



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale/magistrale in **ingegneria meccanica**

**PROGETTAZIONE DI SISTEMI DI PRESA TRAMITE ATTUATORI IN  
LEGHE A MEMORIA DI FORMA**

**GRIPPING SYSTEMS DESIGN THROUGH SHAPE MEMORY ALLOYS  
ACTUATORS**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. **Marco Sasso**

Tesi di Laurea di:

**Santoni Sebastiano**

**A.A. 2019 / 2020**

*Alla mia famiglia*

# **Indice**

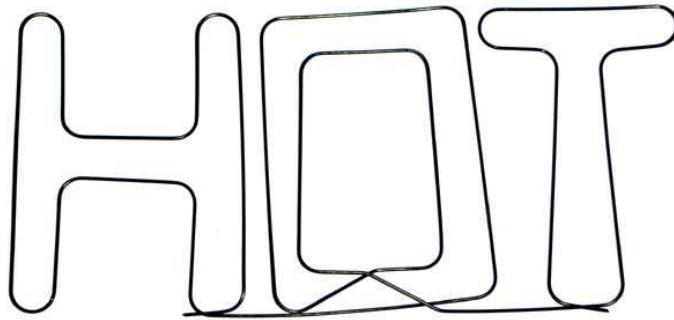
<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>2</b>
<b>CAPITOLO 1 – IL NITINOL</b>	
<b>1.1 Processi di produzione del Nitinol.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Caratterizzazione delle SMA.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2.1 Memoria di forma.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.2 Superelasticità.....</b>	<b>19</b>
<b>1.3 Il conferimento della forma.....</b>	<b>22</b>
 <b>CAPITOLO 2 – L’ATTUATORE</b>	
<b>2.1 Il sistema di presa.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2 Analisi del cinematismo.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3 Analisi del sistema filo-molla.....</b>	<b>35</b>
<b>2.4 Configurazione d’assieme.....</b>	<b>42</b>
 <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	 <b>43</b>

## Introduzione

“C’era una volta” oltre che ad un ottimo incipit per la narrazione di una qualsivoglia storia è un’azzeccata, quanto sintetica, descrizione metaforica di quello che è il fenomeno caratterizzante le cosiddette “Leghe a memoria di forma” (“Shape Memory Alloys”, SMA).

Immaginate di prendere tra le mani una semplice graffetta, di quelle utilizzate per tenere assieme un insieme non troppo grande di fogli, costituita da un sottile filo metallico e di modificarne la forma nei modi più disparati possibili. Difficilmente sarete in grado di rimodellarla nella sua forma originaria e, a meno che non vi stiate avvicinando al mondo del furto con scasso, altrettanto difficilmente vi potrà tornare utile. Ma se proviamo a ripetere la stessa esperienza con una graffetta in materiale a memoria di forma siamo in grado di realizzare quello che a tutti gli effetti sembrerebbe il trucco di un bravo mago: difatti ponendo il nostro filo deformato in un contenitore contenente dell’acqua calda, vedremo la nostra graffetta riassumere man mano la sua forma originaria, riottenendo le medesime caratteristiche che aveva prima della nostra interazione con essa. In questa trattazione si cercherà di spiegare quali sono le motivazioni di tale fenomeno, ciò che di particolare caratterizza questi materiali “intelligenti” e soprattutto come cercare di sfruttare

questo effetto ai fini della realizzazione di un piccolo sistema di presa per mezzo di un attuatore in lega a memoria di forma.



*Figura 1 – Un filo di Nitinol a cui è stata conferita come forma originaria simpaticamente la scritta “Hot” dato che quest’ultima viene ri-ottenuta proprio per apporto di calore.*

Il massimo esponente della famiglia delle leghe a memoria di forma è senza dubbio il Nitinol (Nichel Titanium Naval Ordnance Laboratory) il cui nome racconta già abbastanza bene quelle che sono le sue origini. Esso difatti è un composto intermetallico, ovvero un solido composto da, in questo caso, due atomi di diversi metalli ordinati a formare un reticolo cristallino ben definito nel quale Nichel e Titanio sono presenti in quantità circa uguale. Inoltre, la seconda parte del nome non è altro che il nome del laboratorio di ricerca dove William J. Buehler era alla ricerca di un materiale in grado di resistere alle temperature sviluppatesi nel rientro nell’atmosfera da parte di un corpo proveniente dallo spazio. Durante i suoi test su

materiali bimetallici, in maniera fortuita, si accorse del diverso comportamento di due barre di una lega Ni-Ti, una raffreddata e l'altra ancora ad alta temperatura e ne approfondì questo suo singolare comportamento. Si osservò dunque una lega in grado di variare la propria conformazione al variare della temperatura di mantenimento, tale lega venne quindi chiamata "Nitinol".

# 1 Il Nitinol

## 1.1 Processi di produzione del Nitinol

La lega di Nitinol va realizzata a partire dallo stato liquido della miscela bimetallica, essa viene generalmente lavorata a caldo una volta solidificatasi e infine viene lavorata per mezzo di macchine utensili in modo da conferirle la forma finale. Per quanto riguarda la realizzazione di componenti più piccoli e richiedenti maggiore precisione, si è soliti intervenire per mezzo di specifici procedimenti di forgiatura o per mezzo di additive manufacturing.

**Vacuum Induction Melting (VIM):** Questo particolare tipo di getto è realizzato per fusione di leghe con l'utilizzo di gas inerti o in condizioni di vuoto; è particolarmente utilizzata per metalli con propensione all'ossidazione riuscendo a fornire un notevole apporto di calore per mezzo dell'induzione elettromagnetica. Le barre di Titanio e le sfere di Nichel vengono così portati a miscelarsi in fase

liquida ad alte temperature in un crogiuolo di grafite (il Nichel, che presenta un punto di fusione più basso fonde in anticipo rispetto al Titanio, la loro corretta unione nel successivo reticolo cristallino viene appunto garantita dalle condizioni di vuoto in cui si opera). Il composto viene poi sistemato in una forma di acciaio delle dimensioni desiderate interponendo tra esse un sottile strato di ossido di Ittrio col compito di conservare le caratteristiche della lega.

**Vacuum Arc Remelting (VAR):** In questo caso il procedimento è simile a quello adottato nel VIM con la differenza che al posto del crogiuolo di grafite (che assicurava una bassa diffusione degli atomi di carbonio all'interno del reticolo cristallino della lega bimetallica) vengono utilizzati due elettrodi (consumabili o meno) dei due materiali da fondere e viene fornito calore attraverso una saldatura ad arco a base di tungsteno.

**Electronic Beam Melting (EBM):** Nel processo di fusione attraverso raggi di elettroni sono utilizzati impianti di pompe da vuoto e crogiuoli in rame raffreddati ad acqua in modo da garantire la minima presenza di carbonio possibile. È una tecnica abbastanza comune rispetto alle due viste precedentemente, che al contrario dell'EBM permettono un maggior controllo della miscela per quanto concerne la sua composizione chimica e la perdita per evaporazione degli elementi.



**Selective Laser Sintering (SLS):** La “sinterizzazione selettiva” non si discosta molto dal normale processo di sinterizzazione (che avviene grazie ad un distributore cilindrico che livella un sottile strato delle polveri dei metalli che si intendono portare a fusione) ma a differenza di quest’ultimo, il raggio laser con le relative lenti di focalizzazione del fascio energetico agisce in un ambiente ricco di Argon. Seppure il processo di selettività fornisca alla lega un’elevata precisione dimensionale, la finitura superficiale richiederà sicuramente rettifiche a causa dell’eccessiva porosità originatasi.

**Hot Isostatic Pressing (HIP):** Le polveri metalliche degli elementi costituenti vengono inserite all’interno di un contenitore cilindrico con gas (Argon generalmente) ad alta pressione e sono sottoposti a pressioni e temperature elevate. L’utilizzo di un gas inerte durante il processo di mantenimento della pressione e dunque di fusione dei materiali è necessario per evitare la formazione di bolle d’aria e porosità che altererebbero le caratteristiche e l’integrità del Nitinol prodotto.

**Metal Injection Molding (MIM):** L’iniezione liquida è estremamente utilizzata nei materiali polimerici e nel caso dei metalli consiste in una vera e propria formatura per iniezione della miscela di polveri metalliche nello stampo della forma desiderata, l’oggetto così ottenuto viene poi sinterizzato e successivamente

raffreddato prestando attenzione ad evitare la formazione di eventuali cricche che renderebbero il pezzo inutilizzabile.

I semilavorati che si ottengono vengono poi lavorati in base alle specifiche condizioni di utilizzo e possono quindi andare incontro a processi di tempra, lavorazione a caldo o trattamenti di finitura superficiale. Inoltre, le stesse caratteristiche della lega ottenuta rendono difficoltose le lavorazioni alle macchine utensili e vengono dunque preferite operazioni di rettifica meno comuni come il taglio al laser/plasma, il waterjetting (taglio con acqua ad altissima pressione) e lavorazioni di abrasione e limatura.

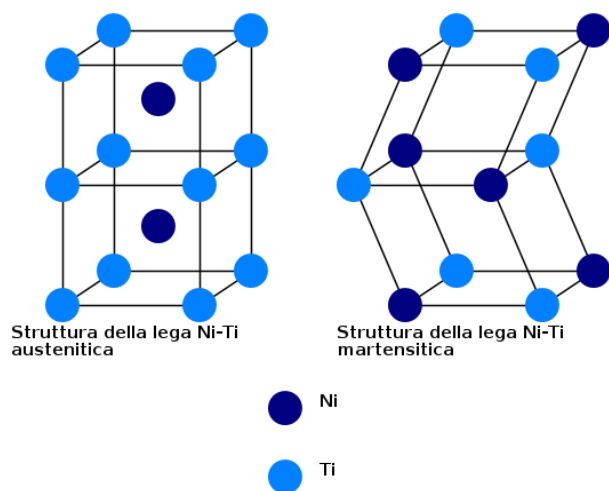
## 1.2 Caratterizzazione delle SMA

Cerchiamo adesso di entrare più nello specifico per quanto riguarda il “come” siano possibili determinati comportamenti da parte delle leghe a memoria di forma (SMA); per fare ciò è importante capire come le straordinarie caratteristiche macroscopiche di tali materiali siano dovute a cambiamenti nella microstruttura a seguito di stimoli esterni di natura termica o magnetica. Nel Nitinol, come in quasi tutte le SMA sensibili a variazioni di temperatura, la funzionalità è data dalla trasformazione termica, nello stato solido della materia, tra due fasi stabili a diverse temperature: la martensite e l'austenite. La variazione di temperatura determina modifiche all'interno del reticolo cristallino per quanto riguarda quelle che sono le interazioni a corto raggio tra gli atomi costituenti la lega bimetallica. In tal modo si manifestano due diversi fenomeni, imputabili alla transizione di fase solido-solido: la capacità di riottenere la forma originaria della lega se riscaldata dopo una deformazione meccanica (Memoria di forma); la possibilità di recuperare deformazioni elevate (attorno al 10% della lunghezza iniziale) e isteresi causate da cicli di carico e scarico meccanico (Superelasticità o Pseudoelasticità).



*Figura 2 – Manifestazione dell'effetto superelastico in un paio di occhiali realizzati in lega SMA.*

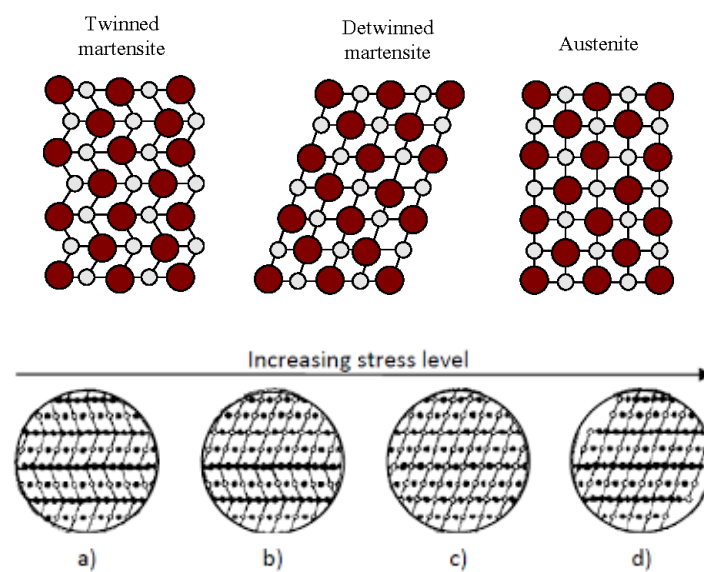
Nello specifico, ciò che caratterizza la diversità delle due fasi metastabili è la disposizione atomica all'interno del reticolo cristallino. La martensite, stabile a temperatura minore, ha una particolare struttura detta “monoclina” (particolare tipo di disposizione a corpo centrato) che presenta un solo piano di simmetria e può dunque avere differenti orientazioni. L'austenite, al contrario, presenta una struttura cubica a facce centrate ed è stabile ad alte temperature. Il cambiamento di fase stabile avviene per mezzo di una cessione di calore (durante la fase di raffreddamento) da parte dell'austenite che porta al riarrangiamento degli atomi nella lega senza che vi sia però alcuna rottura dei legami, bensì una modifica nell'ordine a corto raggio lungo differenti piani e geometrie. Le disposizioni degli elementi di Nichel e Titanio nelle due diverse fasi stabili sono rappresentate in figura 3.



*Figura 3 – Rappresentazione della differente struttura cristallina che caratterizza la fase stabile austenitica del Nitinol e quella stabile martensitica in configurazione “twinned”.*

Tale passaggio avviene gradualmente lungo un’interfaccia che interessa un solo piano di atomi per volta e origina le due differenti forme stabili della martensite: la “twinned” e la “detwinned”. In natura e senza condizioni di stress meccanico la martensite si trova come “twinned” ovvero estremamente ordinata secondo una struttura speculare attorno ai numerosi assi di simmetria. Quando questa geometria viene perturbata, la martensite tende ad assumere un’orientazione preferenziale in direzione del carico meccanico applicato; vi è quindi la perdita della simmetria, a causa di un vero e proprio slittamento atomico, e si giunge nella configurazione “detwinned” che è presente fino ad allungamenti dell’8% circa, punto nel quale si ha la rottura dei legami a corto raggio ed il materiale entra in deformazione plastica.

Oltre tale limite si perde la capacità di recupero della memoria di forma con il conseguente manifestarsi di una deformazione residua non recuperabile per successivo riscaldamento. Nell'immagine sottostante si possono cogliere le differenze tra le due disposizioni e la rispettiva trasformazione di una fase nell'altra.



*Figura 4 – Reticolo cristallino caratteristico delle varie configurazioni stabili della lega NiTi e schematizzazione del processo di “detwinning” a causa dell’applicazione di una forza esterna in incremento.*

Una volta che la lega viene riscaldata, la fase stabile è quella austenitica e dunque, come nel caso del raffreddamento, vi è il riarrangiamento degli atomi nella struttura cubica a facce centrate, più ordinata della “twinned” martensitica in quanto priva di alcun piano di simmetria, che permette il recupero di quella che era la forma iniziale della lega (sempre a meno di sforzi che inducano trasformazioni irreversibili sul

Nitinol). Questo aspetto puramente geometrico è fondamentale per la comprensione di quelle che sono le disposizioni cristalline assunte dalla lega durante l'intero processo riguardante la manifestazione della memoria di forma.

Prendendo una pentola d'acqua e mettendola sopra la fiamma con tanto di coperchio prima di buttare la pasta in ottica prandiale, si può osservare come all'interno di essa coesistano due fasi differenti alla medesima temperatura: liquido e vapore. Allo stesso modo durante le trasformazioni termiche tra la fase martensitica e quella austenitica (e viceversa) si possono osservare gradualmente passaggi di disposizione all'interno del reticolo cristallino, vi è dunque la coesistenza delle due fasi. In linea teorica si avrà dunque che tutta la martensite, una volta iniziato il passaggio di fase (alla temperatura  $A_s$ : Austenite Start), si trasformi interamente in austenite ad una determinata temperatura finale ( $A_f$ : Austenite Finish). Allo stesso modo durante il raffreddamento del Niti si ha la perdita della cella elementare cubica tipica dell'austenite e la graduale trasformazione in martensite "twinned" (a partire dalla temperatura  $M_s$ : Martensite Start, fino al completo passaggio di fase  $M_f$ : Martensite Finish). Nella raffigurazione sottostante si osserva la trasformazione dell'assetto cristallino durante i procedimenti di raffreddamento e riscaldamento del Niti; si può notare come l'apporto e la sottrazione di calore abbiano un picco proprio negli intervalli "start" e "finish" (dove a piccole variazioni di temperatura corrispondono elevati flussi di energia termica) in analogia con la transizione di stato dell'acqua, dove il calore fornito nel caso dell'acqua serve a rompere i legami allo stato liquido

senza che vi sia un aumento della temperatura mentre per il Niti è utilizzato per la modifica dei legami a corto raggio e quindi, della conformazione cristallina.

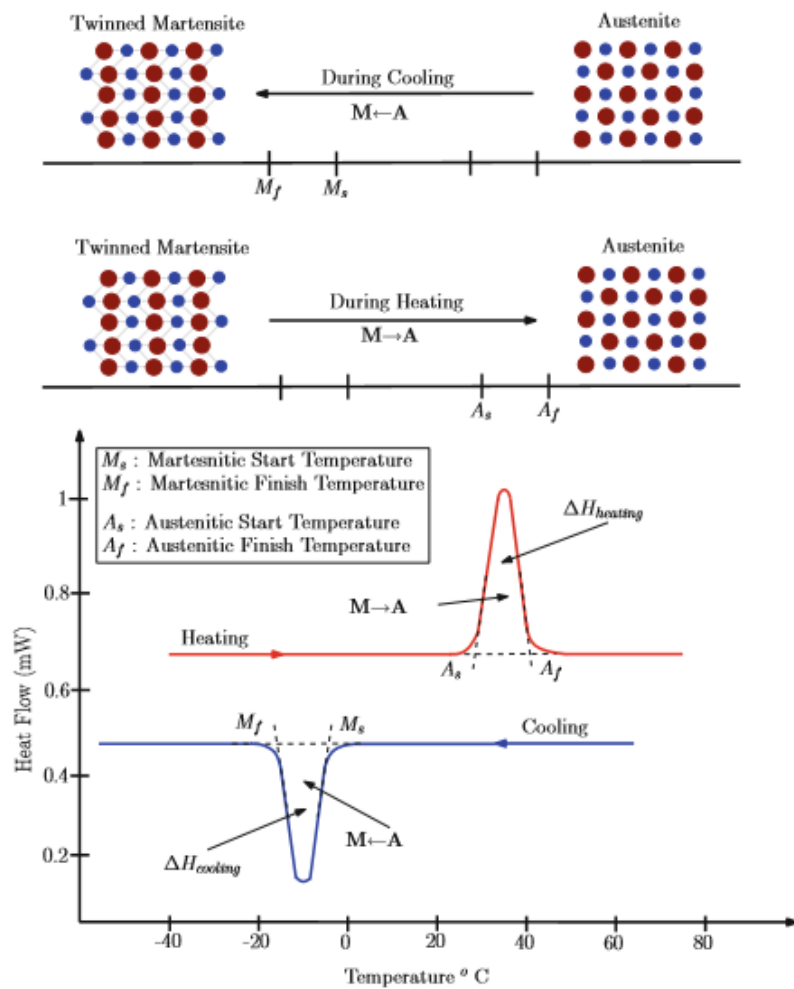
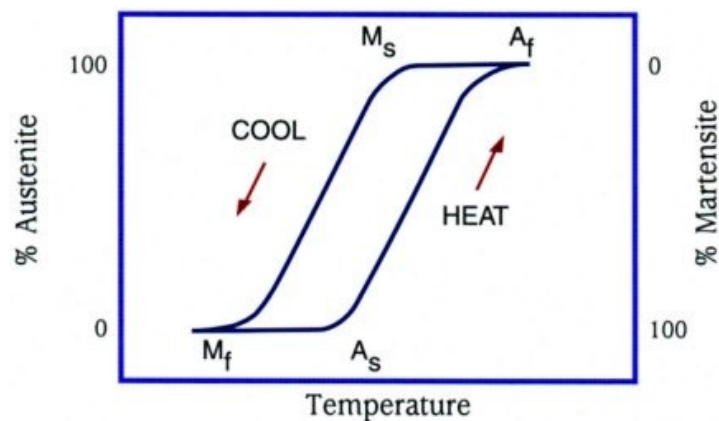


Figura 5 – Grafico rappresentante la transizione di fase tra austenite e martensite (e viceversa) dovuto all'apporto e al rilascio di calore. È bene notare come in corrispondenza del vero e proprio passaggio di fase ad un notevole aumento (diminuzione) di flusso termico corrisponda un relativamente basso incremento di temperatura. "Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators", Springer, 2015.



Date le diverse di temperature di inizio e fine dei cambiamenti dell'assetto cristallino si osserva la presenza del fenomeno di isteresi termica, ovvero un diverso comportamento durante le fasi di cessione ed assorbimento del calore che genererà dunque un diverso percorso di trasformazione di fase. Tale fenomeno è evidenziato in figura 6.



*Figura 6 – Manifestazione grafica del fenomeno di isteresi che intercorre tra i procedimenti di riscaldamento e raffreddamento a temperature diverse di inizio e fine passaggio di fase.*

Proviamo ora, con l'ausilio del grafico in figura 7, a spiegare in maniera dettagliata il comportamento della struttura microcristallina della lega di Nitinol in relazione agli stimoli esterni di carico meccanico ed apporto di calore. Ciò ci permetterà di

cogliere le differenze tra memoria di forma e superelasticità, caratterizzando il campo di esistenza dei due fenomeni in intervalli ben definiti.

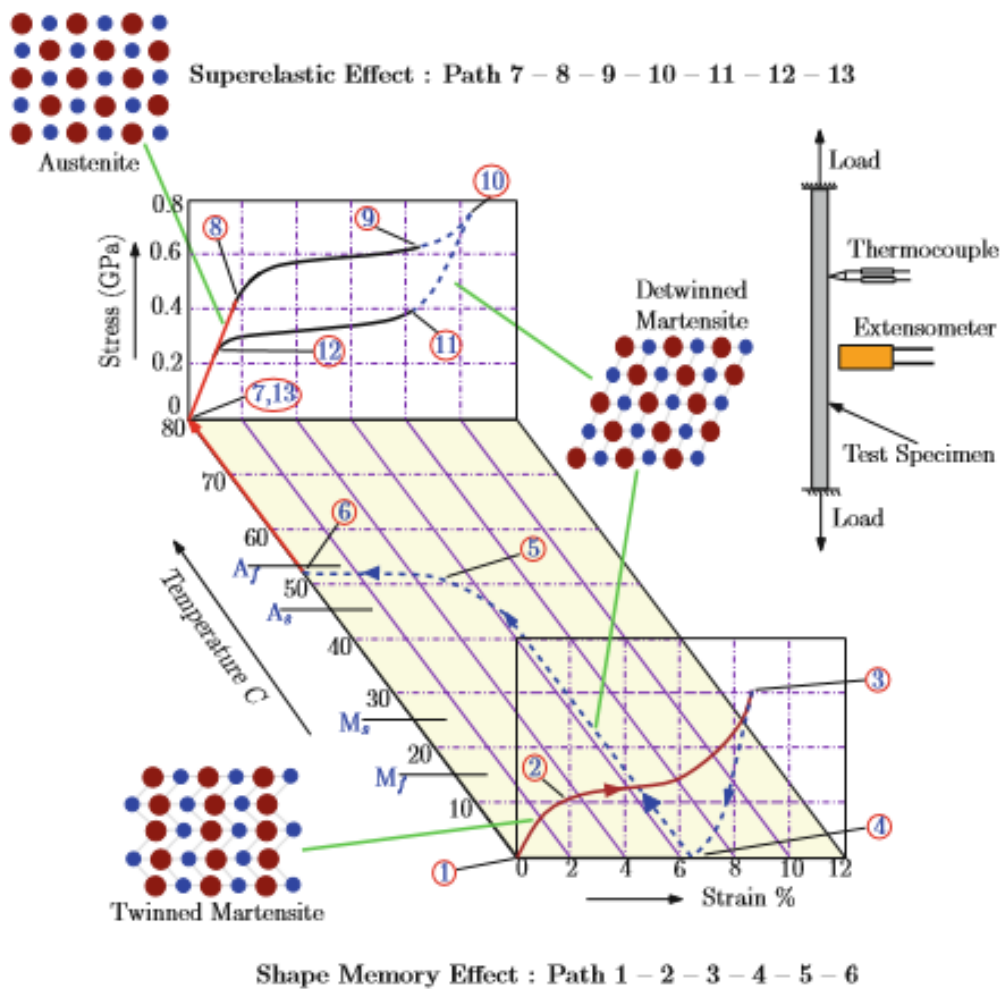


Figura 7 – Grafico rappresentante il funzionamento della memoria di forma e dell'effetto superelastico all'aumentare del carico applicato, della temperatura e della deformazione osservabile. "Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators", Springer, 2015.

## **1.2.1 Memoria di forma**

**Tratto 1-2:** Per bassi valori di carico la martensite si trova nella sua configurazione altamente ordinata, ovvero quella “twinned”, le deformazioni sono minime ed il comportamento è praticamente perfettamente elastico in relazione al modulo di Young della fase martensitica (che è minore di quello della fase austenitica)

**Tratto 2-3:** Aumentando lo stress sulla lega bimetallica con carichi più elevati si ha la transizione verso la configurazione “detwinned”: lo sforzo meccanico porta all’orientamento preferenziale dei grani che dunque perdono la loro compattezza e si “srotolano” lungo il piano. Questa deformazione può raggiungere l’8% della lunghezza iniziale del provino sottoposto a trazione, si deve però prestare attenzione a tale limite poiché nel caso di maggiori allungamenti indotti si ha la rottura dei legami a corto raggio con conseguenti manifestazioni di plasticizzazione permanente che non sono in grado di essere recuperate per apporto di calore. Questo tratto più orizzontale della curva è caratteristico del materiale ed è chiamato “plateau martensitico”, il valore di tensione medio che caratterizza questo segmento è fondamentale nel criterio di scelta degli SMA.

**Tratto 3-4:** In questa sezione di curva c’è un semplice scarico meccanico dal punto 3 con il rilassamento delle tensioni indotte all’interno della martensite orientata. Si osserva che il provino non ritorna nella sua configurazione iniziale bensì manifesta

un'importante deformazione residua (nell'ordine del 6% circa) proporzionale al valore di stress raggiunto nel punto 3. Si presti attenzione alla natura di tale allungamento permanente che non ha nulla a che vedere col fenomeno di plasticizzazione, lo snervamento non è quindi stato raggiunto e ciò che vediamo non è altro che la completa orientazione preferenziale dei grani monoclini di martensite deformata.

**Tratto 4-5-6:** In questa fase si fornisce energia termica al provino al fine di aumentarne la temperatura sino a giungere all' $A_f$ , dove la fase martensitica orientata si è completamente trasformata in austenite, stabile a temperature più elevate, e si ha il completo recupero della deformazione residua nel punto 4. In questo caso l'arco termico di variazione di fase stabile compreso tra austenite start ed austenite finish è di circa dieci gradi e si aggira attorno ai  $50^{\circ}\text{C}$ .

**Tratto 6-1:** Con il punto 6 si ha il completo manifestarsi della memoria di forma: il provino sottoposto a stress meccanico ha recuperato completamente la sua forma originaria una volta riscaldato al di sopra della  $A_f$ . Se raffreddato in assenza di sforzi meccanici, al di sotto della temperatura  $M_f$  (quando tutta l'austenite si è trasformata in martensite "twinned"), si otterrà il medesimo provino di partenza, pronto a eseguire un nuovo ciclo di carico termomeccanico. Va comunque sottolineato il fatto che raramente ci si trova in queste condizioni, dato che anche durante la fase di raffreddamento si ha solitamente la presenza di forze esterne: ciò

comporta un non completo recupero delle dimensioni originarie della lega di Nitinol.

## **1.2.2 Superelasticità**

**Tratto 7-8:** Al di sopra della  $A_f$  si ha austenite con cella elementare cubica, altamente ordinata e stabile ad alte temperature. Nella prima parte della curva caratteristica si nota subito che il comportamento è perfettamente elastico per carichi di intensità non troppo elevata, con modulo di Young leggermente superiore a quello della martensite originatasi per raffreddamento della lega.

**Tratto 8-9:** Con l'aumentare del carico meccanico applicato si ha un fenomeno molto interessante, difatti la fase austenitica stabile nelle condizioni precedenti inizia il suo processo di trasformazione del reticolo cristallino in un particolare tipo di martensite, simile a quella "detwinned" con scorrimento preferenziale, chiamata "Martensite da stress indotto" (SIM, Stress Induced Martensite). La trasformazione cristallina da una cella cubica ad una monoclina porta a deformazioni visibili pari in alcuni casi al 10% della lunghezza iniziale del provino, qui ha parzialmente inizio il verificarsi dell'effetto superelastico con la graduale transizione di tutta l'austenite in SIM (nel caso reale si è comunque osservata una minima presenza di austenite

non trasformata). Qui viene determinato il plateau superiore di carico (UPS, Upper Plateau Strength), ovvero il carico che causa una deformazione del 3%.

**Tratto 9-10:** Una volta completata la trasformazione in SIM si ha quindi il classico comportamento elastico di questa nuova fase indotta, tuttavia il carico sopportabile prima che si abbia snervamento è relativamente piccolo e dunque si deve prestare attenzione a non entrare in plasticizzazioni che non permetterebbero l'effettivo manifestarsi dell'effetto superelastico. Nel complesso si riescono a raggiungere deformazioni del 12-13% recuperabili dalla lega Niti.

**Tratto 10-11:** Si procede poi alla fase di scarico del provino che dunque man mano recupera l'elongazione in fase martensitica indotta ed inizia il processo di trasformazione inversa, ovvero la SIM tende a tornare nella configurazione cubica classica dell'austenite, termodinamicamente stabile nelle condizioni attuali.

**Tratto 11-12:** In questa porzione di curva si ha la completa trasformazione in austenite nel punto 12 con recupero dell'allungamento per contrazione del provino dopo rilascio del carico meccanico. Si nota che il percorso seguito dalla lega non è lo stesso della fase di carico e ciò porta alla definizione di un altro parametro fondamentale nella scelta della lega SMA: il plateau di scarico inferiore (LPS, Lower Plateau Strength), pari allo stress meccanico corrispondente al 2,5% di allungamento durante la fase di rilascio dopo aver ottenuto un aumento della dimensione del 6% per applicazione esterna di forza.

**Tratto 12-13:** Nella parte finale della curva si ha, idealmente, l'esatta sovrapposizione delle curve di carico e scarico con i punti 8 e 13 che vanno a coincidere. In realtà però, raramente si ha il completo recupero dell'allungamento e quindi vi è la presenza di piccoli residui di elongazione. Ciò è dovuto al fatto che durante le trasformazioni di austenite in SIM nel plateau superiore e quelle inverse nel plateau inferiore le due fasi coesistono, dunque la presenza di elementi nel reticolo cristallino in condizioni diverse da quelle della fase stabile portano a piccole imperfezioni nel fenomeno della superelasticità. L'effettivo utilizzo di tale effetto della lega Niti è reso possibile dall'abbassamento della temperatura  $A_f$  in fase di realizzazione della lega SMA, difatti rendendo stabile la fase austenitica a temperature minori si è in grado di avere l'effetto superelastico in condizioni pressoché uguali a quelle ambientali (senza la necessità di alcun tipo di riscaldamento per apporto di calore).

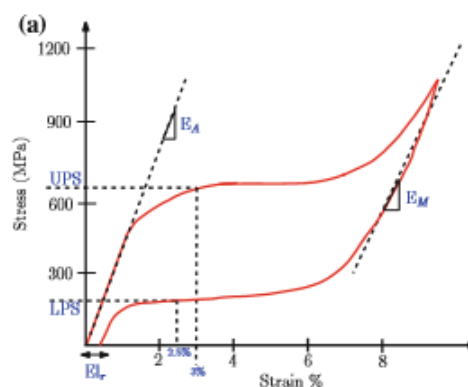


Figura 8 – Grafico rappresentante il fenomeno della superelasticità: in evidenza ci sono i due valori di UPS e LPS, i differenti valori di modulo elastico al variare della fase stabile e la deformazione residua per non perfetta ri-trasformazione della martensite. SIM in austenite. “Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators”, Springer, 2015.

## 1.3 Il conferimento della forma

Assume quasi una sfumatura filosofica il fatto che del Nitinol, seppur incredibilmente interessante da studiare nelle sue caratteristiche chimico-fisiche, rubi la scena sempre l'aspetto esteriore: le sue forme per quanto improbabili ed intricate siano state rese, torneranno sempre ad essere quelle di partenza. Dopo aver analizzato il perché di tale insolito comportamento ed aver svelato il trucco che si cela dietro la magia della graffetta, è importante delineare il procedimento per mezzo del quale la memoria di forma viene conferita ed il ruolo fondamentale giocato dalla temperatura.

Prendiamo come riferimento un sottile filo di Nitinol, come quello che sarà necessario nella realizzazione del nostro sistema di presa, ma a differenza di quest'ultimo desideriamo conferirgli una forma frastagliata. Fin da subito ci si rende conto dell'attenzione che si deve prestare nel realizzare il nostro componente filiforme, dato che sarà proprio la fase (martensitica o austenitica) che decidiamo di mantenere stabile a temperatura ambiente a definire quale delle caratteristiche del Niti riusciremo poi a sfruttare, se la superelasticità o la memoria di forma. Concentrandoci sul caso di nostro interesse, ovvero il secondo dei due sopracitati, si dovranno utilizzare delle specifiche guide in materiale refrattario (o comunque resistente ad alte temperature) attorno a cui far passare il filo in modo da ottenere



le curvature desiderate (i raggi di curvatura non devono essere troppo piccoli altrimenti si rischiano fratture sull'estradosso del filo durante il raffreddamento). È importante che le estremità del filo siano fissate alle loro guide così da non permettere il ritorno del materiale alla sua forma lineare, difatti alle alte temperature alle quali viene conferita forma al Nitinol la fase stabile è quella austenitica; per bloccare le terminazioni si utilizza di solito del metallo pesante, in grado di assicurare la riuscita del processo. Solitamente la temperatura alla quale viene effettuato il trattamento oscilla tra i 400 e i 550°C e viene mantenuto in forno dai 5 ai 30 minuti, maggiore è il tempo di permanenza in tali condizioni, maggiore sarà la temperatura di trasformazione  $A_f$  alla quale si otterrà tutta fase austenitica. Ciò lascia intendere che al fine di ottenere il manifestarsi dell'effetto superelastico sarà necessario un conferimento della forma direttamente in fase di raffreddamento post-formazione della lega bimetallica così da ottenere austenite come fase stabile a temperatura ambiente. È bene poi notare come la temperatura e la durata di mantenimento in forno incidano profondamente sulle caratteristiche meccaniche del filo andandone a modificare la resistenza a rottura e a snervamento (più alte a minori temperature di mantenimento e maggiori durate). Un altro fattore che incide sulle temperature caratteristiche di passaggio di fase e la quantità di Nichel che, se presente in maggior quantità, abbassa la temperatura di stabilità della fase austenitica (la proporzione ricavata mostra che per un incremento dello 0,1% di Nichel rispetto alla distribuzione equiatomica si ha una diminuzione della

temperatura di transizione di circa dieci gradi). Per quanto riguarda il controllo del prodotto finito, la formazione di ossidi sulla superficie può compromettere le funzionalità del Nitinol, soprattutto se tali strati sono irregolari e poco omogenei (si rischiano proprietà diverse nel medesimo componente) e dunque si ricorre all'utilizzo di forni con pompe da vuoto e al raffreddamento in acqua e in oli. Il processo di conferimento della forma è il punto nevralgico della creazione del Nitinol in quanto si è osservato che in seguito alla successione di un elevato numero di cicli termici, se la modifica di forma apportata dal trattamento non è stata effettuata nel modo corretto, la lega bimetallica composta da Nichel e Titanio tende a non recuperare più la propria forma originaria in fase austenitica.

Vi sono poi due diversi comportamenti assumibili dai materiali a memoria di forma. Nelle cosiddette “memorie ad una via” (One Way Memory), attraverso i trattamenti precedentemente descritti, viene conferita la forma in raffreddamento al Nitinol che avrà dunque a temperatura ambiente la martensite come fase stabile del materiale. Come abbiamo visto durante questa fase, il nostro oggetto può essere deformato ed entro certi limiti (in alcuni casi fino al 10% di deformazione), una volta riscaldato, recupera completamente la propria forma originaria. Nel caso della One Way Memory, una volta che il nostro componente si raffredda, la forma che mantiene è quella ottenuta al termine del riscaldamento al di sopra della  $A_f$  e tale rimane a meno di successive applicazioni di carico meccanico. Al contrario, nelle “memorie a due vie” (Two Way Memory), l'effetto che si manifesta è lo stesso di quello di un

provino che, se riscaldato o raffreddato, tende a modificare la propria forma. Difatti in questo particolare tipo di memoria di forma il materiale è in grado di “ricordare” ben due forme differenti in base alla temperatura, e dunque alla fase stabile in tali condizioni, e di acquisirle man mano che vi sono modifiche dal punto di vista termico nell’ambiente che lo circonda. Il conferimento di questa caratteristica si ha per mezzo di specifici trattamenti termo-meccanici di preparazione (“Training”) che coniugano sforzi meccanici precisi e temperature del componente ben definite durante cicli di carico e scarico.

# 2 L'attuatore

## 2.1 Il sistema di presa

Nel corso degli anni il mondo degli attuatori ha compiuto enormi passi in avanti verso sistemi sempre più tecnologici ed automatizzati, dai più semplici sistemi di presa meccanici ai più evoluti congegni che sfruttano effetti magnetici ed elettrostatici per operare in condizioni di estrema precisione e sicurezza. Ci siamo così posti come obiettivo quello di realizzare una pinza che fosse in grado di lavorare con precisione nell'ambito di oggetti di dimensioni ridotte sfruttando il fenomeno della memoria di forma; cerchiamo quindi di coniugare le caratteristiche di un filo di Niti con le geometrie di un semplice sistema di presa meccanico.

Per iniziare la progettazione è importante definire i binari sui quali muoverci, ciascuna scelta va analizzata in ottica futura in modo che non vada a contrapporsi con le caratteristiche fondamentali dell'attuatore. Nel nostro caso le esigenze di progetto impongono una scelta oculata riguardante le dimensioni e le geometrie del sistema di presa, difatti essendo quest'ultimo realizzato per lo spostamento di piccoli elementi, una particolare attenzione va prestata al contenimento delle misure di lunghezza e larghezza dell'intero oggetto che intendiamo realizzare. L'idea di fondo è quella di realizzare un *impactive gripper*, che solitamente è ad azionamento

elettrico, pneumatico, idraulico o magnetico; nel nostro caso la trasmissione cinematica sarà originata da un sistema filo-molla dove la forza sarà applicata dal secondo dei due elementi, mentre il recupero durante il rilassamento della presa sarà garantito per mezzo della trasmissione di calore all'SMA. Concentrandoci ancora sulle ridotte misure in gioco abbiamo inoltre scelto, tra svariate configurazioni possibili, quella che permettesse un facile assemblaggio dei componenti ed un profilo il più snello possibile: una struttura ricca di elementi meccanici per la trasmissione di forze comporta costi maggiori e una diminuzione del range di forze applicabili a causa degli attriti interni. D'altronde le forze necessarie sviluppate nella nostra pinza si aggirano attorno ai 30 Newton, che come vedremo sono un buon compromesso tra le masse da sollevare e le caratteristiche di filo SMA e molla. Abbiamo dunque optato per un sistema Force-lock nel quale il sostegno avviene solamente per effetto delle forze d'attrito che intercorrono tra i bracci della pinza e l'oggetto. Si è così scelto il cinematismo in figura in figura tra quelli disponibili.

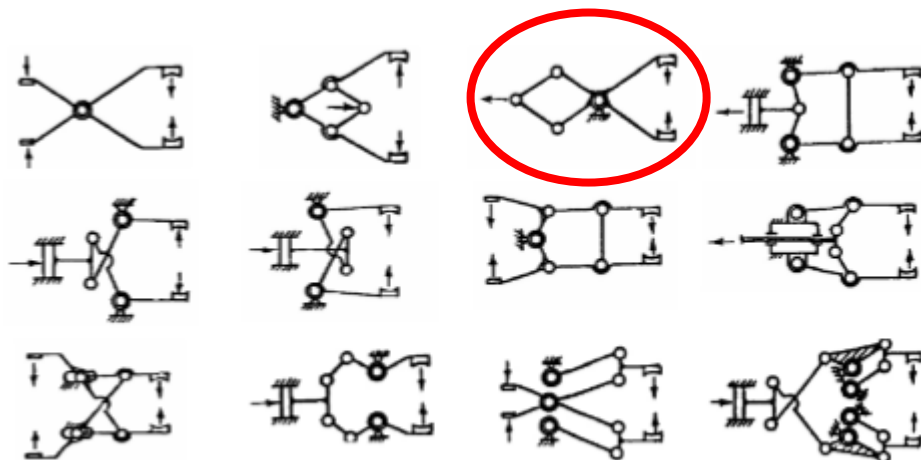


Figura 9 – Cinematismi utilizzati ai fini della trasmissione di forze nei più comuni attuatori meccanici.

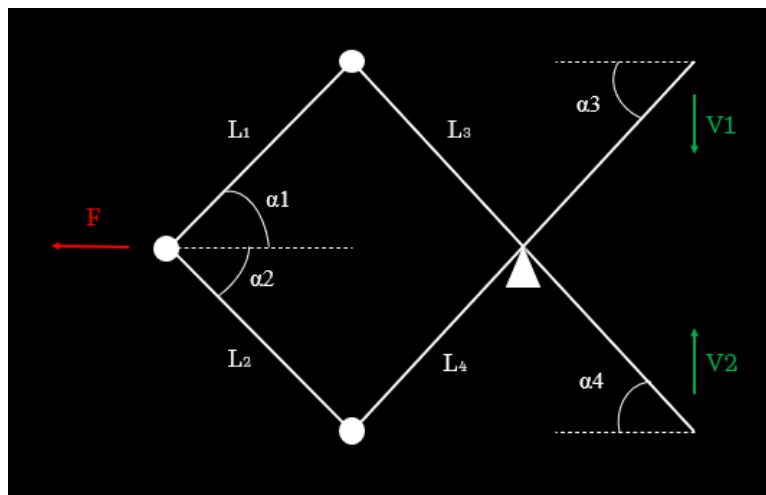


Figura 10 – Configurazione del cinematismo scelto per la pinza costituente il nostro gripper dove vengono evidenziati i parametri fondamentali nella sua progettazione: lunghezze, angoli e posizione del fulcro.

## 2.2 Analisi del cinematismo

Una volta determinato il cinematismo che si vuole utilizzare, si passa ad un'analisi approfondita delle caratteristiche di tale geometria. Innanzitutto, vanno delineate le forze scambiate all'interno del gripper: a partire dalla forza applicata  $F_a$  all'estremità sinistra della pinza si procede al calcolo delle reazioni che si sviluppano nelle cerniere, gli sforzi che vengono scaricati a terra per mezzo del fulcro visibile in figura ed infine il carico in grado di applicare alla massa da sollevare.

Per ottenere tali risultati non ci rimane che realizzare un sistema di sedici equazioni nelle sedici incognite che si originano dalla scomposizione ai nodi. Per fare ciò ci serviamo di Excel, in questo modo non solo saremo in grado di ricavare i risultati che stiamo cercando, ma attraverso un'adeguata caratterizzazione delle equazioni del nostro cinematismo potremo cogliere la variabilità dei nostri risultati al modificarsi dei parametri in gioco. Iniziamo traducendo in forma matriciale il nostro sistema da risolvere: per prima cosa individuiamo il numero di righe e colonne necessarie (una matrice quadrata  $16 \times 16$  nel nostro caso), dopodiché a ciascuna colonna assegniamo una delle reazioni incognite presenti all'interno della nostra pinza. Per ottenere analiticamente le equazioni desiderate immettiamo all'interno del nostro schema, per ogni riga, i coefficienti che assumono le forze da ricavare, precedentemente incolonnate, all'interno di ogni equazione: all'interno

della matrice inseriamo il valore 0 se la reazione non è presente all'interno dell'equazione della riga  $i$ -esima, scriviamo poi il coefficiente adeguato della reazione all'equilibrio delle forze (ad esempio, se ho  $2X+4Y=0$  avrò come valori 2 e 4 nelle rispettive colonne X e Y) nel caso in cui tali valori siano fissi, ed infine, nelle caselle dei coefficienti per le equazioni di equilibrio alla rotazione, andiamo a mettere una vera e propria formula (preceduta dunque dall'uguale) dipendente da parametri quali lunghezze, angoli e posizione del fulcro. Quest'ultimo inserimento nella matrice è da fare con estrema attenzione dato che è proprio da questi coefficienti parametrici che siamo in grado di osservare il modificarsi delle funzionalità della pinza al variare degli elementi costituenti il cinematisimo.

Prima di poter ricavare le nostre incognite è necessario identificare la colonna dei termini noti, difatti per la risoluzione analitica delle nostre equazioni è necessario scrivere il sistema sottoforma di  $AX=B$  (con  $A$ =matrice dei coefficienti,  $X$ =incognite e  $B$ =colonna dei termini noti) in modo tale da ottenere  $X$  moltiplicando la colonna dei termini noti per la matrice inversa dei coefficienti ( $X=A^{-1}B$ ). Nella colonna dei termini noti, dato che si tratta nel nostro caso di semplici equilibri agli spostamenti e alle rotazione senza la presenza di forze esterne, se non quella applicata, abbiamo una colonna di quindici zeri più la  $F_a$  pari a 30N. Una volta completata la laboriosa matrice dei coefficienti, si seleziona una medesima area di sedici colonne per sedici righe e all'interno di essa, con la funzione "Matrice Inversa" si ottiene la  $A^{-1}$  (impostando come estremi della matrice da invertire quelli



associati alla A). Infine, moltiplicando tale matrice inversa per la colonna dei termini noti attraverso la funzione “Matrice Prodotto” otteniamo i valori delle reazioni da noi cercate in funzione dei parametri; successivamente andremo a modificare tali variabili ricercando la soluzione che più rispetti le nostre esigenze.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1		HA	HB	HC	HD	HE	HF	HG	HH	HI	HJ	HK	HL	HM	HN	HO	HP	HQ	HR	HS	HT	HTer. Noti
2		1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25 Forza sp
3		0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4		-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5		0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6		0	0	-40,685	0	0	0	0	0	0	0	29,064	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7		0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9		0	40,685	0	0	0	0	0	0	0	-29,064	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10		0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	0
12		0	0	61,028	0	-20,343	0	0	0	0	0	79,218	0	-26,406	0	0	0	0	0	0	0	0
13		0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	1	0	0	0	0	0
15		0	0	0	-61,028	0	20,342748	0	0	0	0	-79,218	0	26,406	0	0	0	0	0	0	0	0
16		0	0	0	0	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0
18																						
19																						
20																						
21			0,5	0,3572	-0,5	0,3572	-0,0123	-5,96E-17	0	-0,0123	4E-17	0	1E-18	1E-17	0	-1,862E-18	0	1E-17				
22			0,5	-0,3572	0,5	-0,3572	0,0123	5,96E-17	0	0,0123	-4E-17	0	-1E-18	-1E-17	0	1,8624E-18	0	-1E-17				
23			0,5	0,3572	0,5	0,3572	-0,0123	3,868E-17	0	-0,0123	0	0	-4E-18	0	0	1,2088E-18	0	0				
24			0,5	-0,3572	0,5	-0,3572	0,0123	1	-2,329E-16	0,0123	-3E-17	0	-8E-19	-6E-17	0	0	0	-1E-17				
25			0,5	0,3572	0,5	0,3572	-0,0123	3,868E-17	0	-0,0123	1	0	0	0	0	1,2088E-18	0	0				
26			0,5	-0,3572	0,5	-0,3572	0,0123	1	-3,331E-16	0,0123	0	0	0	1	0	-1,209E-18	0	-1E-17				
27			1	-5E-16	1	-5E-16	0	1	-3,331E-16	2E-17	1	0	6E-18	1	0	0	1	-1E-17				
28		0,69994002	0,5	0,6999	-0,5	0,0172	8,343E-17	0	-0,0172	-6E-17	0	-2E-18	-2E-17	0	2,6072E-18	0	0	0				
29		0,69994002	-0,5	0,6999	-0,5	0,0172	8,343E-17	0	-0,0172	-6E-17	0	-2E-18	-2E-17	0	2,6072E-18	0	0	0				
30		0,69994002	0,5	0,6999	0,5	0,0172	5,415E-17	0	-0,0172	-8E-17	0	-4E-18	0	0	1,6922E-18	0	0	0				
31		0,69994002	-0,5	0,6999	-0,5	0,0172	8,343E-17	-1	-0,0172	-6E-17	0	-2E-18	-2E-17	0	2,6072E-18	0	0	0				
32		2,87019979	2,0503	2,8702	2,0503	0,0327	2,22E-16	0	-0,0705	-0,7704	0	-0,0379	0	0	6,9389E-18	0	0	0				
33		2,87019979	-2,0503	2,8702	-2,0503	0,0705	1,5407595	-3	-0,0327	-2E-16	0	-7E-18	-0,7704	0	0,03786999	0	0	-6E-17				
34		0	-4,1006	0	-4,1006	0,0379	1,5407595	-3	0,0379	0,7704	0	0,0379	-0,7704	0	0,03786999	0	0	-1				
35		2,17025978	-1,5503	2,1703	-1,5503	0,0533	1,5407595	-2	-0,0155	-2E-16	0	-5E-18	-0,7704	1	0,03786999	0	0	-4E-17				
36		2,17025978	1,5503	2,1703	1,5503	0,0155	1,205E-16	0	-0,0533	-0,7704	-1	-0,0379	0	0	3,7648E-18	0	0	4E-17				

Figura 11 – Matrice dei coefficienti, matrice inversa e colonna dei termini noti attraverso le quali si sono calcolate le reazioni incognite.

Nel caso specifico in figura si può vedere come nella prima matrice, quella dei coefficienti in alto, si abbiano gli “1” nelle posizioni delle reazioni vincolari presenti all’interno degli equilibri agli spostamenti mentre gli equilibri alle rotazioni sono facilmente identificabili dalla presenza di numeri più complessi. Ebbene tali numeri non sono altro che il prodotto tra la lunghezza dell’asta alla quale si sta eseguendo l’equilibrio alla rotazione, il seno o il coseno (a seconda di

ciascuna geometria con la quale si calcola il momento) dell'angolo, che permette di ottenerne la perpendicolare al moto, ed infine di un parametro chiamato banalmente "fulcro" che indica il variare del braccio della forza al variare della posizione del fulcro lungo le aste 3 e 4. L'ultimo coefficiente da inserire è quindi il primo nella colonna dei termini noti, nel riquadro colorato in giallo basta immettere la forza che agisce dall'esterno sull'attuatore. Una volta inseriti tutti i dati e selezionate, come descritto in precedenza, le giuste relazioni tra matrice dei coefficienti, matrice inversa e colonna dei termini noti, non rimane che selezionare una seconda colonna all'interno del foglio di calcolo con le 16 righe nelle quali verranno riportati tutti i valori delle reazioni incognite.

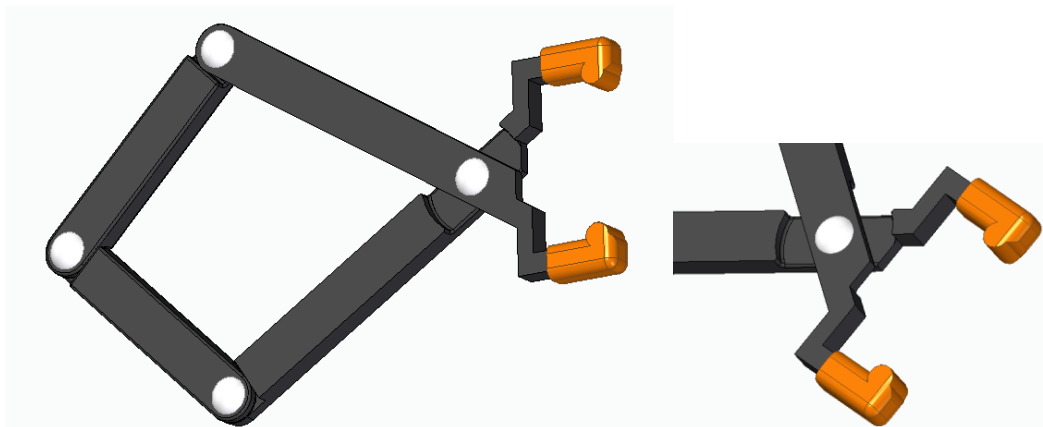
A questo punto si effettua un'analisi qualitativa dei risultati ottenuti andando a determinare le esatte dimensioni del nostro cinematismo in base alle caratteristiche che intendiamo ottenere nel nostro attuatore. Facendo riferimento alla figura 10, per le aste minori (L1 ed L2) e maggiori (L3 ed L4) della pinza le dimensioni scelte sono rispettivamente di 50mm e 100mm e imponiamo che nella configurazione "in presa" l'angolo  $\alpha_1$  sia pari a  $45^\circ$ . Dalla disposizione in figura modifichiamo poi la posizione del fulcro spostandolo più a destra fino a posizionarlo ad un terzo dell'asta L3 (e dunque L4), in tal modo conterremo la larghezza del nostro gripper e saremo in grado, inoltre, di trasferire un maggior valore di forza alle prese: il cinematismo ha così assunto la conformazione di un moltiplicatore di forza (la forza

effettivamente scaricabile alle prese è così pari a 48.77 Newton) rendendo sempre meno significativi i valori di attrito tra gli organi meccanici della pinza.

Altri risultati importanti alla fine del dimensionamento del sistema di presa sono quelli riguardanti gli spostamenti che avvengono tra la configurazione “in presa” e quella di “rilascio”: è fondamentale ottenere un buon compromesso tra le caratteristiche geometriche del gripper ed il sistema SMA-molla in grado di fornire le forze desiderate e rilasciare la presa. Nella configurazione scelta la distanza tra le due prese (in assenza della gomma che dovrà poi sviluppare le forze d’attrito necessarie al sollevamento dell’oggetto) è pari a 35.35mm, la lunghezza totale della pinza è di 120.13mm mentre la sua larghezza è contenuta a soli 70.71mm. Ma a quanto ammonta il valore massimo di massa che l’attuatore è in grado di sostenere? Per rispondere a questa domanda non basterà che eseguire un piccolo calcolo delle forze agenti sulla massa in relazione al coefficiente d’attrito  $\mu$  che vi è tra la gomma delle prese e l’oggetto (che in questo caso consideriamo d’acciaio). Dall’equilibrio della forza peso posseduta dal corpo con le forze d’attrito sviluppatasi proporzionalmente alla forza applicabile dal nostro attuatore si ha che il nostro gripper è in grado di sollevare masse di circa 2,5Kg (avendo già tenuto conto di una diminuzione poco superiore al 10% per operare in condizioni di sicurezza) per un oggetto con dimensione massima pari a 35.35mm.

$$2T - mg = 0 \rightarrow 2T = mg \rightarrow m = \frac{2T}{g}, \text{ con } T = \mu F1 = \mu F2 \rightarrow m = 2\mu \frac{F1}{g} = 2.98\text{Kg}$$

Per completezza abbiamo inoltre realizzato un modello 3D della pinza su Solid Edge in modo da avere un'idea dell'effettiva applicabilità del nostro modello. In figura 12 si può notare l'assieme delle varie aste e dei giunti, c'è poi un piccolo ingrandimento sul supporto di gomma intercambiabile responsabile dell'attrito tra attuatore e corpo da sollevare.

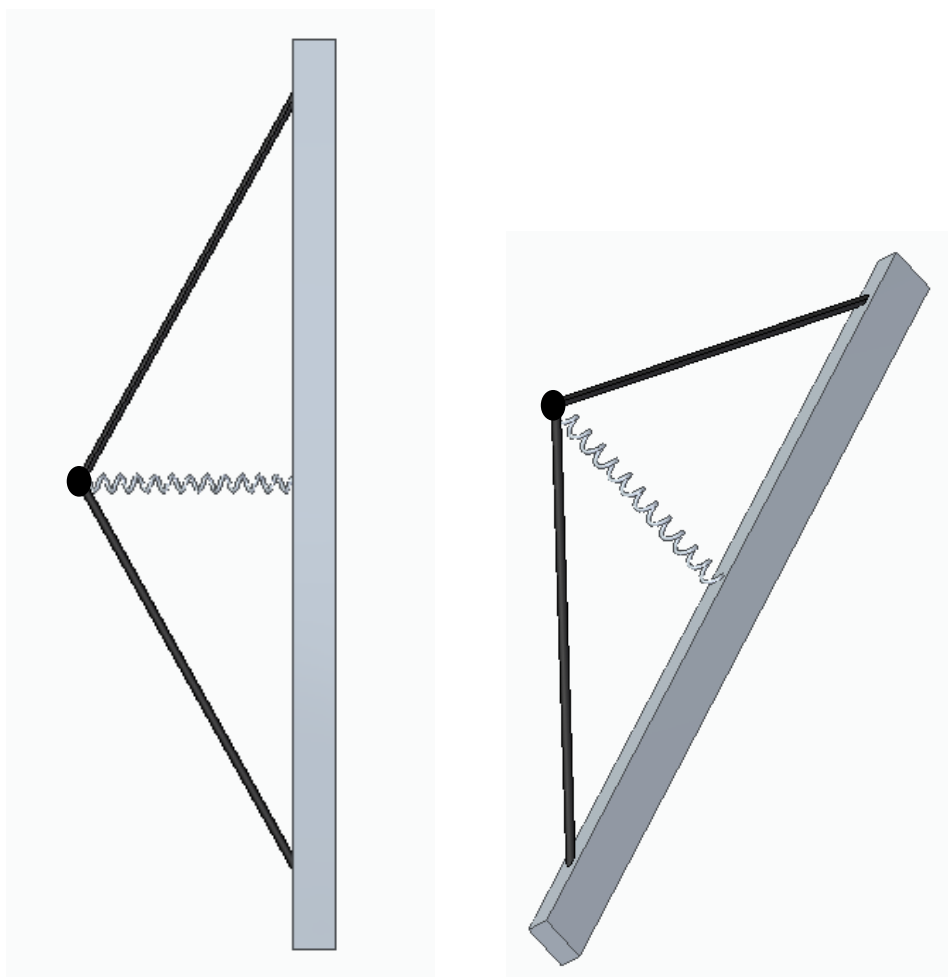


*Figura 12 – Modello 3D realizzato con Solid Edge della struttura della pinza e particolare sul sistema di presa.*

## 2.3 Analisi del sistema filo-molla

Determinati quindi i parametri fondamentali del cinematismo in presa, soggetto ad una forza applicata di 30N, si passa alla configurazione di rilascio. Per avere l'allentamento della presa abbiamo studiato una disposizione di molla e filo di Nitinol che fosse in grado di sviluppare 30 Newton per mezzo della compressione del primo elemento; si è collegata la cerniera di sinistra della pinza con l'estremità della molla attorno al quale viene fatto passare l'SMA, posta al di sotto del gripper. Una volta precaricato il nostro elemento SMA con gli stessi 30N di forza vi inseriamo la molla in compressione, ciò genererà una deformazione sulla fase martensitica stabile a temperatura ambiente del Nitinol che assumerà una disposizione cristallina "detwinned". Il filo dunque varierà la sua lunghezza iniziale una volta precaricato e l'attuatore stringerà le prese attorno all'oggetto da sollevare. Il Nitinol viene poi riscaldato con il conseguente recupero della forma iniziale e dunque l'estremo della pinza diminuisce la propria distanza dal fulcro causando l'aumento della distanza tra le aste di presa; in tal modo però si ha un'ulteriore compressione della molla che porta allo sviluppo di tensioni sempre maggiori nel filo. Per ovviare a tale problema si può intervenire sulla molla stessa scegliendone una con costante elastica estremamente bassa in modo tale che sviluppi basse forze con ingenti compressioni, oppure si può realizzare un piccolo sistema di smorzamento della forza trasmessa sulla base grigia in figura che sia in grado di

ridistribuire lo sforzo elastico tra filo e base. La parte più complicata dell'intero processo di progettazione dell'attuatore sta proprio nella difficoltà di trovare il giusto compromesso tra molla, filo e spostamento desiderato in apertura di presa; vanno dunque dimensionati i componenti disposti come in figura 13.



*Figura 13 – Modello schematico 3D realizzato con Solid Edge raffigurante il sistema filo-molla.*

Proviamo ad analizzare ciascuno di questi aspetti e a trovare la migliore soluzione che rispetti le nostre necessità applicative. Stabiliamo fin da subito la corsa che deve effettuare la cerniera dove la forza è applicata e dunque lo slack che la molla ed il filo di Niti devono essere in grado di recuperare tra le configurazioni di presa e rilascio. A seguito di numerosi tentativi parametrici, e ragionando sugli angoli caratteristici ottenibili con le lunghezze delle aste precedentemente delineate, ci si è resi conto che la corsa ottimale è di 10mm. Ciò porta ad una diminuzione della distanza tra cerniera e fulcro che passa da 91,87mm a 81,87mm, durante l'allentamento della presa, con un conseguente incremento della distanza tra le prese di 5,33mm che permette il distacco dall'oggetto che è stato spostato.

Per ottenere tali misure si è eseguito un semplice calcolo sugli angoli in gioco nelle diverse configurazioni in relazione alle dimensioni delle aste: in presa abbiamo  $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$  e  $\alpha_3 = \alpha_4 = 32,02^\circ$  mentre in apertura otteniamo  $\alpha_1 = \alpha_2 = 54,46^\circ$  e  $\alpha_3 = \alpha_4 = 37,61^\circ$ . Per ottenere questi angoli ci si è serviti di due differenti modalità di calcolo: nella configurazione in presa si è partiti dai  $45^\circ$  delle prime due aste per poi ottenere i valori di  $\alpha_3$  e  $\alpha_4$  per mezzo della relazione

$$\alpha_3 = \arcsin \frac{L_2 \sin \alpha_1}{L_3 (1 - \text{fulcro})}$$

in modo tale da avere la variazione di quest'ultimo angolo al variare del primo presente nella formula stessa; nella configurazione di rilascio al contrario abbiamo

ottenuto le misure dei due angoli ricavando le soluzioni del sistema di equazioni costituito da

$$L1 \sin \alpha_1 - L3 \sin \alpha_3 = 0 \quad \text{e} \quad L1 \cos \alpha_1 + L3(1 - \text{fulcro}) \cos \alpha_3 = 81.87.$$

Per la scelta della molla, come detto, si è utilizzata la relazione  $F_a = kx$  imponendola uguale a 30N e si è ragionato sulle caratteristiche che deve avere la molla affinché manifesti una bassa costante elastica. Utilizzando così la relazione per la definizione del coefficiente  $k$  data da

$$k = \frac{d^4 E \cos \alpha}{16(1 + \nu) N D^3}$$

abbiamo cercato una configurazione che massimizzasse il denominatore in modo da garantire elevate compressioni. La molla scelta presenta un diametro della sezione di 1.25mm ed un diametro esterno pari a 8.25mm, il materiale da cui è costituita è un acciaio per molle con modulo di Young pari a 200GPa e coefficiente di Poisson di 0.3, l'angolo di inclinazione  $\alpha$  corrisponde a  $3.55^\circ$  mentre la somma delle spire attive (12) e di quelle inattive (2) è pari a 14; la lunghezza iniziale della molla è infine pari a 25mm. Con tali parametri, la molla ottenuta presenta una costante elastica pari a 2.98N/mm che equivale ad un accorciamento della molla in compressione pari a 10.07mm.



Nella scelta del filo di Nitinol invece, abbiamo seguito una strada differente, ovvero abbiamo ragionato sulle deformazioni indotte dalle tensioni causate dalla forza applicata esercitata dalla molla. Facendo riferimento alle specifiche caratteristiche del filo di Niti che intendiamo adoperare, abbiamo verificato la deformazione ottenibile in funzione del diametro (e dunque dell'area) del nostro elemento in SMA. Nel nostro caso il Niti presenta un modulo di Young martensitico "twinned" pari a 44077MPa nella sua fase elastica, prima di entrare nel plateau martensitico "detwinned" con modulo  $E_h$  pari a 4072Mpa; al contrario nella fase austenitica si ha un modulo di Young pari a 50GPa. Ragionando con questi dati abbiamo quindi definito per mezzo della relazione:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon$$

le deformazioni necessarie indotte nel filo di lunghezza originaria pari a 92.22mm al fine di ottenere uno slack pari a 10mm. Tra i fili di Nitinol disponibili in commercio si è dunque scelto quello con diametro di 0.38mm con area pari a  $0.11\text{mm}^2$ , che vedrà dunque esercitata una tensione pari a 264.52MPa. In tal modo un precarico pari a quello della forza applicata dalla molla in mezzeria del filo è in grado di generare una deformazione pari al 5.1% nella fase martensitica del filo (le = limite elastico, con  $\varepsilon_{le} = \sigma_{le}/E_{mart}$ )

$$\varepsilon_{tot} = \frac{(\sigma_{tot} - \sigma_{le})}{Eh} + \varepsilon_{le}$$

la cui proiezione orizzontale corrisponderà proprio a 14.93mm, ovvero i 25mm della molla meno i 10.07mm dovuti alla compressione. La proiezione orizzontale ( $P_o$ ) si ricava da un'analisi geometrica delle deformazioni: si determina la lunghezza finale ( $L_f$ ) del filo deformato ed in base ad essa si ricava l'angolo di apertura ( $\beta$ ) del nostro sistema, questi due parametri sono direttamente proporzionali.

$$L_f = \frac{L_{tot}}{2}(1 + \varepsilon) \rightarrow \beta = \arccos \frac{1}{1 + \varepsilon} \rightarrow P_o = L_f \sin \beta$$

Riscaldando il filo abbiamo quindi austenite come fase stabile e a parità di tensione, all'aumentare del modulo di Young registreremo una minore deformazione, pari allo 0.5%, che (trascurando l'aumento di tensione per ulteriore compressione della molla, o utilizzando un adeguato sistema molla-smorzatore) causerà una diminuzione della proiezione orizzontale del filo fino ad una lunghezza di 4.62mm. Otteniamo così uno scorrimento di 10.31mm che sono praticamente quelli necessari all'apertura del nostro gripper in fase di rilascio. La differenza tra le due configurazioni in fase martensitica (a temperatura ambiente) e quella austenitica (riscaldata) sono apprezzabili nel grafico in figura 14.

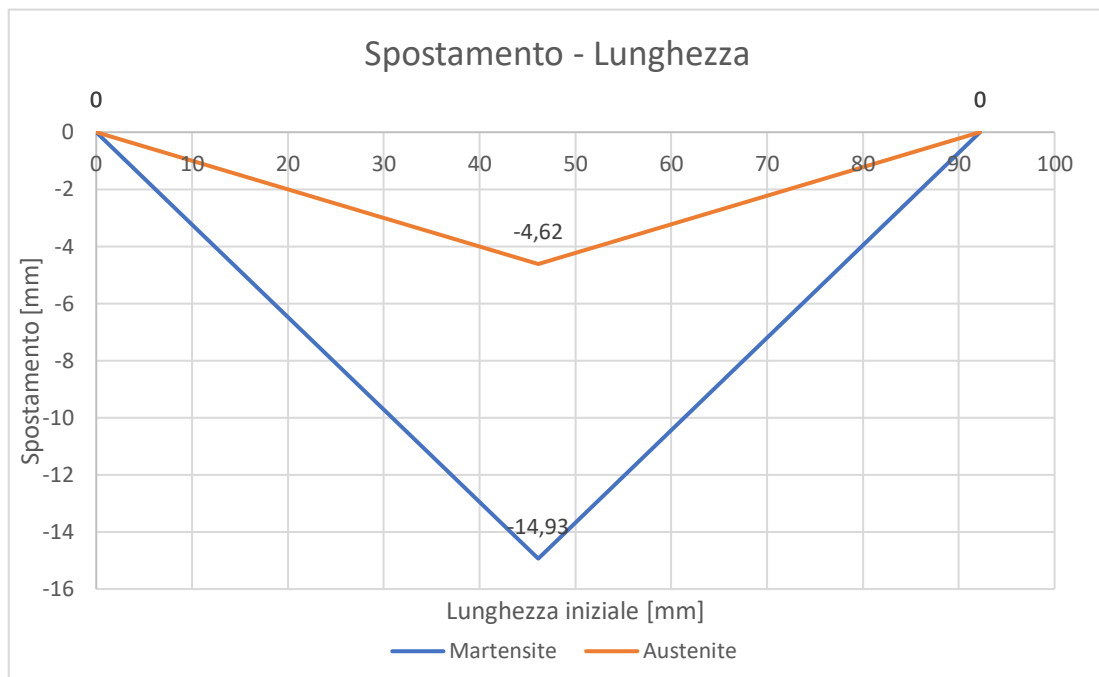
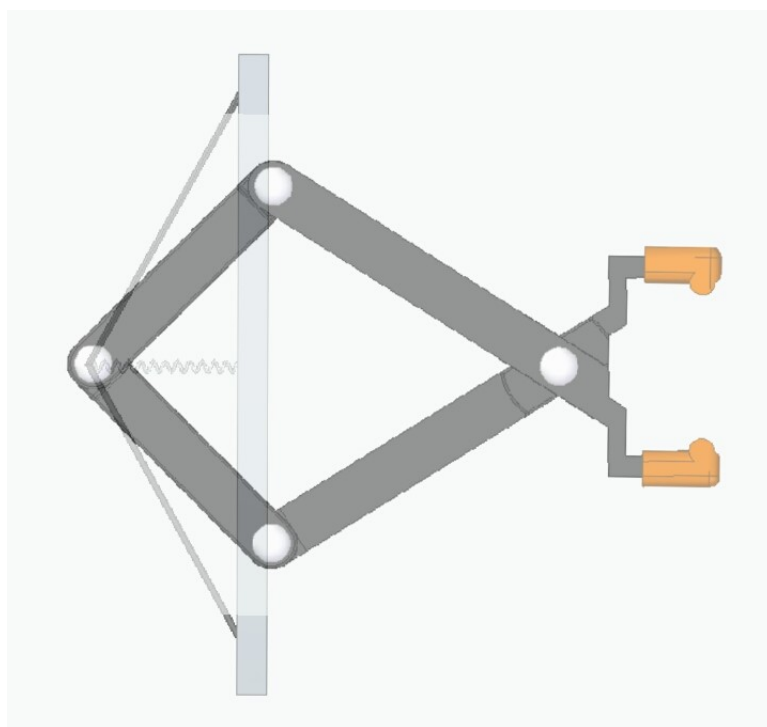


Figura 14 – Diagramma raffigurante le elongazioni del filo prima e dopo il recupero della forma avvenuto a seguito del cambiamento di fase stabile per apporto di calore.

## 2.4 Configurazione d'assieme

Sovrapponendo la pinza con il sistema Nitinol-molla e collegandoli nella cerniera mobile di sinistra avremo quindi la contemporaneità negli spostamenti: al riscaldare dell'elemento in SMA avremo il rilascio della presa da parte dell'attuatore mentre ritornando in condizioni di temperatura ambiente si riavrà lo sviluppo delle forze necessarie a sollevare un qualsivoglia oggetto che rispetti le caratteristiche di geometria e massa precedentemente definite.



*Figura 15 – Attuatore in lega a memoria di forma.*

## **Bibliografia**

[1] – Jaronie Mohd Jani, “Design Optimisation of Shape Memory Alloy Linear Actuator Applications”, RMIT University, 2016.

[2] - <http://www.it.schunk.com>.

[3] - Ashwin Rao, A.R. Srinivasa, J.N. Reddy, “Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators”, Springer, 2015.

[4] - Alexander Czechowicz, Sven Langbein, “Shape Memory Alloy Valves”, Springer, 2015.

[5] – F. Castelli, “Organi di presa per manipolatori industriali”, Tesi di laurea triennale in ingegneria dell’informazione, 2013.

[6] - <https://www.saesgetters.com/it>.

[7] – Tavis, Turner, “Thermomechanical Response of Shape Memory Alloy Hybrid Composites”, NASA/TM-2001-210656.

[8] – G. Costanza, M. E. Tata, C. Calisti, “Nitinol one-way shape memory springs: Thermomechanical characterization and actuator design”, 2010.

[9] - Su-Young Cha, Se-Young Jeong, Jeung Hun Park, Sang Eon Park, Jong Kweon Park, Chae Ryong Cho, “Thermodynamic and Structural Characterization of High and Low Temperature Nitinol”, 2006.

[10] – G. Costanza, M. E. Tata, E. Varone, “Design and characterization of linear Shape Memory Alloy actuator with modular stroke”, 2019.

[11] - K. Otsuka, Wayman, C. M., “Shape Memory Materials”, Cambridge University Press, 1998.