto riguarda invece la condizione di apertura del dispositivo, in entrambe i casi considerati si riesce ad ottenere una riapertura sufficiente. Appare evidente dunque, che la predeformazione di 0.971 mm rappresenta la scelta migliore fra le due proposte. L'indagine della predeformazione da impiegare può essere ovviamente oggetto di ottimizzazione volta alla massimizzazione della chiusura del dispositivo, ferma restando una sufficiente riapertura del dispositivo. Purtroppo la ricerca della predeformazione migliore risulta essere una procedura estremamente lunga, basata sul confronto diretto fra i gradi di apertura/chiusura corrispondenti a due diversi valori di deformazione; pertanto si è preferito limitarsi al confronto fra le due predeformazioni considerate, rimandando al futuro un'analisi più approfondita di questo aspetto.

Una volta scelta l'entità della predeformazione da impiegare, l'ultimo passo che resta da compiere è quello di andare a simulare il comportamento del dispositivo complessivo mediante un'analisi agli elementi finiti. L'intera si-

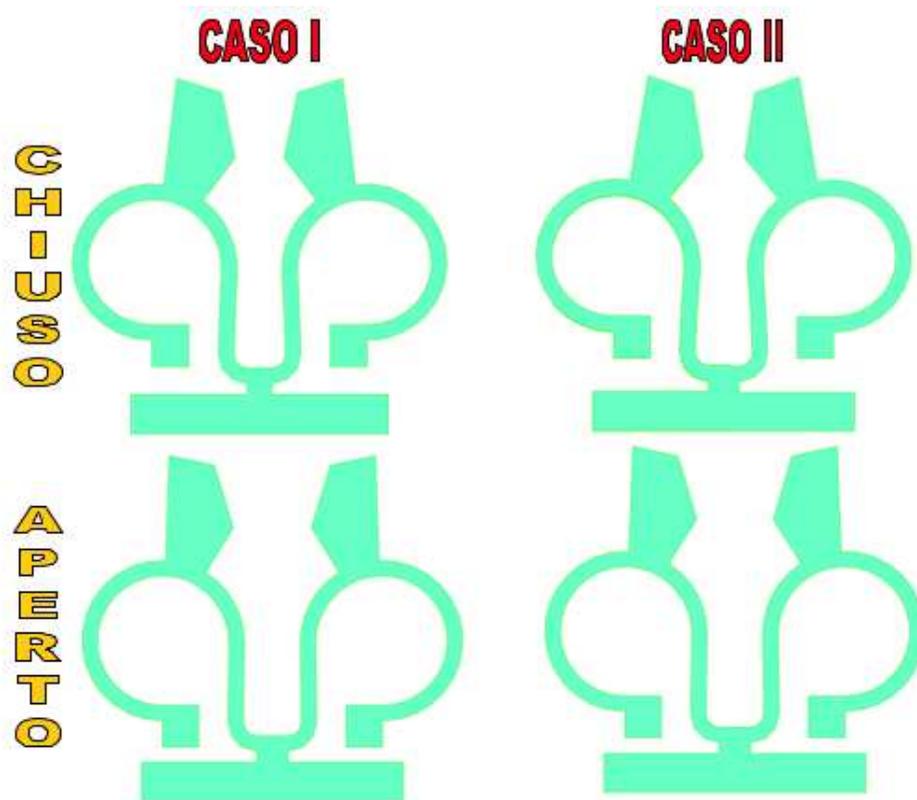


Figura 6.22: Valutazione del grado di chiusura in corrispondenza dei punti di equilibrio considerati

mulazione può suddividersi in due fasi distinte. Nella prima fase, detta di *predeformazione*, la molla inferiore viene bloccata nei suoi connettori mentre il resto del dispositivo è libero di muoversi. Viene quindi applicata una opportuna forza volta a deformare plasticamente la molla stessa in modo da raggiungere la predeformazione prescelta. Una volta esaurita questa fase si procede alla attivazione vera e propria del dispositivo: tale fase è costituita da due sottofasi che possono ripetersi tante volte quanti sono i cicli operativi cui è sottoposto il dispositivo. La prima di queste sottofasi è costituita dall'attivazione dei connettori inferiori e consiste essenzialmente nell'applicazione di un potenziale di 1.6 V su di essi. Tale potenziale genererà una corrente che per effetto Joule riscaldereà il dispositivo inferiore, determinando l'effetto a memoria di forma, mentre quello superiore rimarrà ampiamente sotto soglia, data la presenza del dissipatore termico. L'effetto del riscaldamento sarà quello di spostare il dispositivo verso il suo punto di equilibrio in chiusura, comportando l'avvicinamento delle ganasce. Una volta che il dispositivo è chiuso si passerà alla successiva fase che è quella di attivazione dei connettori superiori. Anche in questo caso si applicherà una differenza di potenziale di 1.6 V ma in questo caso saranno i connettori superiori ad essere attivati e sarà l'attuatore superiore a manifestare l'effetto a memoria di forma. A questo punto il dispositivo si sposterà verso il punto di equilibrio in apertura, in quanto il dispositivo superiore si troverà in fase austenitica mentre quello inferiore sarà in fase martensitica. Il dispositivo è quindi pronto per successivi cicli di chiusura/apertura.

I parametri utilizzati per il materiale impiegato per la simulazione sono riportati in Tab.6.2.1

In Fig.6.23 sono rappresentati i risultati delle simulazioni relativi ad un unico ciclo di chiusura/apertura.

Nel primo grafico sono presentati gli spostamenti orizzontali della ganascia di destra durante il funzionamento del dispositivo. Nei grafici successivi, invece, è riportata la temperatura di un punto appartenente rispettivamente all'attuatore lineare e a quello rotazionale. Come si evince dai grafici, l'attivazione del dispositivo è proprio conseguente al riscaldamento selettivo ed alternato dei due attuatori antagonisti. Si noti che, di fatto, viene evitata la contemporanea attivazione degli attuatori: infatti non ci sono due zone temporali in cui i due dispositivi si trovino entrambe al di sopra della temperatura di soglia per l'attivazione dell'effetto memoria di forma (corrispondente nel nostro caso a una ΔT pari a 20° K). In Fig.6.24 vengono mostrate le distribuzioni di temperatura del dispositivo durante le fasi di chiusura (a) ed apertura (b).

Bisognerebbe verificare se i punti di equilibrio in chiusura e in apertura previsti nel corso della progettazione vengono effettivamente raggiunti du-

| | |
|---|-----------------------|
| Modulo Elastico E | 53000 N/mm^2 |
| Deformazione limite | 0.04 |
| Hardening | 1000 N/mm^2 |
| Dipendenza dello stress critico dalla temperatura β | 2.1 N/mm^2K° |
| Raggio superficie di snervamento | 20 N/mm^2 |
| Calore specifico | 5.44 J/gK° |
| Conduttività elettrica martensite | 1.42857 $1/\omega mm$ |
| Conduttività elettrica austenite | 1.0 $1/\omega mm$ |
| Temperatura di partenza del corpo | 293 K° |
| Temperatura inizio trasformazione | 313 K° |
| Coefficiente di scambio convettivo | 5 W/mmK° |

Tabella 6.1: Valori dei parametri del materiale impiegato per la simulazione del dispositivo monolitico

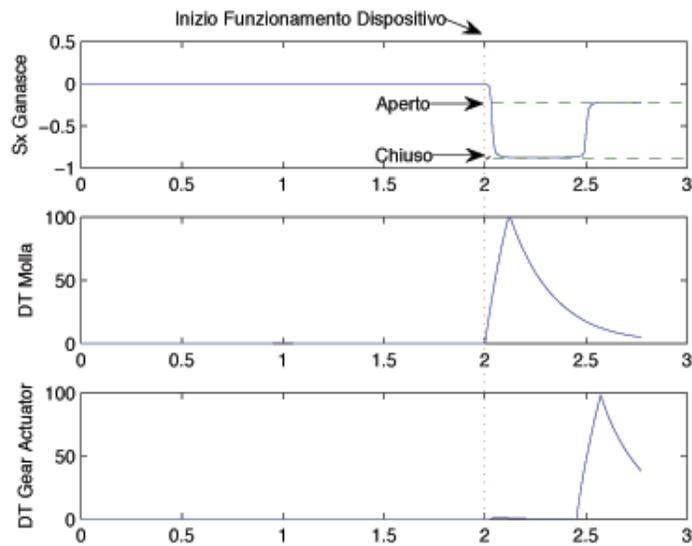


Figura 6.23: Dall'alto verso il basso: (1) Spostamenti della ganascia durante un ciclo di chiusura/apertura del dispositivo (2) Variazione della temperatura nell'attuatore lineare (3) Variazione della temperatura nell'attuatore rotazionale

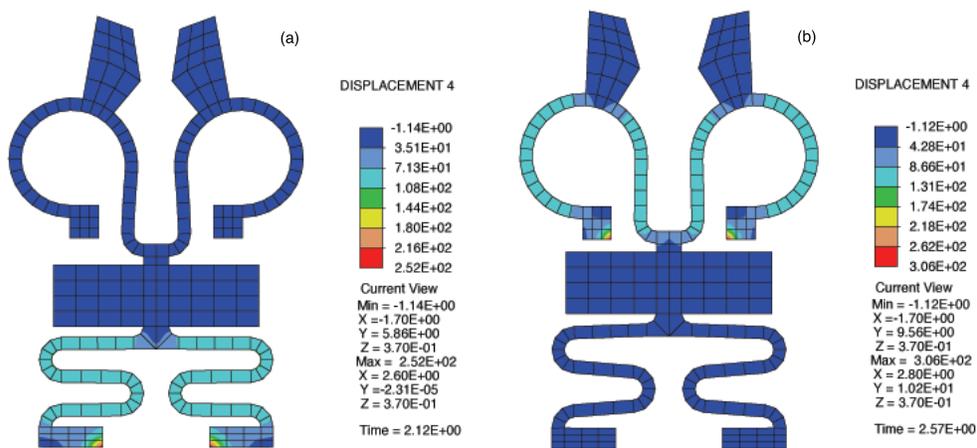


Figura 6.24: Contour plot della variazione di temperatura rispetto alla temperatura ambiente: (a) Dispositivo chiuso (b) Dispositivo aperto

rante il funzionamento del dispositivo. Per far questo ci si è concentrati sugli spostamenti del punto di interfaccia fra i due attuatori, ovvero del punto presentato in Fig.6.25. Si noti che il sistema di riferimento utilizzato per va-

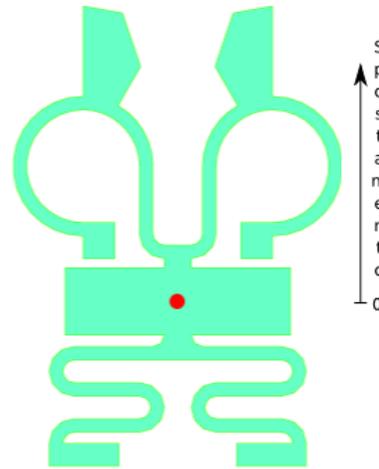


Figura 6.25: Punto di interfaccia fra i due attuatori e sistema di riferimento usato per valutare lo spostamento di tale punto

lutare questo spostamento coincide con quello utilizzato per gli spostamenti nella rappresentazione complessiva prima introdotta. Rappresentiamo ora gli spostamenti di tale punto durante i vari istanti temporali della simulazione e confrontiamoli con gli spostamenti che si hanno in corrispondenza dei punti di equilibrio in chiusura e in apertura che abbiamo prima individuato (Fig.6.26). Come si può notare vi è quasi una perfetta corrispondenza fra il comportamento ottenuto in simulazione e quello previsto durante la progettazione. Va sottolineato che la piccola differenza fra i due comportamenti può essere in parte dovuta ad errori di misura dell'effettivo spostamento individuato in corrispondenza dei punti di equilibrio.

Può essere interessante andare ad indagare il comportamento del dispositivo nel caso di più cicli di chiusura apertura. Tale comportamento si ottiene andando a considerare attivazioni alternate e ripetute dei connettori inferiori e superiori. I risultati di questo tipo di simulazione sono presentati in Fig.6.27

Appare evidente che il dispositivo è in grado di funzionare in maniera ciclica senza la presenza di alcun comportamento anomalo. Sarebbe opportuno andare a valutare il comportamento a fatica del materiale mediante opportuni esperimenti per valutare realmente a quanti cicli di apertura chiusura il dispositivo possa essere sottoposto prima di andare incontro a rottura.

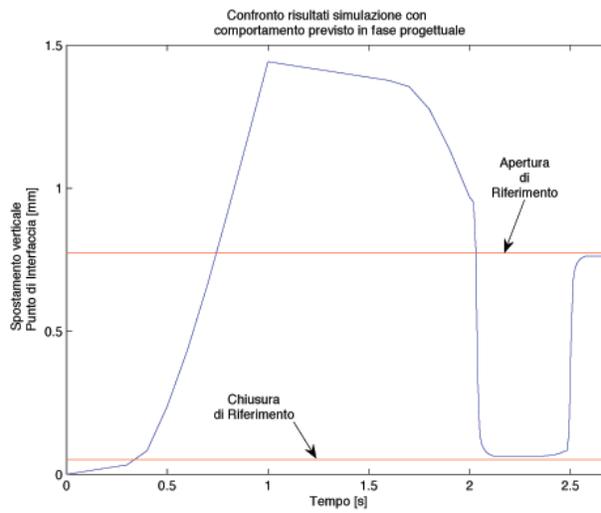


Figura 6.26: Confronto fra gli spostamenti del punto di interfaccia ottenuti durante la simulazione e quelli previsti durante la fase progettuale

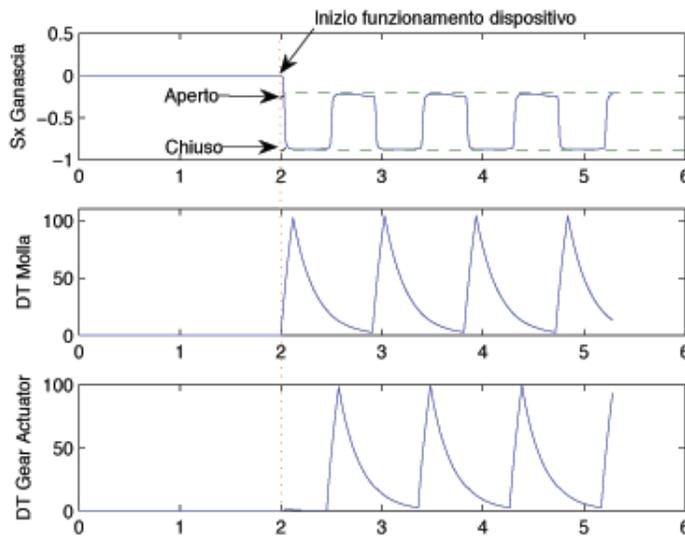


Figura 6.27: Dall'alto verso il basso: (1) Spostamenti della ganascia (2) Variazione della temperatura nell'attuatore lineare (3) Variazione della temperatura nel gear actuator

6.3 Manipolatore non monolitico: attuatore a memoria di forma saldato con componente superelastica

Dopo avere verificato l'effettivo e corretto funzionamento del dispositivo proposto in letteratura e dopo aver definito una procedura efficace per la progettazione di un dispositivo funzionante, si è pensato di dedicarsi alla progettazione di una variante di tale dispositivo. La geometria del manipolatore rimane sostanzialmente invariata, anche se viene eliminato il dissipatore centrale in quanto non più necessario: il nuovo dispositivo infatti non sarà più costituito da due attuatori che sfruttano l'effetto a memoria di forma bensì da un unico attuatore a memoria di forma (l'attuatore lineare) e da un componente superelastico (corrispondente all'attuatore rotazionale del dispositivo precedentemente esaminato). Un manipolatore siffatto avrebbe come principale vantaggio quello di non dover necessitare del riscaldamento della parte superiore, evitando quindi il riscaldamento della parte afferrata (aspetto molto importante in vista di una applicazione intracorporea). Venendo a mancare il riscaldamento della parte superiore si crea però il problema di dover far aprire e chiudere il dispositivo agendo sulla sola molla inferiore: l'utilizzo di una corrente elettrica per il riscaldamento sarebbe ancora possibile in linea teorica, ma l'apertura del dispositivo sarebbe vincolata dalla velocità con cui l'attuatore inferiore si raffredda. Si è pensato quindi di utilizzare un metodo di attivazione alternativo che consente sia di riscaldare che di raffreddare l'attuatore inferiore utilizzando sempre come alimentazione una differenza di potenziale. Tale metodo prevede l'impiego di una cella di Peltier, ossia di un dispositivo dotato di due facce che è in grado di trasferire calore da una faccia all'altra semplicemente in seguito all'applicazione di un potenziale; invertendo il segno del potenziale applicato si inverte anche il verso del trasferimento di calore. Appare evidente che con un tale dispositivo si può raggiungere il duplice scopo di riscaldare e raffreddare l'attuatore inferiore, con notevoli vantaggi in termini di frequenza operativa massima ottenibile in quanto il raffreddamento dell'attuatore inferiore riesce a realizzarsi in un tempo inferiore. Nel corso del nostro studio si è fatta l'ipotesi che il tempo necessario per il raggiungimento della temperatura nella cella di Peltier sia pressochè trascurabile, sarebbe opportuno andare a valutare quanto questa ipotesi sia consistente con la realtà e, in caso contrario, ripetere lo studio applicando opportune correzioni. Si noti che, dal momento che le due componenti non hanno le stesse proprietà, esse dovranno essere ricavate da due lamine di lega Ni-Ti differenti: una infatti dovrà essere stata trattata in modo da consentire un comportamento superelastico mentre l'altra dovrà aver su-

bito trattamenti termo-meccanici che consentano il manifestarsi dell'effetto a memoria di forma ad una via. Non sarà dunque possibile una realizzazione monolitica del manipolatore: le due componenti dovranno invece essere opportunamente saldate fra di loro, operazione che allo stato attuale della tecnica non comporta problematiche eccessive.

6.3.1 Progetto del dispositivo

Per progettare il dispositivo si è seguita la stessa procedura utilizzata nel caso precedente. Poichè in questo caso l'attuatore superiore si trova sempre in fase austenitica si è utilizzato per tale componente un modulo di elasticità tipico per questa fase. Per quanto riguarda invece l'attuatore inferiore si è utilizzato un valore medio fra modulo di elasticità della martensite e modulo di elasticità dell'austenite (si ricordi che il nostro modello non fa distinzione fra i due diversi moduli di elasticità).

Per quanto riguarda questo dispositivo si sono utilizzati i parametri riportati in Tab.6.3.1. Laddove ci siano delle differenze fra i valori dei parametri fra i due dispositivi, si sono indicati entrambe i valori distinguendo a quale componente ci si riferisce.

Si noti che, per la realizzazione di questa variante del dispositivo, è necessario impiegare un materiale caratterizzato da un coefficiente di hardening più basso rispetto alla variante monolitica. Un valore di tale coefficiente troppo elevato infatti non consentirebbe di ottenere dei punti di equilibrio in apertura e chiusura caratterizzati da forze sufficientemente diverse, ciò comporterebbe o una chiusura incompleta del dispositivo o una non sufficiente riapertura.

In analogia a quanto fatto in precedenza si è proceduto con il ricavare le caratteristiche nel piano forza-spostamento relative alle due componenti, ottenendo i risultati riportati in Figg.6.28-6.30

In questo caso è soltanto l'attuatore inferiore a necessitare di due caratteristiche distinte relative alla fase martensitica e a quella austenitica. Per quanto riguarda la componente superiore si utilizza invece la sola caratteristica austenitica in quanto la temperatura di transizione per il materiale che la costituisce è inferiore alla temperatura a cui opera il dispositivo e, pertanto, la componente si trova sempre in fase austenitica. A questo punto si può procedere con la rappresentazione su un unico piano forza spostamento delle caratteristiche ottenute. Anche in questo caso è necessario invertire il segno degli spostamenti nella caratteristica della componente superiore per ottenere una rappresentazione omogenea degli spostamenti. Tale caratteristica dovrà inoltre essere opportunamente traslata in virtù della predeformazio-

| | |
|---|-----------------------|
| Modulo Elastico Attuatore Lineare | 35000 N/mm^2 |
| Modulo Elastico Attuatore Rotazionale | 50000 N/mm^2 |
| Deformazione limite | 0.04 |
| Hardening | 10 N/mm^2 |
| Dipendenza dello stress critico dalla temperatura β | 2.1 N/mm^2K° |
| Raggio superficie di snervamento | 20 N/mm^2 |
| Calore specifico | 5.44 J/gK° |
| Conduttività elettrica martensite | 1.42857 $1/\omega mm$ |
| Conduttività elettrica austenite | 1.0 $1/\omega mm$ |
| Temperatura di partenza del corpo | 293 K° |
| Temperatura inizio trasformazione componente SE | 200 K° |
| Temperatura inizio trasformazione componente SME | 313 K° |
| Coefficiente di scambio convettivo | 5 W/mmK° |

Tabella 6.2: Valori dei parametri del materiale impiegato per la simulazione del dispositivo con componente pseudoelastica

6.3. MANIPOLATORE NON MONOLITICO: ATTUATORE A MEMORIA DI FORMA SALDATO CO

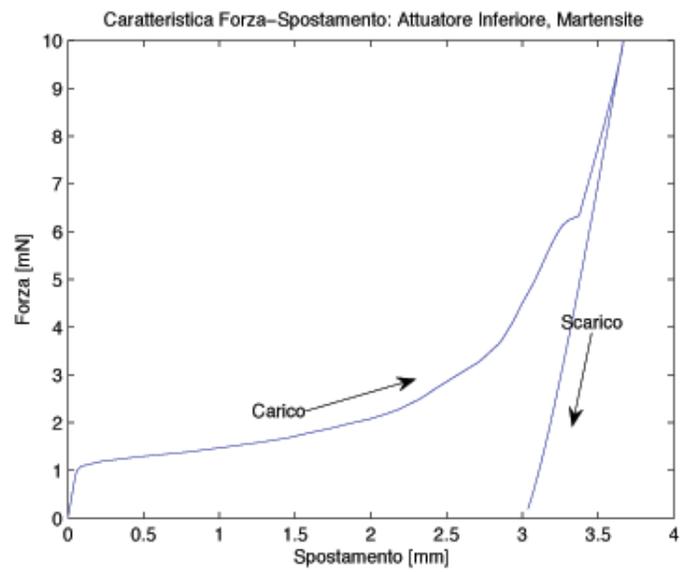


Figura 6.28: Curva di carico/scarico dell'attuatore lineare in fase martensitica

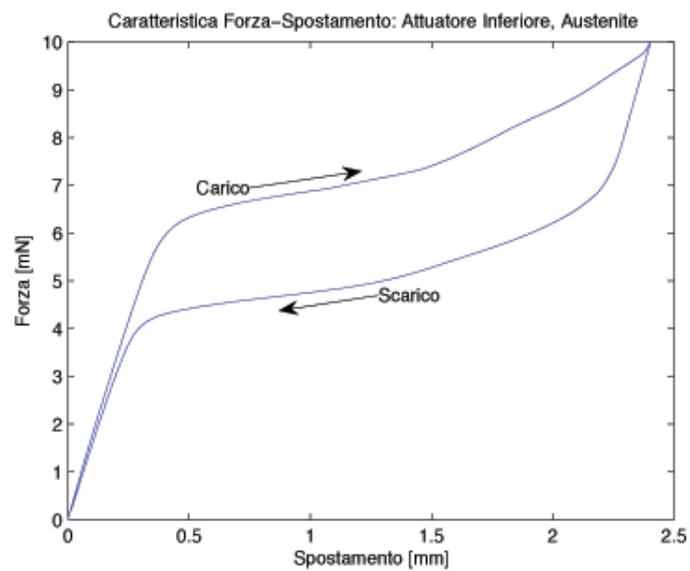


Figura 6.29: Curva di carico/scarico dell'attuatore lineare in fase austenitica

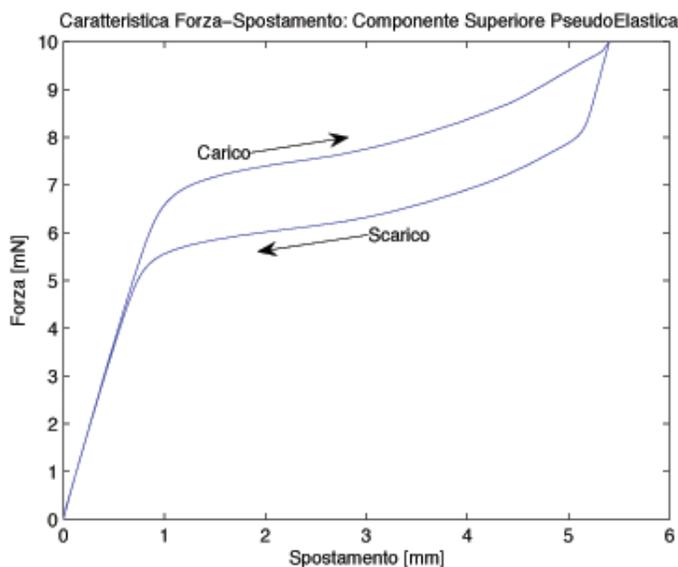


Figura 6.30: Curva di carico/scarico del componente superiore pseudoelastico

ne imposta all'attuatore inferiore. Una volta effettuate queste operazioni si ottiene il grafico riportato in Fig.6.31.

Come si evince dal grafico, in analogia alla trattazione precedente, si sono utilizzati soltanto il ramo di carico per la caratteristica dell'attuatore in fase martensitica e quello di scarico per la caratteristica in fase austenitica. Per quanto riguarda la componente superiore viene rappresentata la caratteristica completa. Come si può notare, si individuano 4 punti di intersezione: come nel caso precedente però soltanto 2 di essi sono degni di nota. Si tratta del punto di intersezione fra la caratteristica dell'attuatore lineare in fase austenitica e il ramo di carico della componente superiore (che individuano il punto di equilibrio in chiusura) e dell'intersezione fra la caratteristica dell'attuatore in fase martensitica e il ramo di scarico della componente superiore. Anche per questo dispositivo è necessario andare ad operare la scelta relativa alla predeformazione che si vuole imporre. Analogamente a quanto fatto in precedenza si ricava la rappresentazione grafica del dispositivo complessivo relativamente a due valori di predeformazione (Fig.6.32).

Una volta individuati i punti di equilibrio in chiusura e apertura, è possibile andare a valutare qual è il grado di chiusura e apertura delle ganasce corrispondente ai due valori di predeformazione considerati. In base a quanto mostrato in Fig.6.32, in corrispondenza della deformazione di cui al caso I abbiamo una forza in chiusura pari a $5.2mN$ mentre in apertura la forza

6.3. MANIPOLATORE NON MONOLITICO: ATTUATORE A MEMORIA DI FORMA SALDATO CO

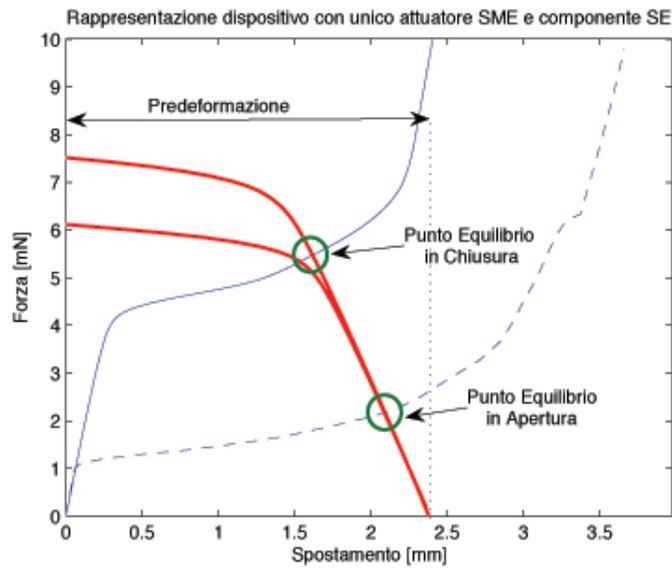


Figura 6.31: Rappresentazione complessiva del dispositivo costituito da un attuatore lineare SMA e da una componente pseudo-elastica sempre in SMA

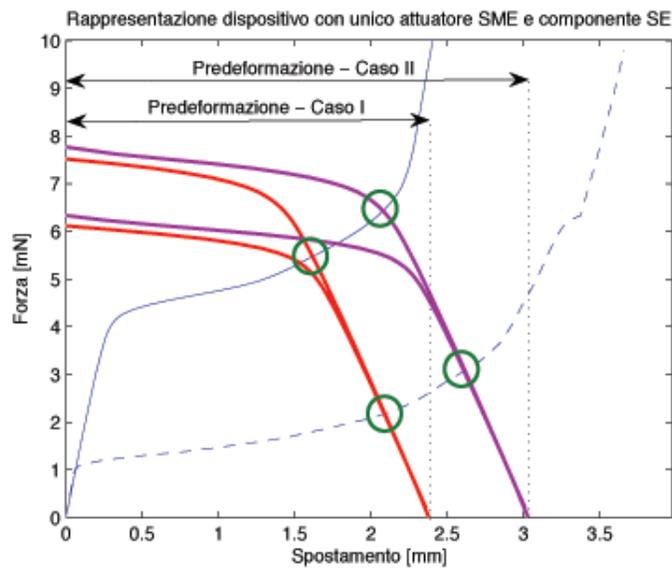


Figura 6.32: Punti di equilibrio in corrispondenza di diverse predeformazioni

esercitata sulla componente superiore sarà pari a $1.9mN$. Per quanto riguarda la predeformazione nel caso II avremo invece una forza pari a $6.3mN$ e a $2.7mN$, rispettivamente durante la chiusura e l'apertura del dispositivo. L'entità della chiusura delle ganasce in corrispondenza di tali valori di forza sono rappresentate in Fig.6.33.

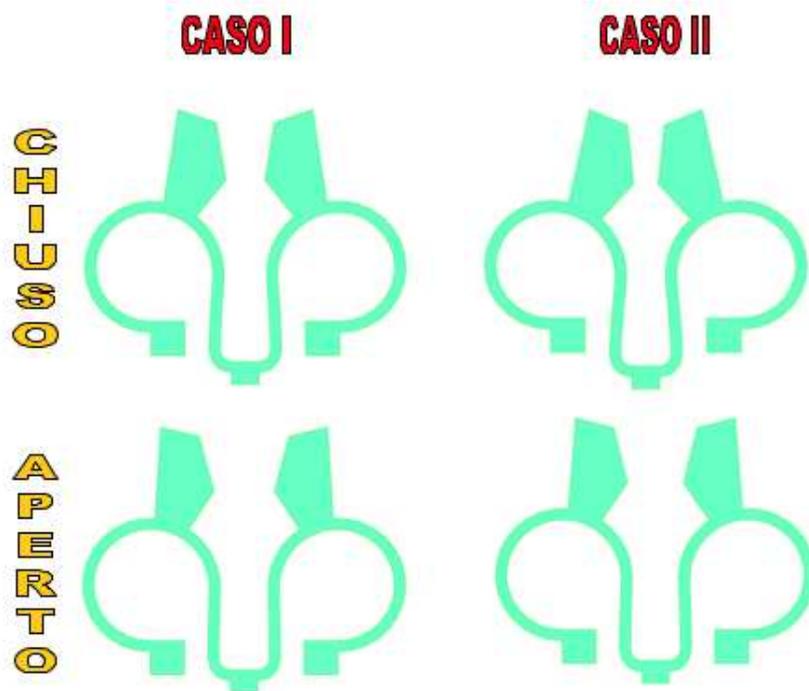


Figura 6.33: Valutazione del grado di chiusura in corrispondenza dei punti di equilibrio considerati

Come si evince dalla figura, in corrispondenza della predeformazione presentata al caso II si ha una chiusura maggiore del dispositivo, mentre in apertura le ganasce risultano sufficientemente aperte e non si rilevano apprezzabili differenze rispetto all'apertura che si realizza con una predeformazione inferiore. Appare dunque evidente che la seconda predeformazione è preferibile a quella presentata nel caso I. Bisognerebbe tuttavia verificare la resistenza del dispositivo a seguito dell'applicazione di questa predeformazione, verifica che si può attuare soltanto in presenza del dispositivo fisico.

Una volta scelta la predeformazione da impiegare, si è proceduto con la simulazione del dispositivo, ponendo l'attenzione sul movimento orizzontale delle ganasce e agli andamenti di temperatura del solo attuatore lineare. Non

siamo infatti interessati, per questa variante del dispositivo, alla temperatura della componente superiore. Gli andamenti delle grandezze di interesse sono riportate in Fig.6.34

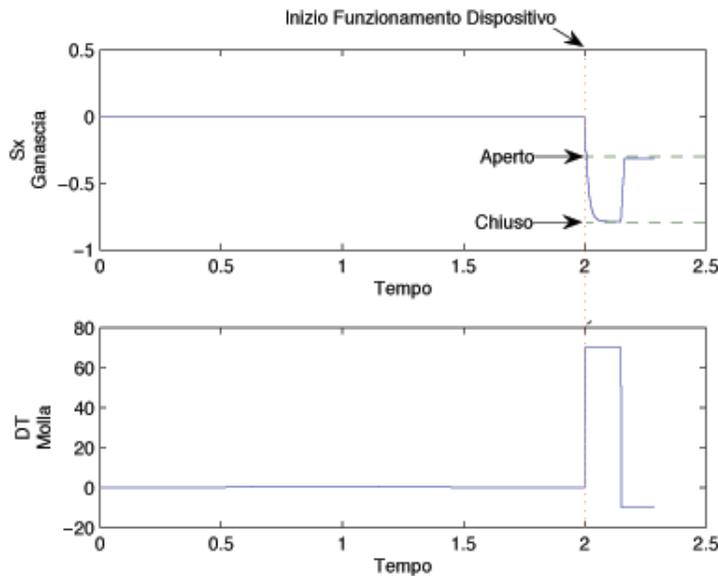


Figura 6.34:

Come si può vedere, anche in questo caso, agendo opportunamente sulla temperatura dell'attuatore lineare si riesce a determinare un movimento di apertura e chiusura delle ganasce della componente superiore.

Anche in questo caso andiamo a valutare quanto i punti di equilibrio, trovati durante la fase di progettazione, corrispondano agli effettivi punti di equilibrio che si ritrovano durante il funzionamento simulato del dispositivo. Ancora una volta ci si concentra sugli spostamenti del punto di interfaccia fra i due microattuatori misurati rispetto ad un sistema di riferimento che coincida con quello introdotto durante la creazione della rappresentazione complessiva. I risultati di questo confronto sono presentati in Fig.6.35.

Troviamo nuovamente che gli spostamenti previsti durante la fase progettuale sono in sostanziale accordo con quelli ritrovati durante la simulazione. Questa rappresenta un'ulteriore prova dell'efficacia della procedura di progettazione introdotta nel prevedere il comportamento del dispositivo.

Si noti che, rispetto al dispositivo monolitico, sono necessarie delle forze maggiori per poter chiudere le ganasce. Ciò costringe a dover utilizzare delle predeformazioni maggiori da imporre nell'attuatore lineare. Questo comporterà una maggiore forza di presa fra le ganasce, il che può rappresentare un

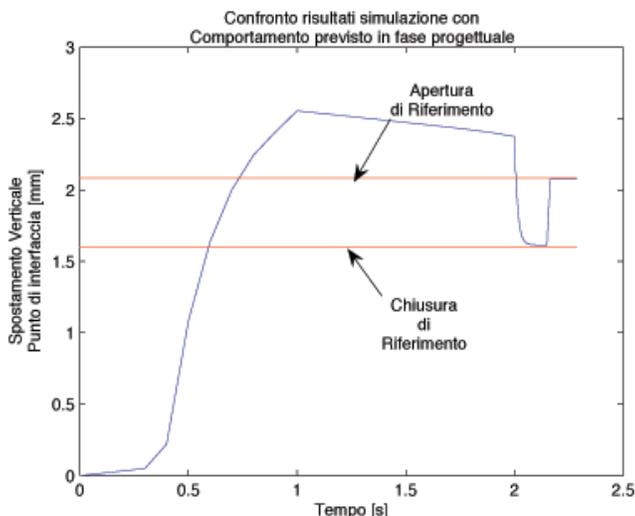


Figura 6.35: Confronto fra gli spostamenti del punto di interfaccia ottenuti durante la simulazione e quelli previsti durante la fase progettuale

vantaggio o uno svantaggio a seconda dei casi. Va comunque sottolineato che agendo su un parametro di progettazione, quale lo spessore del dispositivo, si potrà far variare la forza di presa in maniera opportuna. Senza dubbio il vantaggio principale di questa variante di dispositivo è costituita dalla completa assenza di riscaldamento della componente superiore: ciò consente di poter afferrare qualsiasi tipologia di oggetto, senza preoccuparsi di eventuali riscaldamenti indesiderati. Ciò appare senza dubbio un vantaggio in vista di applicazioni dirette nel campo medico, per le quali l'assenza di interazioni termiche con il campione afferrato rappresenta una caratteristica essenziale.

6.4 Manipolatore non monolitico con due posizioni di chiusura

L'impiego di un dispositivo di Peltier per controllare la temperatura dell'attuatore lineare ci consente di ampliare la funzionalità del nostro dispositivo. Infatti la temperatura della componente inferiore può essere facilmente regolata andando a variare la tensione con cui il dispositivo di Peltier viene alimentato (tale obiettivo era decisamente più difficile da raggiungere andando a riscaldare il dispositivo mediante il passaggio di una corrente). Ci si pone dunque l'obiettivo di realizzare una ulteriore variante di dispositivo, che consenta di avere due posizioni di chiusura stabili. Per raggiungere questo

obiettivo, è opportuno andare a valutare come varia la caratteristica forza-spostamento dell'attuatore lineare: si è dunque studiato il comportamento di tale componente per scostamenti di temperatura pari a 70, 55 e 40 °K. Le caratteristiche ottenute sono presentate in Fig.6.36-6.38

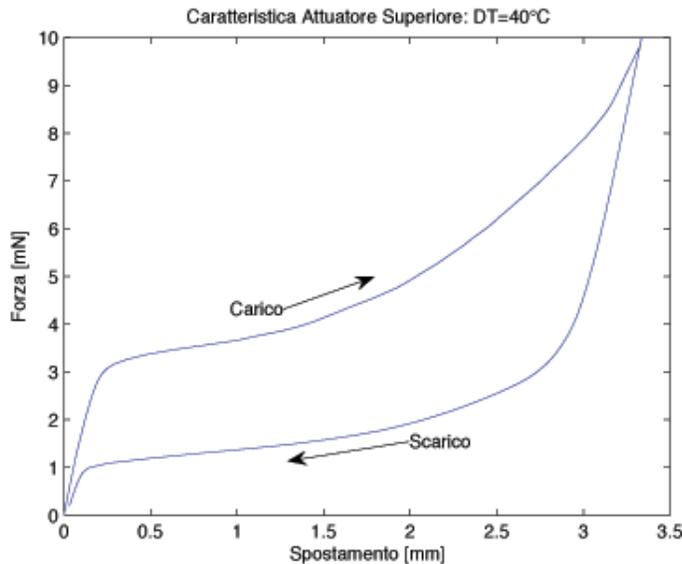


Figura 6.36: Caratteristica Forza-Spostamento dell'attuatore lineare sottoposto ad una variazione di temperatura di 40 °C

La caratteristica di tale componente in fase martensitica è la stessa presentata in Fig.6.28 così come rimane invariata la caratteristica della componente superiore proposta in Fig.6.30. Per raggiungere il nostro scopo di realizzare due posizioni di chiusura è sufficiente considerare 2 temperature operative fra le 3 considerate. I due incrementi di temperatura più idonei appaiono essere quelli corrispondenti a 70°K e 55°K, in quanto la caratteristica relativa a 40°K presenta il suo ramo di scarico al di sotto del ramo di carico dell'attuatore in fase martensitica. Una volta effettuata questa scelta, possiamo procedere col rappresentare su un unico piano le caratteristiche di interesse: le due caratteristiche relative all'attuatore lineare alle due temperature selezionate, la caratteristica sempre di tale attuatore in fase martensitica e, infine, la caratteristica della componente superiore opportunamente ribaltata e traslata per tener conto della predeformazione. La rappresentazione complessiva è fornita in Fig.6.39

Come si può notare, vengono individuati tre punti di equilibrio: due in chiusura ed uno in apertura. Con un dispositivo così fatto, andando op-

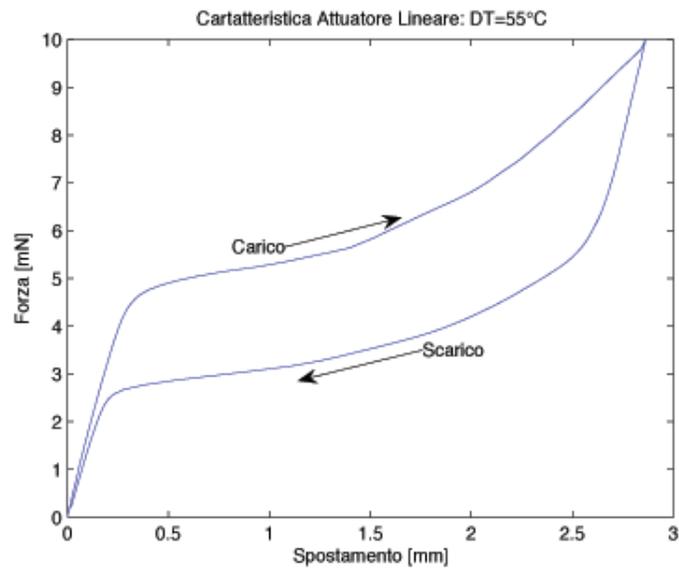


Figura 6.37: Caratteristica Forza-Spostamento dell'attuatore lineare sottoposto ad una variazione di temperatura di 55 °C

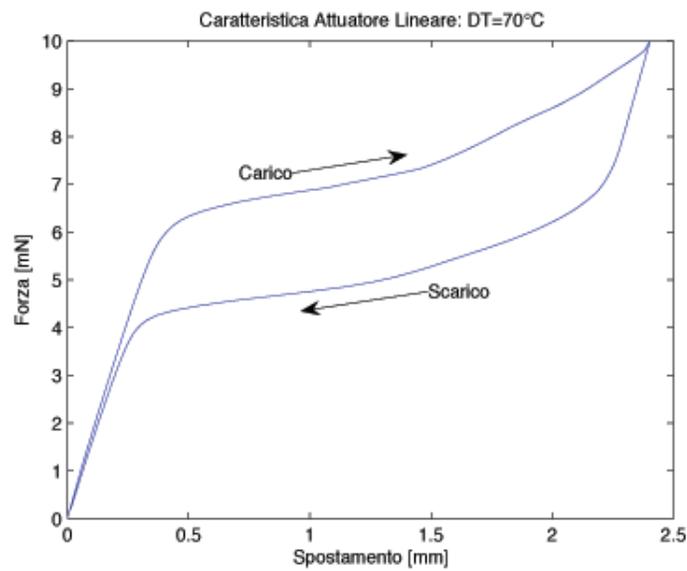


Figura 6.38: Caratteristica Forza-Spostamento dell'attuatore lineare sottoposto ad una variazione di temperatura di 70 °C

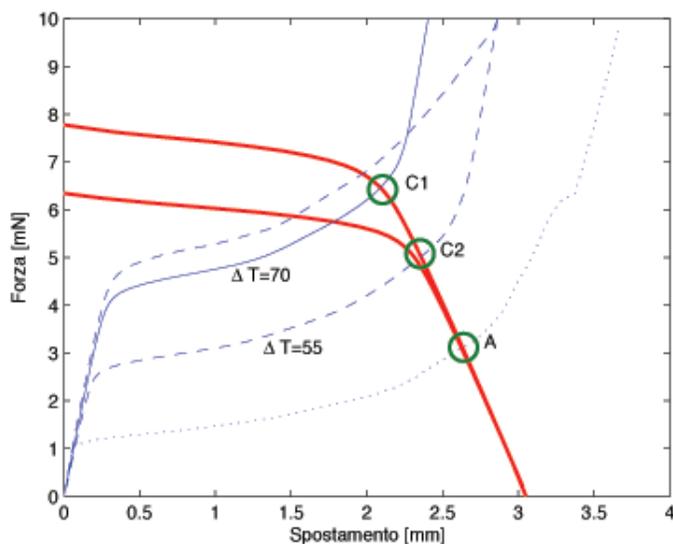


Figura 6.39: Rappresentazione complessiva del dispositivo con due gradi di chiusura

portunamente a selezionare la temperatura del modulo di Peltier (agendo opportunamente sulla tensione di alimentazione di quest'ultimo), è possibile determinare il grado di chiusura del dispositivo consentendo in questo modo di afferrare oggetti di dimensioni differenti. Si deve sottolineare il fatto che il dispositivo può facilmente passare dal punto in equilibrio denominato A (punto di equilibrio in apertura) ad uno qualsiasi dei punti in equilibrio in chiusura (C1 e C2). È possibile inoltre passare direttamente dal punto C2 al punto C1. Per quanto riguarda il movimento di riapertura del dispositivo, sarà possibile passare da qualsiasi punto di equilibrio in chiusura al punto di equilibrio in apertura. Non sarà invece possibile passare dalla chiusura relativa al punto C1 a quella relativa al punto C2; infatti, in questo caso, il punto di equilibrio C1 rientra già nell'isteresi della caratteristica dell'attuatore lineare con un riscaldamento pari a $55^{\circ}K$. Per questo motivo, quando si passa da un riscaldamento a $70^{\circ}K$ ad uno pari a $55^{\circ}K$ non si ha nessuna variazione del punto di equilibrio del manipolatore, che rimane pertanto nel suo stato di chiusura massima. Durante il funzionamento del dispositivo non è quindi prevista la possibilità di passare dal massimo grado di chiusura a quello di chiusura intermedia; d'altronde appare evidente quanto sia poco probabile la necessità di dover realizzare un comportamento di questo tipo.

Per verificare che il dispositivo funzioni con queste nuove modalità di

attivazione, è stata condotta una simulazione con il metodo degli elementi finiti che prevede un primo riscaldamento di $55^{\circ}K$ e, quindi, un successivo aumento di temperatura di altri $15^{\circ}K$. A questo punto la temperatura viene nuovamente riportata ad un riscaldamento di $55^{\circ}K$ per poi finalmente tornare alla temperatura ambiente. In base a quanto detto, dovremmo assistere in una prima fase ad una chiusura intermedia delle ganasce, seguita dalla loro chiusura completa. Successivamente le ganasce dovrebbero aprirsi soltanto quando la temperatura viene riportata alla temperatura ambiente (e quindi l'attuatore si trova in fase martensitica), in quanto il raffreddamento di $15^{\circ}K$ non comporta alcun cambiamento. Il risultato della simulazione condotta è riportato in Fig.6.40

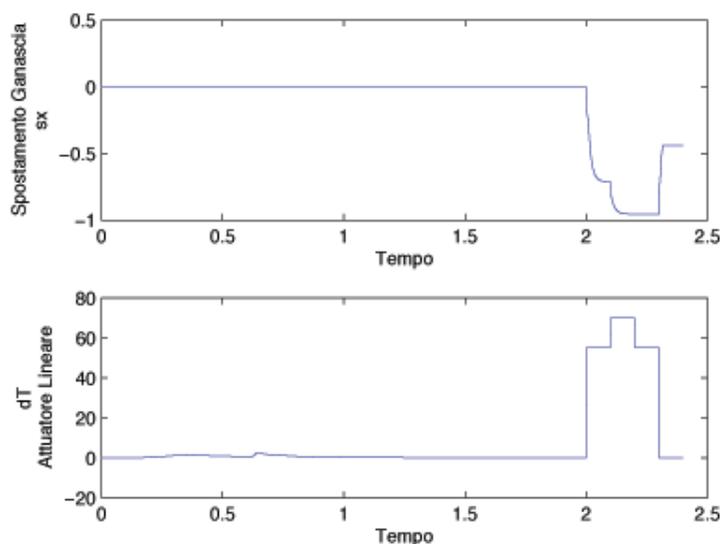


Figura 6.40: Risultato relativo alla simulazione del dispositivo con due gradi di chiusura; come si può notare il risultato della simulazione conferma le considerazioni fatte in fase progettuale

Come si può facilmente osservare il risultato della simulazione è in completo accordo con quanto detto. Questo particolare comportamento non ci deve sorprendere: molteplici infatti sono i casi in cui le SMA presentano caratteristiche peculiari che spesso consentono di raggiungere comportamenti inottemibili con altri materiali, ma che delle volte costringono ad una particolare accortezza nella fase di progettazione.

Andiamo a verificare ora che i punti di equilibrio individuati durante la fase di progettazione vengano effettivamente raggiunti durante il funziona-

mento del dispositivo. Consideriamo nuovamente gli spostamenti del punto di interfaccia rispetto allo stesso sistema di riferimento utilizzato per gli spostamenti nella rappresentazione complessiva prima introdotta. I risultati di questa verifica sono presentati in Fig.6.41.

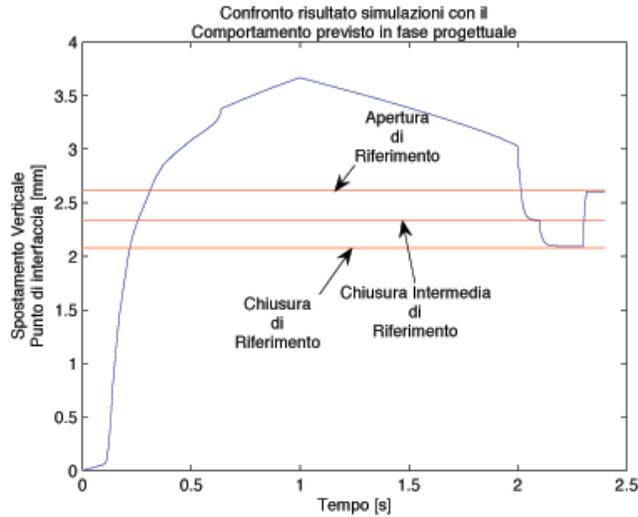


Figura 6.41: Confronto fra gli spostamenti del punto di interfaccia ottenuti durante la simulazione e quelli previsti durante la fase progettuale

Anche in questo caso si ritrova conferma che i punti di equilibrio che vengono previsti in fase progettuale coincidono in buona sostanza con quelli effettivamente raggiunti durante il funzionamento del dispositivo. A questo punto di può asserire che la procedura di progettazione introdotta si presenta valida e corretta ed è in grado di predire i punti di equilibrio in chiusura ed apertura che caratterizzano il funzionamento di un micromanipolatore basato su un meccanismo antagonista.

Capitolo 7

Conclusioni e sviluppi futuri

Il campo dei microdispositivi risulta essere estremamente promettente; gli aspetti di maggiore interesse riguardano essenzialmente la tecnologia che deve essere impiegata per la realizzazione di tali dispositivi nonché le metodologie da utilizzare per la progettazione. Un approccio che può essere seguito consiste nel partire da realizzazioni macroscopiche di un dispositivo e nel trasportarle in una scala più piccola; tale pratica però si rivela in molti casi inefficace, in quanto può portare alla creazione di dispositivi incapaci di generare forze di una qualche utilità. In quest'ottica, appare dunque più indicato sviluppare delle metodologie *ad hoc* che prevedano l'impiego di materiali che manifestino prestazioni ottimali proprio su scala millimetrica. Le leghe a memoria di forma presentano caratteristiche ideali per un utilizzo nel campo dei microattuatori, non sorprende quindi che esse rappresentino uno dei materiali elettivi per la loro realizzazione. Nel corso di questo lavoro, ci si è concentrati su uno dei tanti microdispositivi attualmente oggetto di studio: si tratta in sostanza di una pinza in grado di afferrare e manipolare oggetti di piccole dimensioni. I campi di applicazione di un dispositivo siffatto sono molteplici: essenzialmente qualsiasi applicazione che abbia a che fare con piccole componenti o campioni è naturalmente candidata all'impiego di una micromanipolatore come quella considerata. Il dispositivo studiato viene già comunemente impiegato nelle comunicazioni e nel campo della optoelettronica per la manipolazione di fibre ottiche di diametro millimetrico; non si fatica però ad immaginare un possibile utilizzo in campo medico, nella fattispecie per il montaggio di strumenti chirurgici endoscopici o, addirittura, direttamente come strumento chirurgico; ovviamente bisognerà debitamente tenere conto delle particolari esigenze che una tale applicazione comporta.

Nonostante vi siano molti esempi di micromanipolatori riportati in letteratura, si fa fatica a trovare indicazioni circa la metodologia di progettazione seguita e quali siano i parametri da tenere in considerazione. Nel corso del

nostro studio abbiamo sviluppato un metodo che si è dimostrato efficace per la realizzazione di un dispositivo funzionante; con opportune modifiche, dettate dal caso specifico che viene considerato, tale metodo può essere opportunamente esteso alla realizzazione di qualsiasi dispositivo basato su un meccanismo antagonista.

Una volta definita la metodologia è stato possibile applicarla per la realizzazione di una micromanipolatore realizzata in SMA. Ci si è in primo luogo focalizzati su una realizzazione monolitica che prevedesse l'impiego di due attuatori antagonisti, entrambe manifestanti effetto a memoria di forma ad una via. Questa realizzazione si è dimostrata perfettamente funzionante e le caratteristiche previste in fase progettuale hanno trovato riscontro nel corso delle simulazioni, realizzate con il codice agli elementi finiti FEAP. Dal momento che questo dispositivo prevedeva l'attivazione dell'effetto a memoria di forma per riscaldamento dovuto all'effetto Joule, è stato necessario condurre una simulazione che tenesse in conto tre problemi fra loro accoppiati: un problema meccanico, un problema termico (imprescindibile quando si ha a che fare con le SMA) e un problema elettrico. La procedura seguita per la soluzione di questi tre problemi si è basata su un metodo iterativo noto con il nome di *staggered analysis* e che sostanzialmente prevede di risolvere ciascun problema tenendo "fermi" gli altri e di ripetere questa procedura un certo numero di volte andando a sostituire di volta in volta i risultati trovati.

Dopo aver testato la validità della metodologia di progettazione introdotta, è stato possibile andare a realizzare una variante del dispositivo proposto: la realizzazione monolitica appare vantaggiosa dal punto di vista realizzativo ma, tuttavia, presenta lo svantaggio di comportare il riscaldamento anche della parte del dispositivo che andrà ad afferrare l'oggetto. Questo fatto costituisce un limite nel caso in cui il materiale che deve essere afferrato sia particolarmente suscettibile alle variazioni di temperatura (si consideri ad esempio il caso in cui debbano essere afferrati dei tessuti biologici). Si è dunque ipotizzata la realizzazione di un micromanipolatore che consentisse di evitare tale riscaldamento. Questo obiettivo è stato realizzato sostituendo ad uno degli attuatori a memoria di forma una componente, di eguale geometria, che sfruttasse l'altra caratteristica tipica delle SMA, la pseudoelasticità. Dal momento che le SMA subiscono un opportuno trattamento termo-meccanico che consente loro di manifestare alternativamente o l'effetto a memoria di forma o la pseudoelasticità, non sarà possibile una realizzazione monolitica del dispositivo: si dovrà pertanto ricavare le due componenti principali che costituiscono il dispositivo da due lastre che hanno subito trattamenti diversi. Tali componenti dovranno successivamente essere assemblate mediante una opportuna tecnologia: la saldatura laser appare essere la soluzione più facilmente praticabile in quanto oggi si riescono a realizzare saldature

di buona qualità, che influiscono minimamente sulle proprietà delle leghe a memoria di forma. Sebbene questo dispositivo possa, in linea teorica, funzionare sfruttando il riscaldamento conseguente all'effetto Joule, si è preferito utilizzare una forma di riscaldamento differente che consenta di evitare che la riapertura del dispositivo sia vincolata al raffreddamento per convezione naturale del dispositivo. Si è pertanto utilizzata una tecnologia già ampiamente diffusa nel campo informatico, anche se utilizzata con l'unica funzionalità di raffreddamento: i moduli di Peltier. Tali componenti termoelettriche possono essere impiegate tanto per riscaldare quanto per raffreddare (l'effetto raggiunto dipende dal verso della corrente che scorre all'interno di essi) e possono essere realizzate con dimensioni e prestazioni che si adattano perfettamente ai nostri scopi. Oltre a rappresentare un valido metodo per l'attivazione dell'effetto a memoria di forma, i moduli di Peltier consentono di regolare con buona accuratezza la temperatura della parte di dispositivo con cui sono poste in contatto. Ciò apre le porte alla creazione di un micro-manipolatore che presenti delle funzionalità maggiori. Si è infatti progettata una versione del dispositivo che consenta di raggiungere due diversi gradi di chiusura, consentendo la manipolazione di oggetti di dimensioni differenti. La progettazione di un tale dispositivo ha consentito, ancora una volta, di andare a provare l'efficacia della metodologia di progettazione introdotta. L'applicazione di tale metodologia ha messo in evidenza un comportamento particolare del dispositivo nella fase di riapertura: non risulta possibile infatti, una volta raggiunto il grado di chiusura massimo, portarsi al grado di chiusura intermedio. Questa considerazione ha avuto conferma nelle simulazioni numeriche condotte, ma non inficia tuttavia l'applicabilità del dispositivo. Appare poco probabile infatti la necessità di riaprire parzialmente le ganasce delle pinza una volta che sono state portate al loro massimo grado di chiusura; ben più interessante invece è la possibilità di poter chiudere ulteriormente il dispositivo nell'eventualità, ad esempio, che il primo grado di chiusura non sia sufficiente.

Appare opportuno, a questo punto, delineare quali saranno gli obiettivi futuri che si intendono raggiungere. In primo luogo, sarà opportuno realizzare fisicamente il dispositivo in modo da provarne il funzionamento e da poter effettuare prove cicliche volte a determinare il numero di cicli a rottura e la massima frequenza di operabilità. Sarà altresì necessario andare a verificare, nel caso del dispositivo non monolitico, come la saldatura modifichi eventualmente le caratteristiche del dispositivo e, conseguentemente, come tenere conto di tali modifiche in fase progettuale. Bisognerà inoltre andare a quantificare le forze sviluppate dal dispositivo in fase di chiusura sia con simulazioni numeriche che con esperimenti opportunamente predisposti. Sarebbe auspicabile inoltre acquistare dei moduli di Peltier commerciali per

poterne determinare le caratteristiche di funzionamento: nella fattispecie ci si dovrebbe focalizzare sullo studio dei tempi necessari al raggiungimento della temperatura di regime, in quanto da tale caratteristica dipendono le prestazioni del micromanipolatore. Dopo aver completato lo studio del dispositivo in ogni suo aspetto, ci si potrà concentrare sulla geometria dello stesso predisponendo della stessa per consentire una maggiore efficienza ed un più spinto grado di miniaturizzazione.

In conclusione, nel corso di questo lavoro si sono gettate le basi per uno studio completo di un microdispositivo basato sull'effetto a memoria di forma definendo gli strumenti necessari ad un approccio completo ed esaustivo del problema considerato. Come già accennato, il metodo proposto risulta facilmente esportabile a qualsiasi problema di progettazione di microdispositivi basati su meccanismi antagonisti, settore che verrà ad acquisire sempre più importanza nel corso dei prossimi anni.

Appendice A

Effetto Peltier

Effetti di riscaldamento e raffreddamento sono richiesti frequentemente in svariati campi, si pensi ad esempio al campo dei microprocessori in cui l'elevata frequenza operativa costringe a trovare soluzioni sempre più efficaci al problema del raffreddamento. Anche nel campo medico vi è richiesta di dispositivi termici in grado di raffreddare o riscaldare, all'occorrenza, colture cellulari o campioni di tessuto. Una possibile soluzione a questo tipo di problema è rappresentata dai dispositivi di Peltier. Il grande vantaggio di tali dispositivi consiste nel fatto di operare allo stato solido, ciò significa che non sono richieste parti in movimento e tantomeno liquidi o fluidi. Questo si traduce in una grande affidabilità e facilità di manipolazione. Sebbene questo tipo di dispositivo possa essere meno efficiente dal punto di vista energetico rispetto ad altre tecniche di raffreddamento, esso si presta straordinariamente bene a raffreddare e riscaldare piccoli volumi (come ad esempio il microgripper presentato in questo lavoro).

Entriamo ora nel dettaglio: l'*effetto Peltier* è un fenomeno termoelettrico per il quale il passaggio di una corrente fra due metalli o semiconduttori diversi, posti in contatto a formare una cosiddetta giunzione di Peltier, produce un trasferimento di calore. Si tratta sostanzialmente dell'effetto opposto rispetto all'effetto Seebeck, per il quale si ha passaggio di corrente fra due metalli o semiconduttori differenti in seguito alla presenza di una differenza di temperatura fra di essi.

Una coppia termoelettrica elementare (Fig.A.1) è costituita da due prismi (pellet) in materiale semiconduttore; tale materiale semiconduttore presenta drogaggio di tipo p in uno dei due prismi, mentre nell'altro il drogaggio sarà di tipo n. I due prismi vengono collegati fra loro ad una estremità mediante una piastrina metallica che ne costituisce la "giunzione fredda", all'altra estremità si trovano due altre piastrine metalliche, che costituiscono la "giunzione calda", fra cui è inserita l'alimentazione elettrica. Se il generatore

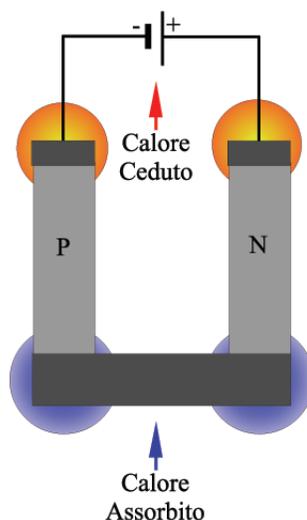


Figura A.1: Coppia termoelettrica elementare

provoca lo scorrimento di una corrente continua nella coppia termoelettrica, per effetto Peltier si avrà un trasferimento di calore dalla giunzione fredda alla giunzione calda. Infatti, nel passaggio dal materiale drogato p al materiale drogato n, gli elettroni assorbono energia per superare il gradino di potenziale che incontrano. Questa energia viene sottratta alla piastrina sotto forma di calore; come conseguenza si avrà un assorbimento di calore in corrispondenza della piastrina. Al lato della giunzione calda si verificherà la situazione opposta, dal momento che il gradino di potenziale viene ad avere segno opposto. In base alle considerazioni fatte, è evidente che, invertendo il segno della corrente che scorre all'interno della giunzione, quella che era la giunzione fredda diviene ora la giunzione calda e viceversa. Infatti, nel passaggio dal semiconduttore drogato n a quello drogato p si avrà cessione di energia sotto forma di calore in corrispondenza della piastrina inferiore, mentre, viceversa, nel passaggio da semiconduttore drogato p a semiconduttore drogato n, si avrà un assorbimento di energia e, quindi, si determinerà il raffreddamento delle piastrine superiori. Le prestazioni di una coppia termoelettrica come quella appena descritta possono essere stimate andando a considerare tutti i fenomeni termici che hanno luogo in essa. Essi sono essenzialmente costituiti dai seguenti 3 effetti:

1. effetto Peltier

2. effetto Joule

3. effetto Fourier

Considerando la sola giunzione fredda, la potenza termica che viene sottratta ad essa per effetto Peltier è proporzionale alla corrente e può essere espressa come:

$$Q_p = 2aT_c I \quad (\text{A.1})$$

dove T_c rappresenta la temperatura assoluta della giunzione, mentre a è il coefficiente di Seebeck relativo alla coppia termoelettrica e la cui espressione è la seguente:

$$a = \frac{1}{2} (a_{pm} + a_{mn}) \quad (\text{A.2})$$

in cui a_{pm} e a_{mn} sono i valori dei coefficienti di Seebeck relativi alle coppie semiconduttore drogato p + metallo e metallo + semiconduttore drogato n. La dissipazione per effetto Joule nella coppia termoelettrica può essere stimata sulla base della resistenza elettrica totale del circuito costituita dai pellet, trascurando la resistenza delle piastrine metalliche in quanto piccola confrontata a quella dei prismi. Si considerano quindi le resistività relative al semiconduttore nei due differenti drogaggi, r_p e r_n ; dal momento che i due valori sono simili, è possibile assumerli, per semplicità, uguali al loro valor medio:

$$r = \frac{1}{2} (r_p + r_n) \quad (\text{A.3})$$

Sotto l'ipotesi, che è possibile verificare per via analitica, che metà del calore dissipato per effetto Joule affluisca alla giunzione calda e metà alla giunzione fredda, quest'ultima (che è quella che stiamo considerando) riceverà una potenza termica pari a:

$$Q_J = \frac{1}{2} \left(r \cdot 2 \frac{h}{A} \right) I^2 \quad (\text{A.4})$$

in cui A rappresenta la sezione trasversale dei prismi, mentre h ne costituisce l'altezza. Bisogna infine considerare la potenza termica che viene trasferita dalla piastrina calda a quella fredda per effetto Fourier, ossia per conduzione termica. A tale fine si può impiegare la seguente relazione:

$$Q_F = (k_p + k_n) \frac{A}{s} (T_h - T_c) = 2k \frac{A}{s} (T_h - T_c) \quad (\text{A.5})$$

Dove T_h e T_c sono le temperature assunte, rispettivamente, dalla giunzione calda e da quella fredda. K_p e k_n sono invece le conduttività termiche del semiconduttore nei suoi due differenti drogaggi. In analogia a quanto fatto in precedenza con le resistività, è possibile introdurre una conduttività media k , da utilizzarsi per entrambe i semiconduttori. Si noti il fatto che si è trascurato il trasferimento di calore che si realizza fra le piastrine attraverso l'aria, in quanto trascurabile in prima approssimazione. Solitamente, nel valutare le prestazioni di una cella termoelettrica, si considerano resistività r e conduttività termica k come costanti, anche se in realtà essi dipendono fortemente dalla temperatura. Sarebbe quindi opportuno andare a considerare, per la resistività e per la conduttività, dei valori medi integrali, tuttavia, per moderate differenze di temperatura fra giunzione calda e fredda, possono essere utilizzati i valori calcolati alla temperatura media. Per quanto riguarda invece i coefficienti di Seebeck, andrebbero in linea di principio utilizzati i valori relativi alla temperatura della giunzione fredda, tuttavia, l'impiego dei valori calcolati per la temperatura media consente di compensare l'effetto Thomson, che si manifesta in presenza di gradienti di temperatura. Tenendo conto di quanto detto, le relazioni di prestazione di una cella termoelettrica fanno spesso riferimento alla temperatura media $T_m = \frac{T_c + T_h}{2}$. La potenza termica che può essere estratta ad una giunzione fredda è data dalla somma dei diversi contributi prima presentati, ovvero:

$$Q_c = Q_P - Q_J - Q_F = 2 \left[aT_c I - \frac{1}{2} \frac{r}{G} I^2 - kG(T_h - T_c) \right] \quad (\text{A.6})$$

in cui si è introdotto il fattore di forma $G = A/s$. Appare dunque evidente che le prestazioni di un dispositivo termoelettrico dipendono sostanzialmente dalle proprietà dei semiconduttori utilizzati. Per massimizzare il calore che può essere estratto si vorrà avere un coefficiente di Seebeck il più elevato possibile, mentre la resistività elettrica e la conduttività termica si dovrebbero mantenere su valori bassi. Sfortunatamente, questi due coefficienti sono strettamente legate e sono fra loro inversamente proporzionali: nel caso dei metalli ad esempio si ha una bassa resistività ma una elevatissima conducibilità termica. Bisogna quindi cercare di realizzare un compromesso nello scegliere il materiale da impiegare per la cella termoelettrica. Si può dimostrare che le prestazioni di un sistema refrigerante, basato su celle termoelettriche, dipendono sostanzialmente dalla cosiddetta "figura di merito Z " relativa alla coppia di materiali utilizzata. Tale figura di merito è definita come:

$$Z = \frac{a^2}{rk} \quad (\text{A.7})$$

I valori massimi di Z si ritrovano per i materiali semiconduttori e, pertanto, tali materiali sono i più diffusi nei sistemi di riscaldamento/raffreddamento basati sull'effetto Peltier.

A.1 I dispositivi di Peltier

I dispositivi termoelettrici che troviamo in commercio, noti con il nome di “dispositivi di Peltier” o “celle di Peltier”, sono sostanzialmente costituiti da svariate coppie, come quella descritta in precedenza, collegate in serie attraverso delle piastrine in rame, saldate all'estremità dei prismi in semiconduttore, come mostrato in Fig.A.2.

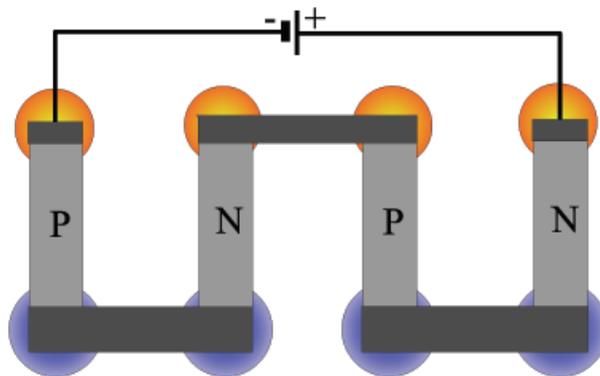


Figura A.2: Dispositivo di Peltier costituito dalla serie di due coppie termoelettriche elementari.

Le coppie sono poi generalmente disposte tra due sottili piastre, generalmente in materiale ceramico, che consentono di isolare elettricamente le giunzioni metalliche e che costituiscono le superfici di scambio termico (Fig.A.3)

Il verso del flusso termico attraverso un modulo termoelettrico dipende dal verso della corrente, e può essere invertito agevolmente. I dispositivi termoelettrici possono dunque essere usati tanto per raffreddare quanto per riscaldare. La potenza termica estratta dal corpo o dall'ambiente raffreddato e quella ceduta al corpo o all'ambiente riscaldato devono attraversare gli strati ceramici, la cui resistenza alla conduzione termica deve pertanto essere tenuta in considerazione. Tuttavia, dato il piccolo spessore di tali strati,

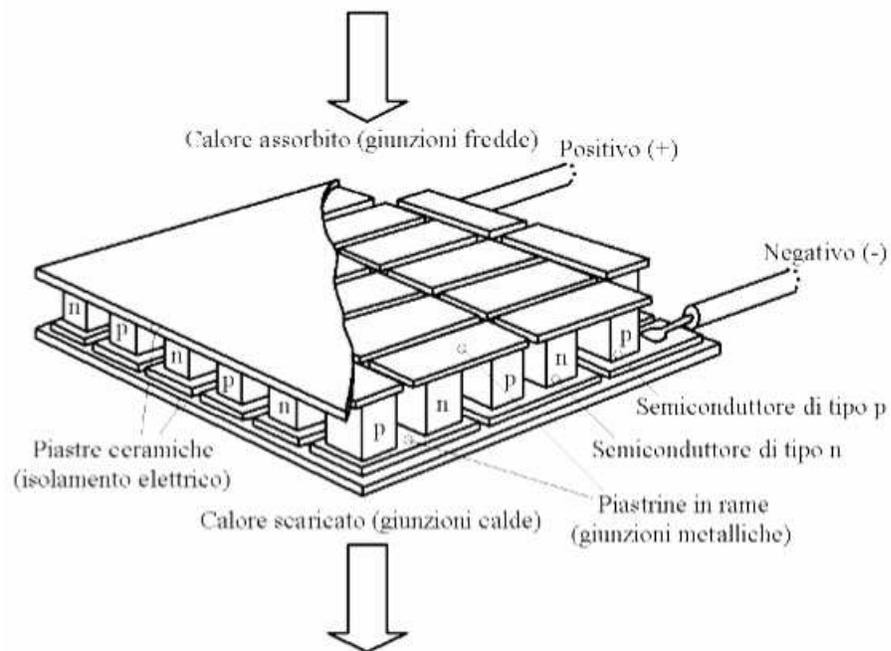


Figura A.3: Modulo di Peltier commerciale costituito dalla serie di N coppie termoelettriche elementari montati fra due strati ceramici

tale resistenza può essere trascurata anche in virtù dell'elevata conduttività termica del materiale in cui sono realizzate.

L'effetto Peltier, per quanto visto, risulta essere direttamente proporzionale alla corrente che attraversa il modulo, l'effetto Joule invece mostra una dipendenza quadratica. Appare dunque evidente che esisterà un limite superiore alla corrente da fornire al modulo oltre il quale la dissipazione dovuta all'effetto Joule risulterà superiore al raffreddamento dovuto all'effetto Peltier. Inoltre, la conduzione termica viene ad aumentare all'aumentare della differenza di temperatura presente fra le due faccie. Ciò determinerà un limite superiore alla massima differenza di temperatura realizzabile fra giunzione fredda e giunzione calda, in corrispondenza del quale gli effetti combinati della dissipazione elettrica e della conduzione compensano perfettamente l'effetto Peltier, annullando di conseguenza il potere frigorifero alla giunzione fredda. Si riportano per completezza le relazioni normalmente impiegate per una stima della corrente massima e della massima differenza di temperatura realizzabile in un dispositivo di Peltier:

$$I_{max} = \frac{kG}{a} \left[\sqrt{1 + (2ZT_h)} - 1 \right] \quad (A.8)$$

$$\Delta T_{max} = T_h - \left[\frac{\sqrt{1 + (2ZT_h)} - 1}{Z} \right] \quad (A.9)$$

La tensione da fornire ad un modulo di Peltier è fornita dalla caduta di potenziale determinata dalle dissipazioni elettriche e dalla somma algebrica dei gradini di potenziale presenti alle giunzioni calde e fredde:

$$\Delta V = 2N \left[aT_h(T_h - T_c) + \frac{r}{G} I \right] \quad (A.10)$$

in cui N rappresenta il numero complessivo di coppie (supposte identiche) presenti nel modulo di Peltier. Fatte queste considerazioni, è possibile andare a determinare a quanto ammonta la potenza assorbita da un modulo di Pelier:

$$P = \Delta V \cdot I = 2N \left[aT_h(T_h - T_c)I + \frac{r}{G} I^2 \right] \quad (A.11)$$

Si può ora definire il coefficiente di prestazione (COP), come il rapporto fra potenza frigorifera utile e potenza assorbita dal dispositivo, ovvero:

$$COP = \frac{Q_c}{P} \quad (A.12)$$

A.2 Moduli termoelettrici commerciali

Il dispositivo di Peltier, o modulo termoelettrico, risulta ormai un prodotto industriale con caratteristiche ben definite. Tipici moduli possono estrarre dalla giunzione fredda potenze fino a 60W e realizzare differenze di temperatura fino a $70^{\circ}C$. Qualora si rendessero necessarie delle prestazioni superiori, si possono impiegare moduli termoelettrici multistadio posti in cascata. Nel caso da noi studiato, una differenza di temperatura di $70^{\circ}C$ appare sufficiente e può essere opportunamente realizzata da un dispositivo di geometria pressochè quadrata con un lato di circa $6mm$. Tale dispositivo è presente nei cataloghi dei principali produttori di moduli termoelettrici e non richiede quindi un budget molto elevato per poter essere acquistato.

Bibliografia

- [1] Manfred Kohl. *Shape Memory Microactuators*. Springer, 2002.
- [2] Auricchio F. and Petrini L. A three-dimensional model describing stress-temperature induced solid phase transformation: solution algorithm and boundary value problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 60:807–836, 2004.
- [3] Yunus A. Çengel. *Termodinamica e trasmissione del calore*. McGraw-Hill, 1998.
- [4] E. Just M. Kohl, B. Kevret. SMA microgripper system. *Sensors and Actuators*, A(97-98):646–652, 2002.
- [5] K.D. Skrobanek M. Kohl. Linear microactuators based on the shape memory effect. *Sensors and Actuators*, A(70):104–111, 1998.
- [6] Dieter Stöckel, editor. *Nitinol medical devices and implants*, SMST Conference Proceedings.
- [7] Alberto Muscio. Dispositivi termoelettrici ad effetto peltier per refrigerazione e controllo termico.
- [8] D.M.Rowe. *CRC Handbook of Thermoelectrics*. CRC Press, 1995.
- [9] D.Gonzalez-Mendizabal, P.Bortot, and A.L.Lopez de Ramos. A Thermal Conductivity Experimental Method Based on the Peltier Effect. *International Journal of Thermophysics*, 19, 1998.
- [10] D.D.L.Wijngaards, S.H.Kong, M.Bartek, and R.F. Wolffenbuttel. Design and fabrication of on-chip integrated polysige and polysi peltier devices. *Sensors and Actuators*, 85:316–323, 2000.
- [11] J.Abadie, N.Chaillet, and C.Lexcellent. An integrated shape memory alloy micro-actuator controlled by thermoelectric effect. *Sensors and Actuators*, 99:297–303, 2002.

- [12] Maria Rota. Compositi attivi con materiali a memoria di forma. Technical report, Università degli Studi di Pavia - Facoltà di Ingegneria, 2001.
- [13] A.Tuissi, S.Besseghini, T.Ranucci, F.Squatrito, and M.Pozzi. Effect of nd-yag laser welding on the functional properties of the ni-49.6at. *Materials Science and Engineering*, A273-275:813–817, 1999.
- [14] T.G.Frank, W.Xu, and A. Cuschieri. Shape memory application in minimal access surgery - the dundee experience. *Proceedings of the Second International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, 1997.
- [15] J.Peirs, D.Reynaerts, J.Van Humbeeck, and H. Van Brussel. Design of a modular actuator for minimal invasive surgery. *Proceedings of the Second International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, 1997.
- [16] E.P.Ryklina, T.V.Morozova, I.Yu.Khmelevskaya, S.D. Prokoshkin, P.A.Sychev, Yu.N.Bely, S.A. Dobrodeev, V.V. Shebryakov, and I.Yu. Migyleva. New device for endosurgery based on shape memory and superelasticity. *Proceedings of the Second International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, 1997.
- [17] T.G.Frank, W.Xu, and A. Cuschieri. Shape memory application in minimal access surgery - the dundee experience. *Proceedings of the Second International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, 1997.
- [18] R.Plietch, P.Schlossmacher, M.Blumhofer, and K.Erhlich. Shape design and fatigue life estimation of pseudoelastic niti micro-forceps used in minimum invasive surgery applications. *Proceedings of the Second International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, 1997.
- [19] C.M.Wayman and T.W. Duerig. An introduction to martensite and shape memory. *Engineering aspects of shape memory alloys*, 1990.
- [20] K.N.Melton. Ni-ti based shape memory alloys. *Engineering aspects of shape memory alloys*, 1990.
- [21] J.L.Proft and T.W.Duerig. The mechanical aspects of constrained recovery. *Engineering aspects of shape memory alloys*, 1990.

- [22] K.N.Melton. Ni-ti based shape memory alloys. *Engineering aspects of shape memory alloys*, 1990.
- [23] A.Keeley, D.St ockel, and T.W.Duerig. Actuator and work production devices. *Engineering aspects of shape memory alloys*, 1990.
- [24] T.Waram. Design principles for ni-ti actuators. *Engineering aspects of shape memory alloys*, 1990.
- [25] J.P. O'Leary, J.E.Nicholson, and R.F.Gatturna. The use of ni-ti in the homer mammalok. *Engineering aspects of shape memory alloys*, 1990.
- [26] K.N.Melton. Ni-ti based shape memory alloys. *Engineering aspects of shape memory alloys*, 1990.